



Aportaciones científicas españolas a la Geotecnia

Leído por el

Excmo. Sr. D. José A. Jiménez Salas

En la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
el día 17 de marzo de 1982 con motivo de su recepción

*Excmo. Sr. presidente,
Excmos. Sres. académicos,
Señoras, señores:*

No ha lugar para, como es habitual en esta ocasión, comenzar con el panegírico del académico que nos ha precedido en la posesión de la medalla; pero es inevitable que, en estos momentos de tan profunda significación para mí, el pensamiento se dirija, en homenaje agradecido, hacia la memoria de aquellos que alimentaron mis raíces.

No es posible citarlos hoy a todos. La estructura de todo hombre, al igual que muchas formaciones geológicas, se compone de un gran número de capas sedimentarias, sobre las cuáles han actuado los más variados agentes diagenéticos. Pero, permitidme que cite tan sólo a cuatro personalidades, en las que concurre la singular circunstancia de haber ocupado puestos en este mismo recinto en el que hoy nos reunimos.

Muy en especial se hace presente en mi recuerdo D. José G. Álvarez Ude. Por circunstancias excepcionales, entre las que se

contó en primer lugar la amistad familiar, este insigne matemático tomó a su cargo la tarea, inferior a todas luces a su capacidad y actividades, de iniciar en las matemáticas a quien era, en aquel momento un adolescente. Sus lecciones dejaron en mí una huella imborrable: percibí el esplendor de la ciencia; admire la belleza de la matemática como construcción intelectual, y, al mismo tiempo, me adherí para siempre a la idea de que la realidad física responde exactamente a una cerrada armazón matemática, aún cuando casi nunca podamos más que vislumbrar su sombra.

Citaré además a D. Clemente Sáenz y a D. Francisco Hernández Pacheco, quienes, en las aulas de la Escuela de Ingenieros de Caminos, me introdujeron en el mundo de la geología, y para terminar, a D. José M.^a Albareda Herrera. Cuando, en 1942, acabé mis estudios de ingeniero de caminos, un viento de acción inmediata soplaba sobre una España ocupada en el trabajo de reconstruir lo destruido. Tan sólo gracias al refugio del Instituto Español de Edafología pudo preservarse en estos momentos iniciales la débil llama de mi vocación investigadora.

APORTACIONES CIENTÍFICAS ESPAÑOLAS A LA GEOTECNIA

LA GEOTÉCNIA

Éstos, con otros muchos más, fueron quienes guiaron mis pasos hacia el campo en el que se ha desarrollado toda mi actividad profesional y científica. Y la prefiguran, ya que es una síntesis de un aparato matemático y físico y de ciencia observacional. Este campo es el de la geotécnia.

La geotécnia, en su concepción actual, no es ciertamente una ciencia, sino una técnica: un conjunto de conocimientos y reglas para guiar al hombre en la consecución de finalidades prácticas: cimentaciones, obras hidráulicas y de comunicación, excavaciones a cielo abierto y subterráneas, etc. Por ello, parece obligado que nos detengamos algunos momentos a considerar cómo es que una actividad tal ha llegado a merecer el honor de acceder, a través de mi persona, a este recinto.

La ciencia se nutre del extracto de toda actividad intelectual, pero ésta se ejerce por estímulos muy variados, que podemos clasificar en dos grandes categorías. No me refiero a la introducción y a la deducción, que son los mecanismos con los que se hace la ciencia, sino las causas de que esos mecanismos estén en movimiento.

La primera de estas categorías es la de creación, que mejor pudiéramos llamar de recreación. Es el impulso que lleva al hombre a crear en su mente una explicación del mundo. Tarea excelsa, ya que intenta dar cumplimiento al propósito manifestado en el Génesis de que seamos imagen del Creador, que es quien fue capaz, antes que nadie, de pensar el universo.

Pero la otra categoría es innegablemente más caudalosa, y es la que podemos llamar «polimerización».

A cada problema práctico se le da, a lo largo del tiempo, y de una u otra manera, una solución. Pero, en determinados momentos, dentro de un conjunto de éstas, se engendra una hipersolución compleja, que demuestra ser capaz de generar por sí misma soluciones, incluso para problemas débilmente conexos. A esta hipersolución la llamamos ciencia.

Este fenómeno no se presenta necesariamente y hay muchas áreas de la técnica que se quedan en el estado de «sopa precientífica». No es que ésta no sea útil, pero las técnicas que permanecen así son las que llamamos «artes», o mejor, para evitar confusiones, «artesanas». Nadie duda de que pueden llegar a los mayores refinamientos: a elevar catedrales góticas o a construir y operar los complejos hidráulicos del Imperio del Centro.

Durante milenios, la ciencia ha parecido nutrirse preferentemente por el primero de los caminos. Causa cierto asombro que, en las sociedades primitivas, que debemos suponer acosadas por problemas de pura supervivencia, el estamento científico halla manera de protegerse de la presión social y concentra su interés en la astronomía, sin duda porque la regularidad de sus fenómenos le sugiere la posibilidad de comprenderlos.

Pero, paralelamente, la humanidad iba acumulando soluciones a sus problemas prácticos o en un inmenso almacén de conocimientos empíricos.

Solamente, en los últimos siglos, se ha producido, o al menos así nos lo parece desde nuestra perspectiva, un cambio cualitativo en la frecuencia de los acontecimientos de polimerización, como si alguna radiación desconocida hubiera excitado los mecanismos de síntesis. Esto comienza en el Renacimiento y se acelera hasta nuestros días, y es en ese período de tiempo, comparativamente breve, cuando se produce la vertebración de las ciencias naturales en la forma en la que hoy las contemplamos.

Este hecho ha sugerido multitud de interpretaciones: la herencia del genio griego, que pienso debiera haber vitalizado antes el mundo árabe, lo que no hizo. Galileo. Las circunstancias sociopolíticas, etc.

Sería en mí pretensión vana e inoportuna de dar aquí una solución a este problema, pero sí quiero hacer notar que hay un ejemplo concreto y reciente de esta metamorfosis de artesanía en ciencia, y, como, por otra parte, no puedo desprenderme del aforismo fundamental de la geología histórica —el presente es la clave del pasado— pienso que un examen de este caso de polimerización, que ha tenido lugar en el período que abarca nuestra vida y ante nuestros ojos, puede ayudarnos a comprender mejor la trayectoria de la Ciencia moderna.

Este ejemplo es el de la geotécnia.

Aún cuando claro es que no con esa denominación, la geotécnia como heurística es tan vieja como el hombre. Las cimentaciones de los ciguratos, los diques de defensa de inundaciones en Mesopotamia, los palafitos, etc., son testimonio de la antigüedad. Los romanos hacen sondeos y clavan pilotes, y sobre esta misma clase de cimentación se levantan las catedrales de la Edad Media. En China, la primera esclusa se inaugura en el año 984, y el Gran Canal, que une Hangchow en el Sur con Pekín en el Norte, se abre en 1287; pero mucho antes, en los Documentos del Estado de

Yüeh, datados hacia el 50 de nuestra Era, se hace referencia a que en tiempos que para aquel entonces eran ya antiguos, cuando no había más que instrumentos de bronce, se encauzó el Yangtsé y se canalizó el Río Amarillo, «y de este modo hubo comunicaciones por todas partes, y todo el Imperio estuvo en paz».

Mirando a épocas mucho menos alejadas, una de las tareas geotécnicas más admirables ha sido¹ la construcción y mantenimiento de Venecia, en un litoral inestable, luchando contra la erosión y los aterramientos, la subsidencia y la falta de agua potable. Las técnicas de cimentación empleadas no difieren esencialmente de las que utilizamos hoy (placa flotante, pilotes profundos, pilotes de compactación), aunque ahora tenemos una selección más amplia de materiales. Los constructores venecianos eran, antes que nada, geotécnicos competentes, y Sansovino, que tuvo bajo su inspección, como arquitecto jefe de la República, todo lo que allí se construía durante más de la mitad del siglo XVI, nos ha dejado, en sus escritos numerosas páginas de contenido puramente geotécnico.

Sin embargo, y aun con toda esta base de experiencia y de aplicaciones prácticas, la metamorfosis de la geotécnica en ciencia tiene que esperar hasta una fecha tardía, que muchos coincidimos en colocar en el año 1925, con la publicación del libro «Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage», de Karl Terzaghi, profesor en Viena².

Es el genio Terzaghi el que, dentro de una inmensa variedad del comportamiento del suelo, afirma la existencia de una realidad matemática detrás de todas las apariencias. Selecciona aspectos cuantitativos; formula hipótesis matemáticas; deduce, a través de ellas, consecuencias, y da reglas para la observación condicionada, para el experimento que permite la aceptación o el rechazo de las hipótesis inicialmente aceptadas.

Fue a partir de este momento cuando se forma, con la aportación de muchos, un cuerpo de doctrina científica que recibe el nombre, no muy apropiado, de mecánica del suelo, al que habrá de añadirse, treinta años más tarde, la mecánica de las rocas.

Sin embargo, puede objetarse en contra de la datación que acabamos de establecer, que, dentro de dicho cuerpo de doctrina, nos encontramos con muchos nombres muy anteriores a la fecha indicada: Coulomb, Rankine, Reynolds, Boussinesq, Prandtl, etc.

Pero observemos que, si bien sus aportaciones fueron trascendentales para el nacimiento de la mecánica del suelo, no representaron para ellos mismos más que episodios de su carrera científica que, en algunos casos, ni siquiera tenían ninguna intención de referir al suelo. Así pues, la aportación de Coulomb³ está contenida en una memoria de juventud presentada a la Academia de Ciencias francesa a la vuelta del primer destino en Martinica, con la evidente intención de llamar la atención sobre sus capacidades y evitar otro destino administrativo a cualquier otra isla alejada y malsana.

Rankine⁴ estableció su solución de un estado de equilibrio límite como un ejercicio teórico, y le molestaba que se le hablase de sus aplicaciones prácticas, que no vienen citadas más que en un solo párrafo de su escrito.

Boussinesq⁵ y, sobre todo Prandtl⁶, resolvieron sus ecuaciones sin prestar excesiva atención a que los modelos elegidos tuvieran una correspondencia real con el suelo y, en cuanto a Reynolds⁷, su concepto de la dilatancia, hoy fundamental para nosotros, fue establecido mediante una cuidadosa experimentación con arena. Hizo agudísimas observaciones sobre la resistencia de la superficie de las playas en distintas zona y momentos, que todavía utilizo yo en clase como forma de interesar en estos conceptos a las imaginaciones estudiantiles. Construyó un gran aparato triaxial (la muestra cubica seis pintas de arena) en donde ensayo con suelo seco, húmedo y saturado, obteniendo los mismos datos que hoy medimos en nuestros laboratorios. Pero no llegó a comprender las nociones de tensiones totales, neutras y efectivas que, sesenta años más tarde, serían una de las mayores aportaciones de Terzaghi, a pesar de que de manera tan evidente se ofrecían a sus ojos. Y esto porque Reynolds hacía todo aquello como un modelo que le ayudara a explicar el porqué de las antitéticas propiedades del éter, rígido frente a

¹ Martin, P.: «Essai sur la Géotechnique». París, Masson, 1976.

² Terzaghi, K.: «Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage». Deuticke, Leipzig und Wien, 1925.

³ Coulomb, C. A. «Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture». Mémoires de Mathématique de l'Académie Royale des Sciences, París, 7: 343-382, 1776.

⁴ Rankine, W. J. M.: «On the stability of loose earth». Phil. Trans. Roy. Soc., 147: 9-27, 1857.

⁵ Boussinesq, J.: «Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques». París, Gauthier Villars, 1885.

⁶ Prandtl, L.: «Ueber die Eindringungs-festigkeit (Härte) plastische Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden». «Anwendungsbeispiele zu einem Hencky-schen Satz über den plastische Gleichgewicht». Z. Angew Math.Mech., 1: 15-17, 1921 y 3: 401-407, 1923.

⁷ Reynolds, O.: «On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. With experimental illustrations». Phil. Mag., 20: 469-481, 1885.

Reynolds, O.: «Experiments showing dilatancy, a property of granular material, possibly connected with gravitation». Proc. R. Inst. G. B., 11: 354-363, 1886.

las solicitaciones instantáneas, blando ante las lentas. Precisamente el comportamiento de la arena densa saturada.

No es que Reynolds no se diese cuenta de las posibles implicaciones de sus descubrimientos, que, según dice de pasada «podrían colocar la teorías del empuje de tierras sobre bases verdaderas»; pero ni él ni ningún otro de los autores que hemos citado alumbró la mecánica del suelo, que aunque proporcionan materiales muy valiosos para construirla. Sus incursiones en estos dominios lo que demuestran es que la geotécnica era en aquel entonces un terreno vago, científicamente vacío por el cual cruzaban, casi indiferentes, estos ilustres transeúntes en su camino hacia sus verdaderas ocupaciones.

No deja de producir perplejidad, sin embargo, el hecho de que no se sintieran atraídos por unos temas que en una época posterior iban a concentrar la atención de tantos investigadores. Las causas pueden ser varias, y corresponden a diversas hipótesis entre las que se han formulado sobre el desarrollo de la ciencia. La realidad corresponderá probablemente a una combinación de las mismas.

En primer lugar, existía, como acabamos de ver, una artesanía muy desarrollada, que daba una solución a cada problema de cimentar estructuras. Incluso éstas, cuando empezó a incorporarse el acero, hicieron esta tarea más fácil, al hacerse más flexibles y ligeras. Y, en segundo lugar, me atrevo a decir que quizá aquellas inteligencias geniales encontraron la geotécnica demasiado complicada. No es, por supuesto, que no tuvieran capacidad para emprender la empresa, pero ésta no es atractiva para quienes avanzan por la primera vía, la de la Creación. Los problemas geotécnicos no presentan perspectivas de soluciones sintéticas y elegantes, como la mecánica o, a fortiori, la astronomía. Quizá Kuhn⁸, si se hubiese ocupado de este extremo, hubiese encontrado aquí una prueba de sus afirmaciones de que «la Naturaleza es demasiado compleja para ser explorada al azar, ni aún aproximadamente», y de la necesidad de dogmas científicos previos, para despertar la atención de las mentes investigadoras.

La geotécnica puede encontrar, por otra parte, buena compañía en las ciencias de la vida, que también se han desarrollado con retraso, lo que muchos atribuyen a que: «La Física es la Ciencia de los sistemas sencillos. La Biología, la de los complicados⁹». Y al oír esto debemos preguntarnos: ¿Y en qué lugar de esta escala es tan las ciencias que se agrupan bajo la geología?

Los sistemas que la geología estudia no son tan complicados como los biológicos, pero la dificultad de su estudio es, para mí, equivalente o tal vez mayor. Porque el sistema biológico, démosle la explicación que queramos, tiene, desde su mismo fundamento en cristales aperiódicos, un sentido teleonómico que lo introduce en un orden, que no podremos encontrar en la formación geológica, en donde, en principio, no puede encontrarse hilo conductor alguno. Y no debemos olvidar que sir Francis Bacon dijo: «Es más fácil que la verdad surja del error que de la confusión».

Confusión es, en efecto lo que sentimos cuando nos disponemos a prever el comportamiento del terreno. En primer término nos encontramos con una variedad de materiales distribuidos aparentemente al azar. Solamente recurriendo a todos los medios de la geología, que es siempre la base sobre la que descansa y el tronco del cual recibe la savia la geotécnica, podremos aclarar aquel caos, aunque con frecuencia a los datos obtenidos les sea plenamente aplicable la afirmación de W. Heisenberg: «lo que establecemos matemáticamente sólo contiene una parte de hecho objetivo. La parte mayor consiste en una estimación de posibilidades».

Pero la clarificación que podamos haber conseguido sobre la disposición de los materiales en el terreno da paso a una confusión, muchas veces aún mayor, cuando pasamos a querer cuantificar las propiedades de los mismos.

Éstas son, en efecto extremadamente complicadas, lo cual se debe a que los suelos son pseudosólidos particulados, cuyos elementos tienen tamaño suficiente para dar al conjunto propiedades difícilmente asimilables a la de un continuo. Al mismo tiempo, su número es tal, que tampoco es posible tratar los casos reales, ni aún con los ordenadores más potentes, mediante consideración individual de las partículas.

Las diferencias en los tamaños de éstos así como las de sus arreglos, hace que estos materiales sean los más variados entre todos los que manejamos, tanto cuantitativa como cualitativamente. Son anelásticos, histeréticos, viscosos. Evolucionan espontáneamente con el tiempo, exhiben comportamientos discontinuos, inestables, y conservan memoria de cuanto hemos hecho con ellos.

Hoy se ha conseguido, sin embargo, organizar en muchos casos los conocimientos de manera que puedan tener una validez permanente y universal, uniendo las experiencias que puedan haberse adquirido sobre materiales locales y para problemas concretos. Esta organización no ha podido hacerse más que a través

⁸ Kuhn, T. S.: «The Structure of Scientific Revolutions». Chicago Un. Press. 1962.

⁹ Whitehead, A. N.: «Essays in Science and Philosophy». Londres, 1948.

del empleo de un importante aparato matemático y de un prolijo desarrollo experimental.

A esta transformación de la geotécnica han colaborado científicos de muchos países. Entre ellos, los de España. Este último punto es el que más puede interesarnos y el que, por ser directamente conocido, procede sea expuesto aquí con mayor detalle.

Los años en que Coulomb preparaba su Memoria sobre la teoría de los máximos y mínimos aplicada a los problemas de empuje de tierras, eran aquéllos en los que Diderot, D'Alembert y sus colaboradores hacían lo mismo con los últimos tomos de su Enciclopedia. Hoy, en una parcela mínima y con más de dos siglos de retraso vamos a dedicar unos minutos a responder a la célebre pregunta de Masson de Morvillier a examinar qué es lo que la mecánica del suelo y de las rocas, qué es lo que la geotécnica debe a España.

No voy a hablar de lo ocurrido en la época precientífica. Citaré tan sólo como ejemplo un nombre liminar, el de D. José Ribera, contemporáneo, compañero y amigo, de D. José Echegaray, que desde su efígie nos contempla. Ribera escribió un libro de «Cimientos y Puentes de Fábrica¹⁰» que todavía estudié como texto parcial en la Escuela de Caminos, en el que se da cuenta de cómo se han resuelto los problemas de cimentación de obras importantísimas exclusivamente por medio de reglas empíricas y consejos derivados de una gran experiencia propia.

Pero el eslabón, en su doble sentido de pieza que une y de hierro acerado con el que se saca fuego de pedernal lo construyó el magisterio en la Escuela de Caminos de D. José Entrecanales Ibarra, quien, al ocupar la cátedra que había sido de Ribera la orienta decididamente en la nueva dirección, aún en momentos en los que todavía la obra de Terzaghi no había tenido tiempo de imprimir huellas profundas en la técnica del terreno.

En los años sucesivos, la chispa que supo arrancar este eslabón prende, y con tal fuerza, que no es posible hacer este examen con un criterio histórico o lineal. Es preferible ir repasando la mecánica del suelo y señalar las aportaciones de autores españoles que vayamos encontrando.

TEORÍAS DEL ESTADO LÍMITE

Las teorías más antiguas son las de equilibrio límite, iniciadas por Coulomb, y de Coulomb es, en cierto sentido, la primera ecuación constitutiva, aunque no dé información alguna sobre la deformabilidad del suelo. Vasándose en ella, Kötter plantea el sistema hiperbólico de ecuaciones diferenciales que define las tensiones de un sólido sometido a unas condiciones de contorno tales que en todos sus puntos se cumpla la condición de rotura. Plandtl lo integra para algunos casos particulares sencillos y Sokolovsky¹¹, mediante un cambio de variable, consigue transformarlo de manera práctica para su resolución numérica. Este resultado tiene poca difusión hasta que el mismo Sokolovsky lo presenta en el Congreso de la Sociedad Internacional de Mecánica del Suelo, en Londres en 1957.

Poco tiempo después, Santiago Uriel y Alcibiades Serrano se ponen a trabajar sobre este tema en España y, con la ayuda de Jesús Martínez, programan el proceso, lo que en aquellos años no era una tarea trivial. Lo aplican a diversos casos, especialmente a presas de tierra, y Santiago Uriel formula el concepto de «talud isorresistente», que permite alcanzar una determinada altura con menor volumen de material¹².

Serrano por su parte, imagina la forma de introducir las deformaciones. Para ello, entra en contacto y colabora con el grupo que en la Univesidad de Cambridge dirige W. K. Roscoe¹³, que trabaja sobre unos modelos de suelo mucho más refinados, inspirándose en la experimentación efectuada por Hvorslev¹⁴ durante su estancia con el grupo de Terzaghi, en Viena, y la de Rendulic, en Berlín¹⁵.

En el modelo de Cambridge, representamos los estados de los diferentes puntos del cuerpo en un espacio de tensiones. En éste puede definirse una familia de «superficies de fluencias», que admiten expresión matemática.

El estado del cuerpo en un punto determinado se define por el dominio limitado por una de estas superficies de fluencia. Podemos imponer al cuerpo cualquier trayectoria de tensiones incluida en este dominio, sin producir un cambio en este estado, pero, si pretendemos escaparnos de aquél, produciremos una deforma-

¹⁰ Ribera, J. E.: «Puentes de fábrica y hormigón armado». Madrid, Gráficas Barragán, 1929.

¹¹ Sokolovsky, V. V.: «Statics of granular media». Pergamon, 1965.

¹² Uriel Romero, S.: «Calculation of equal strength profiles by the method of characteristics, and its application to loose fill dam project». Revista O. P. Número especial Grandes Presas, 1967.

¹³ Roscoe, K. H.: Schofield, A. N. y Wroth, C. P.: «On the Yielding of Soils». Géotechnique, 8: 22-53, 1958.

¹⁴ Hvorslev, M. J.: «Ueber die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden». Copenhagen, 1937.

¹⁵ Rendulic, L.: «Ein Grundgesetz der Tonmechanik und sein experimentelle Beweis». Bauingenieur, 31/3: 459-467, 1937.

ción irreversible, que conduce a un nuevo estado definido por otra superficie de fluencia, perteneciente a la misma familia.

Al mismo tiempo, si asociamos el campo de tensiones al de deformaciones, podemos asociar también la dirección de vector de incremento de las deformaciones irreversibles (también llamado «velocidad»), y la perpendicular a la superficie de fluencia correspondiente al estado tensional instantáneo. Según el postulado de Drucker, que ya había sido atacado por Blan en 1957, ambas direcciones deberían coincidir. Los investigadores de Cambridge comprueban que esto ocurre con suficiente aproximación en las arcillas, pero no en las arenas, en lo que confirman las predicciones teóricas formuladas anteriormente por Bent Hansen en 1958¹⁶.

La atención se concentra entonces en hallar un valor o una ley adecuada para el ángulo de dilatación. Partiendo de estas premisas, Bransby, igualmente en Cambridge, introdujo el concepto de «campos simples», equivalentes a la solución de Prandtl del campo de tensiones para sólidos con parámetros de Coulomb constantes, pero aplicado a un campo de velocidades con dilatación constante. Serrano extiende este procedimiento a materiales rigirizables granulares con lo que denomina «campos asociados¹⁷». El sólido tiene ahora, en cada punto, un ángulo de rozamiento interno «movilizado», y una dilatación que depende de las deformaciones experimentadas. Aplicando el método de las características adaptado a este caso de ángulo de rozamiento variable de punto a punto, podemos calcular las tensiones y, de aquí, el campo de incremento de deformaciones y una nueva distribución de ángulos de rozamiento interno y de dilatación.

De esta manera, por iteración, Serrano consiguió calcular las tensiones y deformaciones en varios casos reales, particularmente de empuje pasivo.

Hoy sabemos, sin embargo, que el método de las características nos da tan sólo un estado posible de equilibrio estático. Si de lo que se trata es de estudiar las posibilidades de rotura este cálculo

nos dará una útil cota inferior que, comparada con otro estado obtenido mediante el método cinemático, puede resolverse totalmente, para la necesidades de la práctica, el problema de conocer el coeficiente de seguridad. sin embargo, desde el punto de vista de las deformaciones, obtendremos así un valor posible, pero sin saber el margen de error y ni siquiera su sentido, respecto al real.

Los procedimientos hoy en uso se inspiran generalmente en el empleo de elementos finitos, que han demostrado ser un poderoso instrumento para tratar las más difíciles situaciones. A partir de los trabajos de Zienkiewicz¹⁸, y siguiendo el paso del progreso en la construcción de ordenadores más y más potentes, pueden resolverse casos con condiciones iniciales complicadas, y respondiendo a ecuaciones constitutivas más y más refinadas. De esta manera, resulta hoy ya posible aplicar en ellos el modelo de Cambridge, u otros modelos de respuesta igualmente complejos.

Así pues Serrano y Rodríguez Roa, este último investigador visitante y hoy profesor de la Universidad Católica de Chile, resuelve el problema de un punzón rígido (o un pilote) hincándose en una arena que responde a un modelo en el que hay una desviación del vector incremento de deformación respecto a la normal, definida mediante una expresión matemática. Ésta fue establecida por ajuste con resultados experimentales publicados, y, en particular, los de Lade y Duncan (1973). Serrano y Rodríguez Roa establecieron así una ecuación constitutiva corregida basándose en la cual construyeron un complejo programa para elementos finitos tridimensionales con simetría axial¹⁹.

Es poco frecuente, sin embargo, emplear modelos tan complicados, que precisan para su aplicación mucho tiempo de ordenadores muy grandes. La mayor parte de programas en uso práctico recurren a ecuaciones constitutivas mucho más sencillas. Muy frecuentemente, utilizando tan sólo la ley de Hooke.

Esto lleva a resultados muy aceptables, pero sólo si se sigue el camino de ajustar los valores del módulo de Young con correcciones más o menos empíricas. Sagaseta, Escario, Oteo y Fernández

¹⁶ Hansen, Bent: «Line ruptures regarded as narrow rupture zones; basic equations based on kinematic considerations». Conf. Int. sobre Problemas de empuje de tierras. 1: 39-49, 1958.

¹⁷ Serrano, A.: «The extension of simple velocity field». Research project report. Advance Course in Soil Mech. Un. of Cambridge, 1969.

Serrano, A.: «Discussion on Associated Fields Method». Roscoe Memorial Symposium. Foulis, Henley-on-Thames, 1: 617-622, 1971.

Serrano, A.: «El método de los campos asociados y su aplicación en los problemas de empuje de tierras». 5.º Congreso Europeo de Mec. Suelo y Cimentaciones. Madrid, 1: 77-84, 1972.

¹⁸ Zienkiewicz, O. C., Valliapan, S. y King, I. P.: «Stress analysis of Rock as a No-tension Material». Géotechnique, 18: 1-12, 1968.

Zienkiewicz, O. C.: «The Finite Element Method. From Intuition to Generality» App. Mech. Rec., 23: 3-7, 1970.

¹⁹ Lade, P. V. y Duncan, J. M.: «Cubical triaxial tests on cohesionless Soil». J. Soil Mech. A. S. C. E. 99: SM 10: 793-812.

Rodríguez Roa, F.: «Nuevo modelo elastoplástico para suelos granulares y su aplicación mediante elementos finitos a problemas con simetría axial». Tesis doctoral dirigida por A. Serrano. Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, 1977.

Rodríguez Roa, F. y Serrano, A.: «Comportamiento en rotura de la arena». Rev. IDIEM. Universidad de Chile, 18: 1: 17-32, 1979.

²⁰ Escario, V. y Sagaseta, C.: «Empujes laterales en una sección del Metro de Madrid». 5.º Congreso Europeo de Mec. del Suelo y Cimentaciones, 1: 499-508, 1972.

Moya²⁰ han mostrado en sucesivas publicaciones, cómo puede desarrollarse correctamente esta metodología para llegar a prever las deformaciones producidas en la superficie por la excavación de un túnel para ferrocarril metropolitano. Comenzó Sagaseta aplicando un programa complicado, con modelo coulombiano elasto-plástico, al análisis retrospectivo de casos reales. De esta manera, y mediante sucesivos ajustes, se ha podido llegar a definir un «módulo de Young equivalente», con el que pueden calcularse, con mayor sencillez, las situaciones sucesivas.

Este proceso, juiciosamente aplicado, es muy conveniente, ya que la introducción del modelo elastoplástico, aumenta de modo muy notable el tiempo de utilización del ordenador: unos elementos seguirán la ley de Hooke, y otros, habiendo llegado a la situación de rotura, se encuentra en ella, hallándose en consecuencia en «plasticidad contenida» con deformaciones regidas por una ley de fluencia plástica que no es la inicialmente supuesta: el problema debe resolverse por iteración.

Las primeras soluciones en nuestro país vinieron por un camino algo diferente. Carlos Lorente de No utilizó, en lugar de elementos finitos, diferencias finitas, siguiendo el método de parámetros agrupados de Ang y Harper²¹ y utilizando como criterio de rotura el Tresca. Rafael Lorente de No²² aplicó posteriormente un programa más avanzado, pero en la misma línea, a la solución de diversos casos de interés práctico, así como Luis Cañizo²³ estudió de esta manera la plastificación progresiva de un talud,

aplicando además el criterio de rotura de Coulomb, y demostró, por otra parte, que no hay una diferencia esencial en la estructura matemática de este método, ni una ventaja apreciable, respecto al de elementos finitos.

Todavía, sin embargo, puede seguirse más adelante en este camino y Luis Fort²⁴ introdujo más tarde la viscosidad, como factor retardador de las deformaciones, con lo cual se pueden simular, mediante ajustes empíricos, fenómenos tales como la consolidación secundaria de las arcillas, la reptación estacional de los taludes, y la rotura progresiva, particularmente de arcillas blandas tixotrópicas. La introducción de la viscosidad no conduce a los procesos de cálculo mucho más largos, ya que el problema se resuelve mediante la transformación de Carlson.

Los procedimientos de cálculo en diferencias finitas parecen estar hoy, sin embargo, sobrepasados por los que utilizan los elementos finitos, que resultan ser más adaptables. Así pues, entre los avances posteriormente conseguidos en nuestro país tenemos como muy destacados el grupo de métodos puestos a punto en la Universidad de Santander. Sagaseta, Ballester, Sánchez Alcanturri y Arroyo²⁵, por ejemplo establecen un modelo geológico electoplástico para arcillas blandas en procesos de carga sin drenaje, en el que se tiene en cuenta la anisotropía. Para formular un programa en elementos finitos, han elegido un modelo híbrido en tensiones y deformaciones, para lo cual, partiendo del principio variacional de Reissner, lo han generalizado para estudiar la fase plástica. Han

Sagaseta, C.: «Estudio tenso-deformacional alrededor de un túnel excavado en un medio elastoplástico, con especial consideración de la influencia del proceso constructivo». Tesis Doctoral, dirigida por D. Ventura Escario. Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1973.

Sagaseta, C. y Escario, V.: «Influencia del proceso constructivo en la distribución de presiones alrededor de un túnel». 1.º Simposio Nacional sobre Túneles, Madrid, II; 9, 1974.

Sagaseta, C. y Oteo, C.: «Análisis teórico de la subsidencia originada por la excavación de túneles». 1.º Simposio Nacional sobre Túneles, Madrid, vol. I, II-10, 1974.

Oteo, C. y Moya, J. F.: «Estimation of the soil parameters of Madrid in relation to the tunnel construction» Proc. 7th European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Brighton, vol. III, 1979.

Escario, V., García, J. M., Moya, J. F., Oteo, C. y Sagaseta, C.: «Problemas geotécnicos en torno a la ampliación de la red del metro de Madrid». Revista de Obras Públicas, 1981. Enero (pp. 7-27) y marzo (pp. 193-211). (Trad. del trabajo publicado en Case Histories volume of the 9 th. Int. Conf. ISSMFE, Tokio, 1977.)

Oteo, C.: «Repercusión de la construcción de túneles urbanos en edificaciónes próximas. Simposio sobre Uso Industrial del Subsuelo, vol. II, 1981.

²¹ Ang, F. y Harper, H.: «Analysis of contained Plastic Flow in Plane Solids». Journ. Eng. Mech. Div. A. S. C. E., 78: 397-418, 1964.

Lorente de No, C.: «Plastic Flow behind a vertical excavation». M. Thesis Mass. Inst. of Tech., 1966.

Lorente de No, C.: «Stability of Slopes with Curvature in Plane View» 7th Int. Conf. ISSMFE, México, 2: 635-638, 1969.

²² Lorente de No, Rafael: «Nuevos modelos matemáticos de parámetros agrupados y su aplicación a la mecánica del suelo». Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1971.

²³ Cañizo Perate, L.: «Plastificación progresiva de un talud coulombiano». E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1971.

²⁴ Fort, L.: «Modelo para el estudio de la acción de la vegetación sobre las características resistentes del terreno: aspecto estabilizado en taludes». Tesis doctoral Escuela T. S. Ing Agrónomos, Madrid 1975. Ver también en «Geotecnia y Cimientos III», ed. Rueda, Madrid, 1980, cap. 15. pp. 1.272-1.273.

²⁵ Sagaseta, C. y Ballester, F.: «Un modelo elastoplástico anisótropo para arcillas blandas en procesos de carga sin drenaje». Bol. Soc. Esp. Mec. Suelo, 22: 3-11, 1976.

Sagaseta, C., Ballester, F. y Sáinz, J. A.: «Numerical model for undrained and consolidated deformations of soft clays». 3rd. Int. Conf. Num. Meth. Geomech. Aachen., 1: 191-200, 1979.

Ballester, F. y Sagaseta, C.: «Anisotropic elastoplastic undrained analysis of soft clays». Géotechnique, 29:3 : 323-340, 1979.

Sánchez, J. M., Sagaseta, C. y Ballester, F.: «Influence of stress history on undrained behaviour of soft clays». 7th Europ. Conf. Soil Mech. Brighton, 1:257-261, 1979.

Sagaseta, C. y Arroyo, R.: «Limit analysis of anisotropic soft clays». Euro-mech. Colloquium, 140. Udine, 1981.

puesto a punto los procedimientos experimentales, con lo que han comprobado la validez del modelo y hecho posible la determinación de sus parámetros, y han efectuado aplicaciones prácticas, incluso con ensayos a tamaño real. Sus trabajos continúan activamente, extendiéndose también por Sáinz Borda a los casos en los que existe consolidación²⁶. Utiliza un modelo elastoplástico, rigidizable, formulado en tensiones efectivas, y no limitado por el postulado de Drucker, pero, por el momento, isótropo. La validez de los resultados ha sido contrastada con datos de casos reales.

Junto al método de elementos finitos debemos citar aquí el de ecuaciones integrales singulares en el contorno («Boundary Integral Equation Method»).

Su fundamento teórico se remonta a los trabajos de Poisson con sus ideas de fórmulas de representación en función de integrales del potencial. Como es bien sabido el valor de la solución en un punto del dominio en estudio puede ser representado como la suma de las integrales de un potencial de capa simple y otro de capa doble en el contorno más un potencial volumétrico. En la teoría clásica del potencial ello es la fórmula de Green, mientras en elasticidad lineal se trata de la identidad de Somigliana. Para la mayoría de los casos prácticos la integral de volumen se puede llevar al contorno también y con ello la discretización necesaria para el tratamiento numérico se limita a la frontera del dominio con la siguiente reducción en el número de variables a tratar.

Los trabajos fundacionales son los de Kupradze (1965), Hess (1967), Jaswon (1963), Rizzo (1967) y Cruse (1969), pero el impul-

so real se obtuvo al aplicar la filosofía de discretización del método de los elementos finitos (Lachat y Watson, 1975)²⁷.

En nuestro país el grupo dirigido por el profesor Alarcón, catedrático de Estructuras en la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid, ha producido 7 tesis doctorales y varios artículos y comunicaciones sobre el tratamiento riguroso del método en problemas de potencial, elasticidad y plasticidad; filtración en medios porosos, placas de anclajes, túneles, etc. Lo han aplicado también a problemas dinámicos tales como la determinación de impedancias de terrenos para el tratamiento de cimientos de máquinas vibrantes o centrales nucleares²⁸.

Aún cuando, como acabamos de decir la clarificación de la filosofía del método y la sistematización y desarrollo del mismo son recientes, no puede decirse que haya sido utilizado en fechas anteriores, aunque de manera más tosca. Así, por ejemplo, en el Congreso de Mecánica del Suelo de Montreal, en 1965²⁹, presente una solución de la interacción entre el terreno y un pilote, mediante la discretización de este último. La acción de cada elemento se calculó mediante la solución de Mindlin (1936), quien la halló utilizando el método de Galerkin. La condición de compatibilidad conduce a una ecuación de Fredholm, cuya resolución numérica efectuó con la ayuda de Arrechea y muy especialmente de Jesús Martínez.

Se percibía que este camino podía llevar lejos, y así Carlos Lorente de No lo extendió inmediatamente a casos más complicados y también al de cargas laterales en el que se llega a una ecuación de Volterra. Resolvió también algún problema de grupos de

²⁶ Sagasetta, C. y Sánchez, J. M.: «Theoretical prediction of shear strength of soft clays in compression, extension and simple shear». 7th Europ. Conf. Soil. Mech. Brighton, 4: 34-37, 1979.

Sánchez, J. M., y Sagasetta, C.: «Undrained behaviour of soft clays in triaxial test». 10th Int. Conf. ISSMFE, Estocolmo, 1: 771-774, 1981.

²⁷ Kupradze, V. D.: «Potential methods in the Theory of Elasticity». Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965.

Hess, J. L. y Smith, A. M. O.: «Calculation of potential flow about arbitrary bodies». In «Progress in Aeronautical Sciences», vol. 8 (D. Kuchemann, Ed.), Pergamon. Londres, 1967.

Jaswon, M. A.: «Integral equation methods in potential theory». I. Proc. Royal Society (A). 275, 23-32, 1963.

Rizzo, F. J.: «An Integral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics». Quart. Appl. Math., 25 (1), 83-95, 1967.

Cruse, T. A.: «Numerical solutions in tree dimensional elastostatics». Int. J. Solids Structures, 5, 1.259-1.274, 1969.

Lachat, J. C. y Watson, J. O.: «A second generation integral equation program for three-dimensional elastic analysis». In «Boundary-Integral Equation Method: Computational Applications in Applied Mechanics» (T. A. Cruse y F. J. Rizzo, Eds.). ASME, New York, 1975.

²⁸ Alarcón, E., Brebbia, C. y Domínguez, J.: «The Boundary Element Method in Elasticity». Int. J. of Mech. Sciences. MS 437, pp. 1-15, 1978.

Alarcón, E.: «El método de las ecuaciones integrales singulares (BIEM)». Revista de la Real Acad. Cien. Ex. Fis. y Nat., tomo LXXIV, cuaderno 2.º, 1980.

²⁹ Jiménez Salas, J. A. y Arrechea Belzunce, J. A.: «Résolution theorique de la distribution des forces dans les pieux». 6th Int. Conf. ISSMFE, Montreal 2: 309-313, 1965.

Jiménez Salas, J. A.: Discusión en la sesión 6. 6th Int. Conf. ISSMFE, Montreal, 3: 489-492, 1965.

³⁰ Zaballos Guijarro, J.: «Estudio de los efectos originados por esfuerzos dinámicos horizontales en cimentaciones profundas». Tesis doctoral dirigida por D. Carlos Lorente de No, Escuela. T. S. de Ingenieros de Caminos. Madrid 1974.

³¹ Oteo, C.: «Resistencia y deformacion lateral de los grupos de pilotes verticales, con especial consideracion de los esfuerzos alternativos». Tesis doctoral dirigida por D. José A. Jiménez Salas, Escuela. T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1972.

Oteo, C.: «Recomendaciones para el cálculo práctico de pilotes con carga horizontal». Boletín de Informaciones del Laboratorio del Transporte de la Mecánica del Suelo, 103: 3-33, 1973.

Oteo, C. y Valerio, J.: «A simplified Analysis of Piles with Lateral Loads». 10th. Int. Conf. ISSMFE, Estocolmo, 1: 795-798, 1981.

pilotes y con la colaboración de Zaballos el problema dinámico con cargas periódicas³⁰.

Oteo por su parte³¹, partiendo de bases análogas sistematiza los resultados y además elabora un método simplificado de aplicación inmediata, que reproduce los resultados obtenidos con ayuda del ordenador, con aproximación ampliamente suficiente para la aplicación. Aparte de esto, resuelve nuevos casos y presta particular atención a la situación de rotura del suelo que rodea el grupo de pilotes, sometido a una fuerza horizontal. Efectúa experimentos en modelo reducido, y verifica un aumento de los desplazamientos y de los momentos flectores en los pilotes cuando los esfuerzos son alternativos o dinámicos³², profundizando posteriormente sobre este punto con la colaboración de Valerio³³.

Un nuevo problema de interacción pilote-terreno, estudiado por este mismo investigador, es el de las fuerzas inducidas en el pilote por sobrecargas asimétricas aplicadas sobre el terreno, llegando, como en el caso anterior, a proponer una fórmula simplificada, ajustada a los resultados obtenidos con ordenador, pero de mucho más fácil aplicación práctica³⁴.

Tenemos así un conjunto muy voluminoso de soluciones teóricas, las cuales han sido comprobadas, en lo que a su correlación con la realidad se refiere, por diversos medios, incluyendo ensayos a tamaño natural³⁵; pero el principio, además, ha tenido una gran fecundidad, habiendo sido recogido y aplicado por investigadores extranjeros, constituyendo hoy un método que, dada además, la proliferación de los ordenadores, es ya de uso corriente³⁶. No supone hoy tampoco obstáculo importante la consideración de las plastificaciones localizadas, que no pudimos tener en cuenta en nuestra primera solución, pero que ya introdujo Lorente de No en la primera de las suyas.

LA RESPUESTA HIPERBÓLICA

En todo caso, tanto en diferencias como en elementos finitos o de contorno los procedimientos de cálculo con modelos discontinuos elastoplásticos son, necesariamente, iterativos. Una manera aproximada de obviar esta complicación la constituye la ecuación constitutiva llamada «respuesta hiperbólica» propuesta por Kondner³⁷. Consiste en una aproximación empírica mediante una hipérbola, a las curvas experimentales de deformación, formulada de manera que la asíntota establezca una condición análoga a la rotura. No hay, por lo tanto, una discontinuidad en el paso de estados elásticos a plásticos, si bien no por eso dejan de presentarse problemas de cálculo originados por los grandes gradientes de deformación.

El empleo de este modelo ha tenido gran difusión, previendo ajustadamente las deformaciones en ciertos tipos de suelo; pero es incapaz de reproducir el ablandamiento por deformación, en aquellos suelos (arenas densas, arcillas preconsolidadas) que tienen un pico de resistencia y una disminución posterior de la misma.

LA RESPUESTA ARMÓNICA

Contrariamente existe otra ecuación constitutiva, la «respuesta armónica», ideada por Ángel Uriel Ortiz³⁸, que sí tiene esta posibilidad. La ecuación diferencial fundamental es la misma que la de la oscilación con amortiguación crítica, de donde viene el nombre que se le ha dado. Dispone de cuatro parámetros, con lo que a partir de un número limitado de ensayos, consigue ajustarse, e incluso extrapolar estados de deformación con exactitud tal, que puede sospechase que algún día se le encuentre una demostración racional a lo que hoy viene a ser un ajuste empírico. El mismo Ángel Uriel Ortiz³⁹ ha entrevisto una posibilidad de ello, considerando la dinámica del deslizamiento de los granos, cuando se

³² Oteo, C.: «Effects of the alternative lateral loads on pile groups» 8th Int. Conf. ISSMFE, Moscú, 2. 1: 179-186, 1973.

³³ Oteo, C.: «Cimentaciones profundas sometidas a esfuerzos dinámicos horizontales». Hormigón, Monografía núm. 10 (Asociación de fabricantes de Cemento de España). 1975.

Valerio, J. y Oteo, C.: «Dynamyc behaviour of a group of free-standing piles». Int. Synp. on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, pp. 627-638, 1980.

³⁴ Oteo, C.: «Discussion of Analysis of piles undergoing lateral movement» Journal of the Géotechnical Engineering, A. S. C. E., abril, pp. 464-467, 1974.

Oteo, C.: «Horizontally loaded piles. Deformation influence». 9th Int. Conf. ISSMFE, Tokyo, Special Session n.º 10., pp. 101-106, 1977.

³⁵ Uriel S., Uriel, A., Oteo C. y Cañizo, L.: «The behaviour of precast piles subjected to lateral pressures at a ship-building site». Proc. 6th European Conf. on S. M. F. E. Viena, 2: 585-590, 1976.

³⁶ Poulos, H. G. y Davis, E. H.: «Pile foundation analysis and desing». Wiley and Sons, 1980.

³⁷ Kondner, R. L.: «Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils». J. Soil Mech. A. S. C. E., 89: SM 1: 115-142, 1963.

³⁸ Uriel Ortiz, A.: «A semi-empirical approach to the stress-strain behaviour of sands». Part I: Derivation of the mathematical model. Part II: Model applications to laboratory tests conditions». Cambridge Univ. Eng. Dept. CUED Report, 1978.

Uriel Ortiz, A.: «Respuesta armonica tensión-deformación de suelos granulares» Bol. Inf. Lab. Transporte y Mecánica del Suelo., 125: 9-32 y 130: 3-18, 1978.

Uriel Ortiz, A. y Merino, M.: «Harmonic response of sands in shear». 3.ª Conf. Int. sobre Métodos numéricos en Geotécnia Aquisgrán, 1: 447-453, 1979.

³⁹ Uriel Ortiz, A.: «Intrinsic Dynamics of the Quasi-static Mechanics of Granular Soils». Int. Symp. Num. Methods in Soil and Rock Mech. Karlsruhe, 61-70, 1975.

supera la resistencia friccional en los contactos. Esto conduce a una ecuación diferencial que, en el caso del proceso de corte simple, relaciona tensión tangencial y deformación angular en la misma forma de la respuesta armónica.

Todos estos trabajos, inicialmente, se aplicaron a suelos arenosos. Posteriormente, sin embargo, se han extendido a suelos arcillosos, con la colaboración de Manuel Pastor⁴⁰.

EL SUELO, COMO SEUDOSÓLIDO PARTICULADO

Todo cuanto acabamos de exponer se basa en una consideración macroscópica del suelo como un sólido verdadero. La última cita de Ángel Uriel Ortiz nos recuerda que es un seudosólido particulado, y esto nos retrotrae, a su vez a la discusión anteriormente aludida, sobre si en este caso es aplicable la mecánica clásica del continuo.

Otra posibilidad es representarlo como un cuerpo en el que el campo de vectores de tensión se encuentra completado por un campo de vectores de momento; es decir, un cuerpo tal como lo previó Voigt 1887, y lo estudió Cosserat 1909⁴¹.

Este nuevo modelo parece apropiado para los cuerpos que poseen una estructura interna, bien sea fibrosa, porosa, laminada, y también granular, ya que en estos últimos la interacción entre elementos adyacentes puede introducir momentos internos. El desarrollo de teorías del mismo continuo, capaces de describir materiales con una estructura de este tipo pasa por Truesdell y Toupin, Mindlin y Tiersten, Koiter, Eringen y Suhubi, Brown y Selvadurai⁴². La diferencia más significativa entre estas teorías, también llamadas micromórficas y la clásica, es que las ecuaciones constitutivas generalizadas contienen, además de las constantes de Lamé dos nuevas constantes elásticas, una de las cuáles puede expresarse en términos de un parámetro l del material, que

tiene las dimensiones de una longitud. Si tiende a cero, la teoría debe converger con la clásica.

Mientras Brown, en 1972, llega a la conclusión de que las diferencias entre estas teorías y las clásicas en términos cuantitativos prácticos, debe ser insignificante, Satake en 1968⁴³ había opinado diferentemente y Sevadurai, 1973, trabajaba sobre un método teórico regular del que deduce una influencia apreciable, cualitativamente coincidente con las anomalías detectadas por medidas reales. Pero Alcibiades Serrano y José M.^a Rodríguez Ortiz⁴⁴ por su parte, decidieron seguir el camino de construir matemáticamente un modelo que simule la estructura real. Así pues, enseñaron al ordenador a depositar aleatoriamente dentro del campo de la gravedad, y una a una las partículas de la composición granulométrica determinada. El seudosólido así formado se somete después a tensiones. Se pueden hacer así determinaciones sobre las orientaciones de los contactos, variación de los mismos durante procesos de carga y descarga, anisotropía del medio, observaciones sobre las orientaciones respectivas de los ejes principales de los incrementos de tensión y deformación, y otros puntos que, en todas las teorías o en ecuaciones constitutivas del continuo, se postulan a priori.

Inicialmente, las deformaciones y deslizamientos en los contactos se establecieron según un esquema simple de contacto hertziano para las fuerzas normales y, para los efectos de las tangenciales, las teorías de Mindlin y Deresiewicz (1953) y Naysa (1972), pero más tarde Serrano y Planas han efectuado un estudio profundo sobre la deformación, plastificación y rotura en los puntos de contacto entre dos esferas de material pétreo⁴⁵.

Estos trabajos han tenido un eco importante en el ámbito internacional, y el camino de esta manera iniciado ha sido el elegido por distintos investigadores extranjeros, entre los que, por su

⁴⁰ Pastor, M.: «Comportamiento de arcillas compactadas en procesos de carga cíclica sin drenaje». Tesis doctoral Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, dirigida por D. Ángel Uriel Ortiz, 1980.

⁴¹ Voigt, W.: «Theoretische Studien über die Elastizitätsverhältnisse der Kristalle». Abh. Ges. Wiss. Göttingen, 34, 1887.

Cosserat, E. y Cosserat, E.: «Théorie des corps déformables». París, Herman et Fils, 1909.

⁴² Truesdell, C. y Toupin, R. A.: «The classical field theories». Encyclopedia of Physics, III/1, Sections 200, 203, 205. Berlín, Springer, 1960.

Mindlin, R. y Tiersten, H. F.: «Effects of couple-stresses in linear elasticity». Archs. Ration. Mech. Analysis, 11: 415-448, 1962.

Koiter, W. T.: «Couple stresses in the theory of elasticity». Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschappen, Ser. B, 67: 17-44, 1964.

Brown, C. B. y Evans, R. J.: «On the application of couple-stress theories to granular media». Géotechnique, 22: 2: 355-361, 1972.

Selvadurai, A. P. S.: «Bending of an infinite beam resting on a porous elastic medium». Géotechnique, 23: 3: 407-421, 1973.

⁴³ Satake, M.: «Some considerations on the mechanics of granular materials». Proc. IUTAM Symp. generalized Cosserat cont. and continuum theory of dislocations with applications, p. 156. New York, Springer, 1968.

⁴⁴ Serrano, A. y Rodríguez Ortiz, J. M.: «A contribution to the mechanics of heterogeneous granular media». Symp. on the role of Plasticity in Soil Mech. Cambridge, pp. 215-226, 1973.

Serrano, A. y Rodríguez Ortiz, J. M.: «Force and displacement fields in heterogeneous granular media». Symp. on Numerical Meth. in Soil and Rock Mech. Karlsruhe, 1975.

Rodríguez Ortiz, J. M.: «Estudio del comportamiento de medios granulares heterogéneos mediante modelos discontinuos analógicos y matemáticos». Tesis doctoral dirigida por A. Serrano, Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1975.

⁴⁵ Planas Roselló, J.: «Estudio del comportamiento mecánico del contacto entre materiales pétreos». Tesis doctoral dirigida por A. Serrano, Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1977.

⁴⁶ Cundall, P. A. y Strack, O. D. L.: «A discrete numerical model for granular assemblies». Géotechnique, 29: 1: 47-65, 1979.

producción importante y reciente, se hace necesario citar a Cundall. Otros autores, en cambio, recurren a métodos experimentales con medios que simulan la constitución granular, como, por ejemplo, Chapuis y Soulié⁴⁶.

LA ANISOTROPÍA

Un importante rasgo al que ya hemos aludido, como comprobado en el trabajo de Serrano y Rodríguez Ortiz, se añade complicación al comportamiento del suelo, es la anisotropía, muchas veces inherente, debida a alternativas en la sedimentación y otras veces inducida, comenzando con la que proviene del efecto de la gravedad. Algunas consecuencias importantes de la anisotropía elástica han sido estudiadas por Pickering y posteriormente por Ángel Uriel Ortiz y Luis Cañizo⁴⁷. Estos últimos autores han hecho notar un interesante punto, relativo a la dilatancia. Una parte de ésta se debe, sin duda, a los cambios mutuos de posición de las partículas: es la dilatancia que llamaremos «de Reynolds», que necesita una aportación de energía, que, en gran parte, se disipa. O bien, si es negativa (o «contractancia»), un desprendimiento de la misma. Pero Ángel Uriel Ortiz y Luis Cañizo detallan los cambios de volumen que se producen en un sólido simplemente a causa de la anisotropía: es una «dilancia elástica», llamada así porque sus ecuaciones de deformación pueden expresarse como las de la elasticidad, aún cuando dichas deformaciones no sean enteramente reversibles ni la energía recibida pueda ser en su totalidad devuelta.

FACTORES FISICOQUÍMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ARCILLA

La interacción entre las partículas de una arena se rige como hemos visto, por principios bien establecidos de la mecánica de los sólidos, a pesar de lo cual, el intento de estudiar el conjunto como agrupación particulada conduce a grandes complicaciones, a través de las cuáles ha sido, hasta el momento, Cundall, el que ha conseguido llegar más lejos.

Las posibilidades actuales de seguir este camino en el caso de las arcillas son prácticamente nulas, y no por el número mucho mayor de partículas, ni por su forma de lámina o acicular, sino

por la importancia que en este caso toman los mucho más complejos fenómenos fisicoquímicos.

La primera cuestión sobre la que se ha polemizado durante largos años ha sido la de la naturaleza de los contactos: si estos se hacen por interacción de la capa doble, o bien si llega a haber un contacto verdadero de sólido con sólido.

La importancia de la influencia de la capa doble sobre la deformabilidad de las arcillas fue demostrada por José M.^a Serratos y por mí en 1953, experimentando con una misma arcilla, pero con distintos cationes de cambio, y, también amasada con líquidos orgánicos de distinto momento polar. En 1970⁴⁸ Martín Viñas y yo comprobamos dichas influencias, pero esta vez sobre la deformación y resistencia en el caso de esfuerzos tangenciales. Bolt, por su parte, en 1956⁴⁹ había llegado a obtener resultados que se ajustan cuantitativamente a la teoría, si bien lo hace con una montmorillonita seleccionada de forma que tenga un tamaño de grano muy uniforme.

Contrariamente experimentos sobre la reptación de arcillas sometidas a esfuerzos tangenciales no alejados de la rotura llevan a Mitchell, Campanella y Shing⁵⁰, mediante interpretaciones basadas en la «energía de activación» de Eyring, a concluir en una influencia considerable de los contactos sólidos. Ambos resultados no se oponen, sino que se complementan. Los primeros se hicieron con montmorillonita e, incluso, en el caso de Bolt, particularmente seleccionada, y es normal que muestren un comportamiento coloidal especialmente marcado, mientras que las arcillas de Mitchell, Campanella y Shing, unas de ellas illíticas y otras mezcladas (fango de la Bahía de S. Francisco), tienen un comportamiento menos activo.

El carácter coloidal de algunas arcillas, formadas por la acción de climas tropicales o semitropicales sobre materiales volcánicos, particularmente si las condiciones de drenaje son malas, puede conferirles propiedades especiales tales como tixotropía y consolidación secundaria, aparte de una gran compresibilidad, todo lo cual ocasiona problemas peculiares en los trabajos que se ejecutan sobre estos materiales, que llegan a tener tan poca relación con los suelos con los que normalmente tratamos. El ejemplo típico es el del Valle de México, pero tenemos otros terrenos comparables,

⁴⁷ Uriel Ortiz, A. y Cañizo, L.: «On the elastic anisotropy of Soil». *Géotechnique*, 21: 3: 262-267, 1971.

Uriel Ortiz, A.: Discusión sobre «Anisotropic elastic parameters for Soil». *Géotechnique*, 22: 3: 533-534, 1972.

⁴⁸ Jiménez Salas, J. A. y Serratos, J. M.: «Compressibility of clays». 3rd Int. Conf. ISSMFE, Zurich, 1: 192-198, 1953.

Jiménez Salas, J. A. «Quelques aspects fondamentaux de la déformabilité des sols». Journées du Comité Français de la Mec. des Sols, 91-110, París, 1971.

⁴⁹ Bolt, G. H.: «Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays». *Géotechnique*, 6: 86-93, 1956.

⁵⁰ Mitchell, J. K., Campanella, R. G. y Singh, A.: «Soil Creep as a Rate Process». *Journal of Soil Mech. and Found. Div. A. S. C. E.*, 94: SMI: 231-253, 1968.

⁵¹ González Vallejo, L. I., Jiménez Salas, J. A. y Leguey Jiménez, S.: «Engineering geology of the tropical volcanic soils of La Laguna, Tenerife». *Eng. Geology*, 17: 1/2: 1-17, 1981.

aunque con extensión más reducida, en La Laguna (Tenerife), los cuáles han sido estudiados por L. González Vallejo⁵¹.

LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Las presas constituidas por tierras apisonadas son una de las tareas de ingeniería hidráulica más antiguas. China y la India nos presentan ejemplos de la mayor antigüedad. En tiempos mucho más recientes, tenemos numerosos diques de encauzamiento y cajeros de canales, construidos en los dos siglos pasados, técnicamente equivalentes⁵².

En el primer tercio de este siglo este tipo de obra alcanzó mucha difusión, principalmente en el medio y lejano oeste americano, donde no era fácil proporcionarse los materiales necesarios para las presas de fábrica, generalmente construidas, en esa época, en Europa. Un número relativamente elevado de desastres indicó que las prácticas usuales no admitían la extrapolación a la que estaban siendo sometidas, y esta cuestión se constituyó en uno de los puntos de interés predominante de la naciente mecánica del suelo.

En determinados factores del problema, el éxito ha sido prácticamente total, y hoy es difícilmente aceptable la posibilidad de un deslizamiento de los taludes de una presa de este tipo. Sin embargo, hay otros aspectos que todavía han de ser objeto de investigación, como lo demuestran algunos acontecimientos recientes, entre los cuales, en que ha tenido mayor resonancia ha sido la rotura de la presa de Teton⁵³, tanto por la magnitud de la misma, como por el hecho de que estuviera proyectada y construida por el Bureau of Reclamation de los Estados Unidos; en la presunción de todos, el organismo más competente y con mayor experiencia en este tipo de obras entre todos los del mundo.

Los factores cuyo conocimiento parece todavía insuficiente son la fisuración de las zonas que han de asegurar la impermeabilidad, y la dispersividad de ciertos suelos.

La fisuración se puede producir por las tracciones que aparecen en ciertos puntos, a causa de las deformaciones propias de la presa. Un primer tratamiento empírico, iniciado por Sherard, fue recopilado en un estado del arte de Ventura Escario en 1966⁵⁴. Hoy

se procede a determinar las zonas traccionadas mediante cálculo en elementos finitos, tal como el efectuado para un análisis retrospectivo de las deformaciones de la presa de Venemo por Saura y Justo Alpañés⁵⁵.

La dificultad, cuando se trata de un análisis de esta clase, es la fijación de los parámetros de deformabilidad de los materiales, y de su resistencia cuando existen tracciones, región en la que los ensayos actualmente empleados dan una información escasa y dudosa sobre la forma, y aún la misma existencia, de la curva de resistencia intrínseca.

A llenar este vacío han acudido los ensayos diseñados y puestos a punto por Santiago Uriel Romero⁵⁶, algunos de los cuales se ejecutan en obra y a gran escala, pudiendo operar así con masas de arcilla tratadas con la maquinaria y en la misma forma en que van a serlo en la realidad constructiva.

LA PERMEABILIDAD Y LA DISPERSIVIDAD

La fisuración de un núcleo impermeable no es suficiente para producir la ruina de una presa, ya que existen en todas ellas dispositivos de filtro que deben conducir al autosellado de la grieta. Esto resulta difícil en ciertos materiales llamados dispersivos, cualidad que parece ligada a la granulometría de los suelos arcillosos y a la naturaleza de los cationes adsorvidos⁵⁷.

Ligada a estas propiedades y, en general, a todos estos problemas, está la permeabilidad, pero respecto a ésta, la geotécnica tiene una actividad tan sólo subsidiaria. En efecto, dentro de las ciencias del terreno la hidrogeología tiene una personalidad propia, independiente y con una historia que arranca antes del comienzo de la mecánica del suelo. No voy a adentrarme en ese campo, en el que tantas realizaciones han conseguido el Instituto Geológico y Minero, la Empresa Nacional Adaro, el Servicio Geológico de Obras Públicas, la Universidad de Barcelona, etc.

Sin embargo, la geotécnica tiene que ocuparse con frecuencia de cuestiones de esta clase, principalmente porque las circunstancias del agua freática influyen sobre el comportamiento geotécnico, y por ello citaré aquí algunas aportaciones al esquema general,

⁵² Collin, A.: «Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux». París, 1846. (Trad. inglesa, con planchas en facsímil, Un of Toronto Press, 1957).

⁵³ Seed, H. B.: «The Teton Dam Failure – A retrospective view». 10th Int. Conf. ISSMFE. Estocolmo, 4: 319-352, 1981.

⁵⁴ Escario, V.: «Estabilidad de presas de tierra y escollera». Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 1966.

⁵⁵ Justo, J. L. y Saura, J.: «Behaviour of Venemo Dam by Three-Dimensional FE». 10th Int. Conf. ISSMFE. Estocolmo, 3: 449-452, 1981.

⁵⁶ Uriel Romero, S., Bravo, G. y Pérez Rodríguez, J. R.: «In situ tests for control of cracking of the clay core of Canales Dam». 14.º Congreso Internacional de Grandes Presas. Río de Janeiro, 1982.

⁵⁷ Sherard, J. L., Decker, R. S. y Ryker, N. L.: «Piping in Earth Dams of Dispersive Clay» y «Hydraulic Fracturing in Low Dams of Dispersive Clay». Speciality Conf. Earth and Earth-supported Structures». A. S. C. E. Purdue Un. 1. 1: 589-626 y 1: 1: 653-690, 1972.

⁵⁸ Escario, V. y Uriel Romero, S.: «Determining the Coefficient of Consolidation and Horizontal Permeability by Radial Drainage». 5.ª Int. Conf. ISSMFE, París, 1: 83-87, 1961.

pero caracterizadas porque han tenido su nacimiento en la consideración de problemas de mecánica del suelo.

Tales son, por ejemplo el nuevo procedimiento para determinar la permeabilidad horizontal de arcillas, mediante ensayos con drenaje radial, de Escario y Uriel Romero⁵⁸, así como el de este último autor para hallar, en obra, la permeabilidad de una capa de lignito en función de las cargas aplicadas, hallando que se produce un intenso fenómeno de histéresis⁵⁹.

Dentro del campo de ensayos en obra, debemos citar también los efectuados por Escario⁶⁰ en San Sebastián, con utilización de medios de auscultación e interpretación originales y los de Uriel Romero y Ucero⁶¹, determinando la permeabilidad de una formación volcánica próxima al mar, mediante el estudio, con solución matemática original, de la propagación de la onda de marea.

En un terreno más teórico, el hoy catedrático de Matemáticas en la Escuela de Caminos de Santander, Castillo Rón, estableció durante su estancia en la Universidad del Northwestern (Ill.) las condiciones del flujo de agua de macizos diaclasados, mientras que Socías⁶² hacía el mismo estudio, experimentalmente, en modelos. Finalmente, hay que citar como una aportación fundamental la demostración formal deductiva de la ley de Darcy, obtenida por el hoy catedrático de la Escuela de Arquitectura de Sevilla, D. Jose Luis Justo Alpañés⁶³.

EFFECTOS SÍSMICOS SOBRE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Una gran presa, como son las de la Almendra o el Atazar, de hormigón, o bien la de Arenós, o de la Canales, hoy en construcción cerca de Granada, de escollera con núcleo impermeable de arcilla, es una de las tareas que contribuyen a elevar el techo científico y tecnológico, tanto por su magnitud y por la variedad de problemas que presenta, como por la enorme responsabilidad que entraña.

Hemos ido citando ya una serie de puntos que tienen aplicación a su proyecto, como son la permeabilidad, la dispersividad, fisuración y también los métodos de cálculo de rotura y deformaciones. Todos ellos se ponen a contribución para el proyecto de

una gran obra de esta clase, pero querría ahora insistir sobre un punto en el que los últimos años han sido escenario de importantes desarrollos: éste es el del comportamiento dinámico de las presas constituidas por materiales sueltos: tierra y escollera.

Algunos casos recientes han llamado la atención hacia su posible vulnerabilidad en caso de terremoto, lo que ha promovido los estudios del comportamiento de dichos materiales frente a las sollicitaciones cíclicas. Por supuesto que no es ésta la única clase de obra en la que esto tiene interés. Un gran número de los daños sísmicos sobre edificios se deben a la cimentación, citándose como muy típico el caso de Niigata en 1964. En el terremoto de Alaska, en el mismo año, los daños en las ciudades fueron pequeños (en parte por la escasez de éstas) frente a las destrucciones de vías de comunicación por corrimientos, lo que constituye otra notable manifestación de inestabilidad frente al sismo.

En cuanto a las presas de tierra, en este siglo, tan solo en Estados Unidos han fallado totalmente, debido a movimientos sísmicos, al menos cinco presas⁶⁴. La de Sheffield en 1915, Coleman en 1954, Rogers en 1964 y otras dos de propiedad privada en 1962 y 1964. Han sufrido daños importantes la de Hegben (1979) y las presas superior e inferior de San Fernando (1971).

En Japón se produjeron doce fallos de presas durante el terremoto de Ojika (1939), y diez durante Tokachi-Oki (1968), pero un número cuatro veces superior tuvo averías parciales.

OTROS PROBLEMAS RELATIVOS AL EFECTO SÍSMICO

Otro tipo de construcción en el que estos estudios tienen particular interés y dificultad lo constituyen las centrales nucleares. Muchas veces se piensa que la importancia que en ellas se da a la determinación del efecto sísmico vienen del peligro que puede suponer su destrucción. Esto en parte es así: pero al contrario que en una presa, donde nos basta saber que las deformaciones van a ser inferiores a un cierto valor aunque no llegemos a conocerlas, en una central nuclear hay que saber cuáles van a ser esas vibraciones, para poder calcular la respuesta de las instalaciones e ins-

⁵⁹ Jiménez Salas, J. A. y Uriel Romero, S.: «Some recent rock mechanics testing in Spain». 9.º Congreso Internacional de Grandes Presas. Edimburgo, 1967.

⁶⁰ Escario, V.: «Raft foundation in submerged sand in San Sebastián». 6th European Conference on Soil Mech. Viena, I 3/4: 217-224, 1976.

⁶¹ Uriel Romero, S. y Ucero Aoz, L.: «Coastal Soils Permeability Based on Tidal Damping» 10th Int. Conf. ISSMFE, 1: 499-502, 1981.

⁶² Castillo, E.: «Mathematical model for two dimensional percolation through fissured rock. ISRM. Stuttgart, Report T. 1, D: 1-7, 1972.

Krizek, R. J., Karadi, G. M. y Socías, E.: «Dispersion of a contaminant in fissured rock». En el mismo Simposio, Report T. 3, C: 1-15.

⁶³ Justo, J. L.: «A formal proof of Darcy's law in isotropic and anisotropic porous media». Lab. Transp. y Mecánica del Suelo, 1970.

⁶⁴ En la obra «Geotecnia y Cimientos», ed. Rueda, Madrid, 1980, tomo III, véase Soriano, A. Cap. 7. «Cimentaciones sometidas a efectos dinámicos», pp. 855-861 y Uriel Romero, S. Cap. 18, «Presas», pp. 1666-1685.

⁶⁵ Jiménez Salas, J. A. y Cuéllar, V.: «Problemas geotécnicos». Curso sobre Control de Calidad en la Construcción Civil de Centrales Nucleares. Universidad Politécnica de Madrid, 1: 7-23, 1978.

Gómez Massó, A. J.: «Soil Structure Interaction in an arbitrary seismic environment». Tesis doctoral dirigida por el Prof. John Lysmer, Un. de Texas, Austin, 1978.

trumentos contenidos y poder garantizar la seguridad del cierre en caso de emergencia. El problema, difícil en sí, se complica porque la rigidez, el tamaño y la posición, semienterrada, del edificio principal conduce a una interacción dinámica muy importante como complejidades de cálculo considerables⁶⁵.

La novedad de las técnicas implicadas y el oligopolio que las maneja, obligó a que, en un momento inicial hubiera que recurrir en este punto de la cimentación, como en los otros, a consultores y a universidades extranjeras; pero el substrato geotécnico era en nuestro país lo suficientemente potente y vital para rellenar pronto este hueco, y hoy varios grupos son capaces de efectuar esos estudios, habiendo comenzado ya a producirse algunas aportaciones originales.

Ambos problemas, pues, el de las presas y el de las centrales, han hecho que el estudio de los efectos cíclicos sobre el suelo hayan recibido durante los últimos años singular atención. Es preciso tener en cuenta, para ello, las modificaciones sucesivas de la estructura del suelo. Cada ciclo produce un arreglo o daño en la configuración del conjunto de partículas, que hay que introducir en las ecuaciones constitutivas de alguna manera.

LA TEORÍA ENDOCRÓNICA

El profesor de la Northwestern University (Illinois) Zdeněk P. Bazant⁶⁶ formuló en 1976, pensando en el hormigón, y siguiendo una idea de Valanis, aplicada a metales, una forma de ecuación constitutiva viscoplástica, con viscosidad dependiente de la velocidad de deformación. Esta ecuación se articula en la llamada teoría endocrónica continuada por Krizek, que fue extendida para suelos por Vicente Cuéllar, durante su estancia en dicha Universidad⁶⁷.

La teoría endocrónica consigue, en general, representar con gran exactitud las propiedades anelásticas observadas experimentalmente en ciertos materiales, especialmente en aquéllos en los que el mecanismo prevaleciente de la deformación plástica no es la ductilidad, sino la microfisuración o bien la modificación de la disposición de las partículas, tal como ocurre en el hormigón inicialmente estudiado por Bazant y en todos los materiales geológicos, tanto rocas como suelos.

El modelo matemático aplicable a estos materiales incorpora una variable, que tipifica a la teoría endocrónica y que recibe el

nombre de «tiempo intrínseco» o «índice de reestructuración», puesto que indica el grado de modificación de las estructuras adoptadas por las partículas durante la historia del suelo.

En el momento actual, esta teoría tiene su aplicación principal en el estudio del efecto sísmico sobre arenas poco densas, tema sobre el cual Rafael Blázquez⁶⁸, utilizando dicho modelo, junto con la teoría de Biot de los medios continuos de dos fases, ha llegado a construir un método racional de analizar la posibilidad de licuación.

ENSAYOS CÍCLICOS

El estudio del comportamiento dinámico de los suelos mediante éste o cualquier otro modelo teórico, implica una experimentación para determinar sus parámetros. Su metodología, en lo que se refiere a ensayos triaxiales cíclicos de suelos está siendo introducida en España por Manuel Pastor Pérez y Rafael Blázquez, a quienes ya hemos aludido con motivo de la respuesta armónica y la teoría endocrónica, adjudicándose Claudio Olalla la puesta a punto de la columna resonante diseñada por Hardin y perfeccionada por Drnevich⁶⁹.

LOS SUELOS SEMISATURADOS

El fenómeno de licuación, así como otros a los que nos venimos refiriendo, se producen casi siempre, o incluso, algunos de ellos, exclusivamente, en sistemas bifásicos formados por partículas sólidas con los poros rellenos de un fluido muy poco compresible. Un suelo saturado de agua responde a este esquema.

Sin embargo, las capas superiores a la corteza terrestre, en una fracción muy importante del área emergida, se encuentran semisaturadas. Aparece así un sistema trifásico, en el que las fuerzas de capilaridad y la comprensibilidad del fluido complican notablemente las reacciones del suelo. Éstas constituyen, pues, un importante campo abierto a la investigación, en el cual estamos llamados a participar, ya que cada nación, dentro del concierto científico internacional, debe al menos preocuparse de resolver aquellos problemas que se presentan en su territorio con mayor agudeza que en el resto de globo.

España está situada, a este respecto en el cinturón en el que las alternancias de estación húmeda y seca son muy marcadas y, en

⁶⁶ Bazant, Z. P. y Krizek, R. J.: «Endochronic constitutive law for liquefaction of sand». Journ. Eng. Mech. Div. A. S. C. E., 102: EM 2: 225-238, 1976.

⁶⁷ Cuéllar, V.: «Rearrangement Measure Theory Applied to Dynamic Behavior of Sand», 1974. Tesis doct. Northwestern Un. (111).

⁶⁸ Blázquez Martínez, R.: «Endochronic model for liquefaction of sand deposits as inelastic soil media», 1978. Tesis doctoral. Northwestern Un. (111).

Blázquez Martínez, R.: «Licuefacción de suelos». Bol. Inf. Lab. de Carreteras y Geotecnia, 143: 3-22; 145, 3-32, 1981.

⁶⁹ Drnevich, V. P., Hardin, B. O. y Shippy, D. J.: «Modulus and Damping of Soils by the Resonant – Column Method». Dynamic Geotechnical Testing. ASTM STP 654, pp. 91-125, 1978.

consecuencia el grado de saturación de las capas superficiales del terreno es muy variable. Unido esto a la naturaleza arcillosa de los sedimentos que cubren grandes áreas de nuestra nación, se produce uno de los fenómenos geotectónicos que, por diversas circunstancias, han aparecido con mas frecuencia en la prensa diaria: Las llamadas «arcillas expansivas». Éstas no son, como acabamos de decir unas arcillas especiales, sino la conjunción de un terreno arcilloso en una localización geográfica y climática determinada.

Numerosas han sido las manifestaciones de este tipo que se han producido en nuestro país. Pero, correlativamente no puede decirse que nos hayamos quedado atrás, respecto a otras naciones, en profundizar en el conocimiento, tanto científico como práctico, del fenómeno y de sus posibles remedios.

En el mundo empieza a tenerse conciencia de este problema en la década de los cuarenta, siendo la primera fórmula, totalmente empírica, sobre la manera de calcular las cimentaciones en estos terrenos, la sudafricana publicada por Rigby y Dekena 1951⁷⁰. No resulta por lo tanto, demasiado tardío el que nosotros comencemos a trabajar sobre este asunto en 1953⁷¹.

Por supuesto en Andalucía el fenómeno se había reconocido desde tiempos inmemoriales, y existían soluciones artesanas aunque no demasiado refinadas. Pero en la zona de terrenos terciarios de Madrid, las averías observadas se atribuían en cada caso a las causas más diversas, siendo las más aproximadas las de atribuir los fenómenos a la hidratación de anhídrita. Es el 1955 cuando presentamos al Congreso de Carreteras de Estambul⁷² un primer trabajo sobre identificación de este tipo de arcillas, y una fórmula que liga presiones e hinchamientos, que se adelanta al gráfico de Dawson publicado en 1959⁷³. En 1957, José M.^a Serratos y yo⁷⁴ presentamos en el Congreso de Mecánica del Suelo de Londres la primera fórmula en la que se tiene en cuenta de manera racional

la interacción entre la estructura y el suelo, la cual viene a justificar los resultados de las observaciones efectuadas por los sudafricanos. Un nuevo estudio sobre dicha interacción lo presentamos en el Congreso sobre este problema de las arcillas expansivas, celebrado en Tejas en 1965⁷⁵. Este camino ha sido posteriormente muy frecuentado, particularmente mediante la aplicación de métodos numéricos y ordenadores. Un interesante trabajo moderno que resume mucho de lo escrito hasta ahora, en el de J. T. Pidgeon⁷⁶; pero hay que decir que los resultados no se apartan mucho de nuestros resultados en 1965.

Otro frente de ataque más fundamental, sobre el mismo problema, es el de estudiar el hinchamiento en sí, en sus relaciones con los cambios de humedad y de tensiones. Aparte de la primera fórmula en 1955, se ha hecho un trabajo experimental muy importante, en particular mediante un aparato original de Ventura Escario⁷⁷, puesto a punto por este investigador con la colaboración de Jesús Sáez. Consiste en una combinación del conocido aparato de membrana semipermeable que permite inducir a voluntad un potencial capilar, incluso muy elevado, en una muestra de suelo, con un edómetro, que permite cargar la muestra y medir sus variaciones de volumen. Ha sido posible así, por primera vez, medir los hinchamientos bajo cualquier cambio simultáneo de potencial capilar y de tensión mecánica. Más recientemente, los mismos investigadores han realizado otro aparato todavía más avanzado, en el que se puede medir la resistencia de la muestra, igualmente con la misma flexibilidad en las condiciones de humedad y de esfuerzos⁷⁸.

El fenómeno de las arcillas expansivas, tan complejo por depender del terreno, el clima y circunstancias hidrológicas, debe estudiarse, además de todo lo anterior, en el campo. Por ello, se ha ido desarrollando una metodología original, con muchos deta-

⁷⁰ Rigby, C. A. y Dekena, D. J.: «Crack resistant housing». 30.^a Conf. anual de la British Inst. of Municipal Eng. South African District, 1951.

⁷¹ Jiménez Salas, J. A.: «Cimentaciones sobre arcillas expansivas». Rev. Arquitectura, 181-192, 1953.

⁷² Jiménez Salas, J. A., Serratos, J. M. y Sobreviela, M.: 10eme Cong. Ass. Int. Cong. Route Raport. 19 B. Estambul, 1955.

⁷³ Dawson, R. E.: «Modern practices used in the desing of foundations for structures on expansive soils». Quaterly Journ. of the Colorado School of Mines, 54: 4: 67-88, 1959.

⁷⁴ Jiménez Salas, J. A. y Serratos, J. M.: «Foundations on expansive clays». 4.º Congreso Internacional de la ISSMFE. Londres, 1: 424-428, 1957.

⁷⁵ Jiménez Salas, J. A.: «Calculation Methods of the stresses produced in swelling clays». I Conf. on Engineering effects of moisture changes in Soils. Texas A & M, 2: 330-344, 1965.

⁷⁶ Pidgeon, J. T.: «A comparison of existing methods for the design of stiffened raft foundations on expansive soils» y «The rational design of raft

foundations for houses on heaving soil» 7.º Congreso Regional Africano de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Accra, 1980, pp. 277-290 y 291-299, respectivamente.

⁷⁷ Escario, V.: «Swelling of soils in contact with water at a negative pressure». Int. Conf. on Expansive Clays, Texas A & M University, pp. 207-217, 1969.

Escario, V. y Sáez, J.: «Measurement of the properties of Swelling and Collapsing Soils under Controlled Suction». Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, pp. 195-199, 1973.

⁷⁸ Escario, V.: «Suction Controlled Penetration and Shear Tests» 4th Int. Conf. on Expansive Clays, Denver, 1980.

Escario, V.: «Ensayos de corte y penetración con succión controlada». Bol. Inf. Lab. de Carreteras y Geotecnia, 144: 3-14, 1981.

⁷⁹ Albareda, J. M., Jiménez Salas, J. A. y González Peña, J. M.: «Contribución al estudio del movimiento del agua del suelo por medidas de resistencia eléctrica». An. de Edafología, 12: 9-10, 1-23, 1953.

lles que no podemos describir aquí; pero sí diremos que una de las determinaciones que hay que efectuar es la del potencial capilar, y de su variación a lo largo del tiempo. Sobre esto, Albareda, Jiménez Salas y González Peña⁷⁹ publicaron ya en 1953 una investigación perfeccionando las células de materiales higroscópicos que el aquel momento estaban en uso y, más recientemente, Ventura Escario, con la colaboración de Jesús Sáez⁸⁰ ha ideado y construido otro aparato original más preciso. Con todo ello, se ha conseguido construir un cuerpo de doctrina sobre la forma de evitar los daños consecuentes a estos fenómeno, cuya efectividad ha sido comprobada en todos los sitios en los que se ha aplicado, como fueron varios poblados del Instituto de Colonización en la provincia de Málaga⁸¹, Mercase Villa, etc. El esfuerzo de investigación, con todo, continúa. De manera general podemos decir que se pudo establecer⁸², ya en los años 60, que el fenómeno, en España, tiene características diferentes de los que tiene en Sudáfrica y en Tejas, de donde provenían las publicaciones existentes en aquel momento. En estos lugares, es importante un fenómeno monótono e irreversible, debido a la alteración del equilibrio de humedad del terreno, producido por la presencia de la construcción. Esta alteración afecta a estratos de una profundidad del orden de las dimensiones en planta de ésta y los movimientos correspondientes son predominantemente verticales.

Ya en 1963, señalamos que, en Andalucía, con estaciones muy marcadas, el movimiento es predominantemente estacional, la profundidad activa es más reducida (2,5 metros es una cifra normal) y los movimientos horizontales tienen más importancia relativa, diferencia que es decisiva para las soluciones que pueden adoptarse. Posteriormente este tipo de comportamiento ha sido descrito en otros países, como, por ejemplo, en Israel.

Las posibilidades de hinchamiento no están limitadas con todo, a sólo las arcillas expansivas. Hemos citado antes la hidratación de la anhidrita, que fue invocada como causa de averías en ciertas zonas de Madrid, sin que esto parezca ser cierto. Sin embar-

go, sí parece comprobarse en una importante estructura en el valle del Ebro⁸³.

También la oxidación de las piritas, tan frecuentemente encontradas en las pizarras de la península, puede original hinchamientos, según se ha podido observar en otras partes del mundo. Este fenómeno ha sido estudiado por un grupo de trabajo dirigido por Ventura Escario y Enrique Dapena⁸⁴.

Un hecho curioso, que no creo que haya sido señalado por nadie más que por nosotros⁸⁵, es la variación de volumen de una arcilla semisaturada, con la temperatura, a humedad constante, debido a la acción sobre el potencial capilar y a la actividad de la capa doble. Cálculos teóricos nos llevaron a la convicción de que era de muy poca importancia, y comprobamos experimentalmente que el valor calculado correspondía aceptablemente con el medido.

CONSOLIDACIÓN DE SUELOS SEMISATURADOS

Los problemas, científicos y técnicos, que presentan los suelos semisaturados no se limitan a los de las arcillas expansivas. Ya se ha dicho que sus características de deformabilidad y resistencia son complejas, y pueden estudiarse con el aparato de Escario.

Pero debemos citar también ahora los estudios de J. R. Pérez Rodríguez⁸⁶ sobre la consolidación de arcillas semisaturadas, aportando datos sobre el polémico punto de si la fase gaseosa es o no continua, comprobando que lo es, prácticamente hasta la saturación total, aunque puede haber un porcentaje pequeño de burbujas aisladas, adheridas al sistema sólido. La permeabilidad al gas puede ser muy pequeña, lo cual hace que pueda producirse retraso en la deformación, de magnitud comparable, pero de curso, por supuesto, diferente, a los correspondientes a la expulsión del agua.

EL COLAPSO

En todas las propiedades que hemos venido describiendo, las partículas están relacionadas solamente por su presión de contacto o inter-

⁸⁰ Escario, V.: «A new method for in situ measurement of pore water tension». Int. Conf. Expansive clays. Texas A & M Un., 1969.

⁸¹ Jiménez Salas, J. A. y Marsal, R.: «Informe sobre las condiciones de cimentación de los nuevos poblados en los regadíos del Guadalhorce». Instituto Nacional de Colonización. No publicado, 1963.

⁸² Jiménez Salas, J. A.: Discusión en la sesión especial sobre «Expansive Soils and Moisture Movements in partly saturated Soils». 7th Int. Conf. ISSMFE, México, 3: 424, 1969.

⁸³ Serrano, A., Oteo, C., Dapena, E. y Viñas, J. M.: «Analysis of swelling Phenomena in a Gypsum Marl Formation», 10.º Cong. Int. de la ISSMFE, Estocolmo, 1: 779-784, 1981.

⁸⁴ Escario, V., Dapena, J. E., Muñoz, J. M. y Martín Viñas, J.: «Diversos aspectos de los fenómenos de oxidación de las piritas y su influencia en las obras de ingeniería». Simposio Nacional sobre Rocas Blandas, Madrid, 1: A-1, 1976.

Dapena, E., Escario, V. y Uriel, S.: «The weathering of shales formed in a reducing environment». 3rd Int. Cong. Ass. Eng. Geology, Madrid, 10: 114-120, 1978.

⁸⁵ Resultado descrito en el trabajo cuya referencia se da en la nota (74) a pie de página.

⁸⁶ Pérez Rodríguez, J. R.: «El proceso de consolidación unidimensional en medios homogéneos no saturados». Tesis doctoral dirigida por D. José A. Jiménez Salas. Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1979.

acciones fisicoquímicas débiles, y el resultado es que, aunque existan configuraciones inestables, el conjunto reacciona de una manera continua. Sin embargo, existen suelos que, o bien por una cementación, o bien por un estado particular de tensiones pueden ser asiento de fenómenos de carácter discontinuo. Dentro de éstos está el que llamamos «colapso»⁸⁷. El suelo colapsable típico es el «loess», que apenas es algo más que una curiosidad geológica en España.

El colapso, sin embargo, puede producirse en otros muchos materiales por una variación brusca de las presiones del fluido intersticial, como ocurre al inundar un suelo parcialmente saturado. Ventura Escario⁸⁸, con el aparato anteriormente mencionado, ha demostrado cómo este tipo de colapso puede también producirse de manera gradual, reduciendo progresivamente el valor absoluto de la succión del suelo, mediante ensayos con «arenas de miga» de Madrid poco compactadas. Siguiendo la misma técnica, el citado autor⁸⁹ en colaboración con Jesús Sáez ha efectuado ensayos con arcillas también de Madrid, en las que se ve claramente como el material pasa sucesivamente de un proceso de hinchamiento a otro de colapso, según se va reduciendo el valor absoluto de la succión. A. López Corral⁹⁰ ha efectuado posteriormente con las citadas «arenas de miga» un estudio muy detallado del fenómeno de colapso en el que se confirma cómo en determinadas circunstancias dichos materiales presentan esta propiedad y se valora su magnitud según los casos.

El fenómeno queda, en general limitado a rellenos, aún aquellos que son ya antiguos; pero puede haber circunstancias especiales. Por mi parte, estimo que un grave accidente sufrido hace algunos años durante la construcción del ferrocarril metropolitano se debió al estado colapsable de una masa de arena, debido a su vez a que, durante aproximadamente cincuenta años, había estado sometida a una filtración desde una acequia a una de las antiguas galerías o «viajes» de captación de agua que cruzaba por abajo.

Esto había producido algún arrastre de finos, dejando el resto del esqueleto con una estructura metaestable.

MODELO MATEMÁTICO DEL SUELO SEMISATURADO

Tanto el hinchamiento, como el colapso, son fenómenos que se presentan en los suelos semisaturados, como manifestaciones de un mismo origen: la evolución de una estructura fuerte, en la que juega el papel de soldadura entre las partículas la fuerza capilar en los meniscos del fluido en los contactos de las mismas.

Es posible, en consecuencia, un tratamiento unitario de ambos fenómenos, como experimentalmente han demostrado Matyas y Radakrishna⁹¹. Mas recientemente, se ha centrado en este punto el trabajo de un grupo en la Cátedra de Geotécnica de la Escuela de Caminos de Barcelona, que regenta D. Eduardo Alonso. El primer paso ha sido el desarrollo de un modelo teórico capaz de ser aplicado mediante el método de elementos finitos a problemas de deformación y consolidación unidimensional en suelos no saturados. Por primera vez se ha incluido en un modelo, mediante superficies de estado, el comportamiento conjunto de colapso e hinchamiento que presentan estos suelos al variar los estados de humedad y de tensión sobre los mismos. Este modelo se está aplicado en este momento al análisis de la construcción capa a capa de las obras de tierra, que utilizan típicamente materiales no saturados⁹².

LAS ROCAS COLAPSABLES

El colapso puede producirse igualmente en rocas muy porosas, como, por ejemplo, en Canarias, en ciertas rocas volcánicas vacuolares. Este fenómeno ha sido descrito por Santiago Uriel y Alcibiades Serrano⁹³ habiendo llegado a un criterio original sobre la resistencia de una roca en estas condiciones. Sobre el plano de Mohr, además de la curva clásica de resistencia intrínseca, puede dibujarse en estos casos, una segunda curva que limita la zona dentro de la cual no se produce el colapso. Si la traspasamos, no entraremos en rotura en el sentido clásico, pero sí se produce una destrucción de la estructura de la roca, que pasa a convertirse en

⁸⁷ Faraco, C.: «Sobre el colapso de los suelos yesosos españoles». Tesis doctoral dirigida por D. José A. Jiménez Salas. Escuela T. S. Ingenieros de Caminos, Madrid, 1970.

⁸⁸ Escario, V. y Sáez, J.: «Colapso gradual de los suelos producido por una disminución en la succión». 7th Int. Conf. ISSMFE, Moscú. Discusión a la Sección, 4, 1973.

⁸⁹ Escario, V. y Sáez, J.: «Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction». Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, pp. 195-200, 1973.

⁹⁰ López Corral, A.: «Fenómenos de colapso en las arenas del subsuelo de Madrid». Tesis doctoral dirigida por D. José A. Jiménez Salas. Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Madrid, 1977.

López Corral, A.: «Fenómenos de Colapso». Bol. Inf. Lab. Transporte y Mecánica del Suelo, 126: 3-18; 127: 25-38, 1979.

⁹¹ Matyas, E. L. y Radhakrishna, H. S.: «Volume change characteristics of partially saturated soils». Géotechnique, 18: 432-448, 1968.

⁹² Lloret, A. y Alonso, E. E.: «Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour». Géotechnique, 30. n.º 4, 449-477, 1980.

⁹³ Uriel Romero, S. y Serrano, A.: «Geotechnical properties of two collapsible Volcanic Soils of low bulk Density at the Site of two Dams in Canary Island». 8th Int. Conf. ISSMFE, Moscú, 4: 42: 257-264, 1973.

⁹⁴ Serrano, A.: «Aglomerados volcánicos en las Islas Canarias». Simp. Nacional sobre Rocas Blandas, 2: 47-53, Madrid, 1976.

un material granular, con una fuerte disminución de volumen, y aumento de la compresibilidad y de la permeabilidad.

A. Serrano, por otra parte, ha aplicado, modificándolas las teorías de Cambridge a estos materiales, consiguiendo un modelo teórico de su comportamiento en deformaciones⁹⁴.

LA MECÁNICA DE LAS ROCAS

Pasemos ahora a ver de una manera más general qué es lo que se ha hecho sobre los macizos rocosos. Éstos están constituidos por una matriz de roca y por un sistema de litoclasas.

Las matrices de roca, los contactos intergranulares y la microfisuración, con vistas a su relación con las propiedades mecánicas, han sido estudiados con singular brillantez por Modesto Montoto, catedrático de la Universidad de Oviedo⁹⁵.

La formación de las fisuras en una roca se rige, por otra parte, por el modelo de Griffith, al cual se le han hecho posteriormente numerosas correcciones para adaptarlo mejor a la realidad, una de las cuáles ha sido formulada por Santiago Uriel Romero⁹⁶.

Dicho modelo se basa en un concepto energético en el que se iguala la energía elástica consumida con la energía de superficie creada. Si esto es así, variando dicha energía de superficie por unidad de esta última modificaremos las condiciones de propagación de la fisura. Partiendo de una investigación sobre las causas de rotura de las puntas de elementos de escollera, llevada a cabo por Ventura Escario y Martín Viñas, este último investigador ha efectuado ensayos con rocas sumergidas en líquidos de distintas constantes dieléctricas; ha obtenido una concordancia aceptable con las previsiones teóricas. Parece haber efectos secundarios perturbadores, lo cual demuestra una vez más que la teoría de Griffith es en exceso simplificada.

Estos mismos resultados han sugerido a Martín Viñas una modificación a la teoría de la dilatación, actualmete utilizada para el estudio de la producción de seísmo⁹⁷. Se supone que la aparición de fisuras provoca dilatación de la masa de roca y disminu-

ción de presiones del fluido intersticial. Esto produce una compresión uniforme que contiene la rotura hasta que la llamada al fluido intersticial de las zonas circundantes anula dicha depresión.

Para Martín Viñas esta depresión no es significativa dado el nivel de tensiones en los focos de los terremotos. La propagación de las fisuras se produciría por la inundación y consecuente alteración de la energía corresponden a la unidad de superficie que se engendra.

Pero, en una mayoría de los casos, si excluimos las minas y túneles muy profundos, el comportamiento de un macizo rocoso se rige por el de sus discontinuidades. Éstas tienen una geometría en general rugosa y, a veces, están rellenas de arena o arcilla. Al ser sometidas a esfuerzos de deslizamiento experimentan con frecuencia dilatación. Esto influye decisivamente en las propiedades del macizo ya que una de las diferencias más importantes entre suelos y rocas es la carencia casi absoluta de huecos en estas últimas, por lo cual, la dilatación de la litoclasa tiene que traducirse en un movimiento del contorno, lo que no siempre resulta posible.

Sobre este asunto ha trabajado Santiago Uriel Romero⁹⁸, definiendo por primera vez los módulos de rigidez normal, tangencial y de dilatación de las litoclasas, efectuando algunos desarrollos teóricos sobre los mismos y, muy particularmente, introduciendo y perfeccionando los ensayos de la roca *in situ*, tanto de litoclasas como de la matriz. Efectúa por primera vez ensayos de roca con saturación bajo presión y, sobre la roca de la cimentación de la presa de Mequinenza, lleva a cabo, entre otros, dos ensayos de resistencia al esfuerzo cortante sobre probeta de 4 x 4 metros, que son, todavía hoy, las de mayor tamaño que se hayan ensayado en el mundo⁹⁹.

Alcibiades Serrano, por su parte, ha colaborado en los trabajos sobre la mecánica de litoclasa y, en particular, se ha concentrado sobre las leyes de resistencia intrínseca de una diaclasa limpia y cerrada, a partir de la geometría de la diaclasa y de la resistencia de la roca matriz¹⁰⁰.

⁹⁵ Montoto, M. y Esbert, R. M.: «Alteración de granitos: evolución de rocas blandas y degradación de propiedades geomecánicas». Simp. Nacional sobre Rocas Blandas, Madrid, 1: A-3, 1976.

Montoto, M.: «Fabric and texture of rock materials in relation to their engineering properties». Panel discussion, Section II. 3rd Int. Cong. Ass. Eng. Geology. Madrid, 10: 79-92, 1978.

⁹⁶ Uriel Romero, S. y Bravo, B.: «Brittle and plastic failure of rocks». Rap. 3-20. II Congreso Internacional de Mecánica de las Rocas. Belgrado, 1970.

⁹⁷ Martín Viñas, J.: «Mecanismo fisicoquímico para explicar el desarrollo de los terremotos según la teoría de la dilatación-difusión». Bol. Inf. Lab. Carr. y Geotecnia, 147, 1981.

⁹⁸ Uriel Romero, S. y Serrano, A.: «Propiedades tenso-deformacionales de las diaclasas». Rap. E.5.26. I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica, Madrid, 1971.

⁹⁹ Ver nota (59) a pie de página.

¹⁰⁰ Serrano, A.: Discusión en la sesión I. Simposio sobre Uso Industrial del Subsuelo. Madrid, 1981, vol. 2.

¹⁰¹ Serrano, A. y Castillo, E.: «A New Concept about the Stability of Rock Masses». 3rd Int. Conf. on Rock Mechanics, 10 A: 820-821, Denver, 1974.

Se ha ocupado también de las leyes de distribución espacial de estos accidentes de la roca, y colaborando con Enrique Castillo, estableció un método para el cálculo de la probabilidad de desprendimientos en un talud rocoso, en función del tamaño del bloque posiblemente desprendido¹⁰¹.

Este estudio está relacionado con otro fenómeno de inestabilidad de taludes rocosos, que es el vuelco de estratos, cuando éstos están subverticales, con inclinación hacia el exterior. Demostramos que, con diaclasas limpias y cerradas, este vuelco puede prácticamente producirse tan sólo si se desprende un bloque anómalo, cuya probabilidad puede inferirse mediante el método del párrafo anterior. El concepto de «bloque clave», recientemente expresado por Goodman para diversos tipos de inestabilidad, coincide con lo dicho¹⁰². La mayor parte de los vuelcos de estratos observados, muchas veces con caracteres de fenómeno lento o reptación, tienen su origen en variaciones de volumen de la arcilla de relleno de las diaclasas, o bien de la expansión del agua infiltrada, en caso de helada, o quizá, incluso, a variaciones de volumen de la misma roca.

LAS ZONAS DE CIZALLAMIENTO

A mayor escala que las litoclasas, encontramos en los macizos rocosos zonas enteras de cizallamiento. Éstas tienen una importancia notable en las pizarras silurianas, donde, además, la roca cizallada sufre un proceso diagenético de transformación en una arcilla de propiedades geotécnicas peligrosas. Sanz Saracho¹⁰³ efectuó un estudio basándose sobre varios de estos accidentes tectónicos, encontrados durante la construcción de varias presas españolas. En él ya señala la influencia de las piritas en la facilidad de la descomposición de las pizarra.

ALTERACIÓN DE LAS ROCAS

La meteorización de las rocas es, sin duda, un factor a tener en cuenta, y todavía más que en las pizarras silurianas, en determinadas formaciones, como, por ejemplo, las «cayuelas», o esquistos cretácicos del norte de España, en donde es frecuente que un talud que ha sido necesario excavar con explosivos, sufra un deslizamiento pocos meses después, convertido en una masa de arci-

lla. Enrique Dapena¹⁰⁴ ha efectuado estudios sobre este fenómeno, comenzando por definir un procedimiento que permitiera cuantificar el grado de alteración por transformación de los minerales, y el grado de alteración por microfisuración a partir del estudio de láminas delgadas, así como mediante el análisis por difracción de rayos X y determinación de la absorción, utilizando, además, el microscopio electrónico de barrido y la microsonda, así como el microscopio de transmisión, para determinar las alteraciones que se habían producido en la composición química y morfológica de los minerales, buscando correlaciones entre los grados de alteración así definidos y las propiedades físicas y mecánicas, en pizarras y en granitos.

Otro factor a tener muy en cuenta en la alteración de ciertas rocas es la presencia de bacterias¹⁰⁵. Éstas han resultado ser las responsables de algunos fenómenos perjudiciales en esquistos y pizarras con algún contenido en compuestos de azufre. Se comprobó su presencia en las zonas de cizallamiento estudiadas por Sanz Saracho, en particular en el embalse del Atazar, pero posteriormente Ventura Escario se ha ocupado de este problema con motivo de la construcción de la autopista Vasco-Aragonesa y José M^a. Muñoz las ha identificado en las cayuelas más fácilmente descomponibles del norte de España, así como en Galicia, en pizarras, como responsables de una profunda acidificación del terreno que, al transmitirse al agua freática circulante, amenazaba con roer el hormigón de los cimientos de una gran estructura.

EL TERRENO, COMO CONJUNTO ALEATORIO

La variedad de los fenómenos de alteración, junto con los de diagénesis, y los complejos procesos de arrastre y sedimentación son causa de la extensa variabilidad de los materiales constitutivos del terreno y también de su distribución. Las reacciones de éste dependen tanto de las propiedades de dichos materiales, como de sus proporciones relativas, y de todos los detalles de cómo estén dispuestos.

Dos caminos se nos abren para llegar a nuestro objetivo: el primero, es llegar a conocer con detalle suficiente los materiales y su disposición. Tarea difícil, ya que no contamos, en general, más

¹⁰² Goodman, R. E. y Gen-Hua-Shi: «Geology and Rock Stability; Application of a «Key-block» Concept for Rock Slopes». 3rd. Int. Conf. on Stability in Surface Mining, Vancouver, 1981.

¹⁰³ Sanz Saracho, J. M.: «De las superficies de cizallamiento en las pizarras silurianas». Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1970.

¹⁰⁴ Dapena García, J. E. y Uriel Romero, S.: «Determinación de la meteorabilidad de las rocas». Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia, 142: 3-34, 1980.

¹⁰⁵ Ver nota (84) a pie de página.

que con informaciones lineales, mediante sondeos, o imágenes excesivamente globales, proporcionadas por la geofísica.

El segundo camino es el de hacer ensayos que afecten a una masa suficientemente grande para que integre todos los factores de variabilidad, en forma parecida a como pueda hacerlo la obra que pensemos construir.

Ambos caminos son mucho menos independientes de lo que puede parecer. En el primero, no podremos conocer con exactitud todos los detalles del terreno. De alguna manera deberemos asegurarnos que el conocimiento que de él obtengamos es suficiente para que la integral que necesitemos efectuar en cada caso tenga una fiabilidad suficiente. En el segundo, debemos de alguna manera decidir el tamaño necesario del ensayo, y, aún después de eso, estimar igualmente la fiabilidad del resultado para ser aplicado a otro lugar del mismo terreno, para lo cual será necesaria alguna información de detalle sobre la naturaleza y distribución de los materiales.

EL MODELO GEOTÉCNICO Y EL MODELO GEOLÓGICO

La finalidad, en uno o en otro caso es el establecimiento de un «modelo geotécnico», en el que sistematiza el conocimiento del terreno en un número manejable de datos, en los que no deben faltar los estimadores de su fiabilidad estadística.

La construcción de este modelo es uno de los pasos cruciales del quehacer geotécnico. Para ello, es esencial el conocimiento geológico de la formación y de su estratigrafía, que es lo que puede dar un sentido al disperso conjunto de datos. Así pues, el paso previo es el «modelo geológico».

Ximénez de Embún¹⁰⁶ describe este proceso en el que el examen previo de los datos paleontológicos y litológicos conduce a la identificación de «complejos litofaciales», de acuerdo con las definiciones de Matula et al. y de Rat et al.¹⁰⁷ que agrupan un número mínimo de facies de origen genético simple (sedimentación terrestre o marina, etc.) y de la misma edad geológica.

El modelo geotécnico tiene que llegar, en general, a mayor detalle y, particularmente, avanzar en el conocimiento del comportamiento del terreno frente a las sollicitaciones a las que va a ser sometido.

El paso de uno a otro modelo —continúa Ximénez de Embún—, se hace mediante una decisión respecto a las «masas geotécnicas homogéneas», que se obtienen mediante reagrupamiento o subdivisión de las «masas geológicas homogéneas». Que esto es así se ve muy claramente comparando diversos cortes geológicos y geotécnicos, siendo muy importante hacer notar que en este juicio geotécnico interviene ya, de manera esencial, las características de la obra que se piensa construir; de donde, que un mismo modelo geológico pueda dar nacimiento a varios modelos geotécnicos, si sobre una misma formación unos intentan construir, por ejemplo, una central nuclear y otros una carretera.

Como modelos geotécnicos construidos según distintos procesos cita el mismo autor el del Corredor de Levante¹⁰⁸ como ejemplo de agrupamiento de estratos geológicamente distintos y el del delta de Llobregat¹⁰⁹ como de su división y al mismo tiempo de agrupamiento, ya que la distinción clara de las distintas terrazas es a menudo poco útil geotécnicamente en este caso, y en cambio resulta decisiva la existencia de la capa limo-arcillosa intermedia, simple variación del conjunto deltaico, pero que condiciona la estructura hidrogeológica del delta y el tipo de cimentación a utilizar en muchos casos.

Entre estos modelos geotécnicos hay que citar, por haber sido establecido con caracteres especiales de extensión, generalidad y detalle, el de los suelos de Madrid¹¹⁰ elaborado por Ventura Escario resumiendo gran cúmulo de datos de orígenes diversos, entre los que figuran muchos procedentes de la ejecución de túneles del f.c. subterráneo, según trabajos citados en la nota 20 de pie de página.

En el citado modelo figuran datos concretos sobre los parámetros que definen el comportamiento mecánico del terreno. A esta información hay que añadir unos datos obtenidos posteriormen-

¹⁰⁶ Ximénez de Embun, J.: «Aplicaciones de la Estadística al reconocimiento del terreno. El cálculo de asientos diferenciales a partir de los ensayos de penetración» Tesis doctoral dirigida por D. Manuel Romana, Escuela T. S. Ingenieros de Caminos, Madrid, 1977.

¹⁰⁷ Matula, M., Radbruch, D. H. y Dearman, W. R.: «Report on the Second Meeting of the I. A. E. G. Working Group on Engineering. Geological Mapping». Bulletin AIGI, 14-17, 1971.

Rat, M. y Sanjeouand, R.: «Les Problèmes de la Correspondance entre les Ensembles Géologiques et Géotechniques». Journées Nationales Géotechniques B. R. G. M. Orleans, La Source, 1975.

¹⁰⁸ Dirección General de Carreteras, MOP: «Estudio preliminar de terrenos. Corredor de Levante». «Tramo Quintanar del Rey, Venta del Moro y Tramo Requena-Cheste». Servicio de Publicaciones del M. O. P., Madrid, 1972.

¹⁰⁹ Servicio Geológico de Obras Públicas y Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental: «Estudio de los Recursos Hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besós y Llobregat». 1.er Informe, Barcelona, 1964.

¹¹⁰ Escario, V.: «Los Suelos de Madrid». Lab. Transp. y Mecánica del Suelo. Publ. 25, 1970.

¹¹¹ Escario, V.: «The Soils of Madrid, and the deformability of the «tosco» determined by the settlement of a tall building». 3rd. Int. Cong. Int. Ass. Eng. Geology. Madrid, 3: 2: 251-259, 1978.

te, que tienen la mayor importancia, por proceder de uno de esos ensayos a gran tamaño, que integra las propiedades de una masa de un volumen equivalente al afectado por un problema real. En efecto, se trata de los asientos medidos, durante y después de la construcción de un gran edificio¹¹¹, y corresponden, en consecuencia, ellos mismos a un caso real.

PAPEL DE LA GEOESTADÍSTICA

Como antes hemos dicho, un ensayo a escala real no puede prescindir, sin embargo, para su interpretación de un estudio paralelo sobre la variabilidad del terreno. Ximénez de Embún, en el lugar antes citado, dice que «surge la necesidad de confeccionar un modelo de terreno más avanzado que el de tipo geológico o geotécnico, que sea de tipo matemático o más precisamente estadístico». Pero pienso que, más bien, debemos decir que un modelo geotécnico no merece el nombre de tal mas que sí, de manera más o menos explícita, no contiene una información estadística suficiente sobre la fiabilidad de sus datos. Es cierto que este concepto de información estadística suficiente encierra gran complejidad, y precisa, para ser concretado, la definición del objetivo técnico buscado, ya que es necesario un análisis de la sensibilidad de los resultados a las oscilaciones de las variables.

La geotécnica ha podido hacer uso en esta ocasión de un cuerpo de doctrina ya establecido en el campo de la minería: la geoestadística, según el término acuñado por Matheron¹¹² para el estudio de modelos del tipo de funciones estocásticas aplicadas a problemas específicos de minería, campo en el cual encontramos que existen también aportaciones españolas en cuyo análisis no vamos a entrar¹¹³.

Pero, en las aplicaciones particulares del tema que nos ocupa, aparte del trabajo citado de Ximénez de Embún, existe un grupo en la Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona, que dedica a este asunto una profunda atención, dirigido por el catedrático de Geotécnica, D. Eduardo Alonso¹¹⁴.

Con el objeto último de definir con más propiedad los conceptos de seguridad y riesgo y proporcionar en adecuado control, han trabajado en la aplicación y adaptación de conceptos y métodos probabilistas a la geotécnica. El primer paso fue la definición de la aleatoriedad de las propiedades del terreno mediante la utilización de funciones aleatorias, que reconocen la correlación espacial existente entre propiedades. Con anterioridad, las descripciones del terreno utilizadas en un intento de cuantificar la heterogeneidad observada en suelos naturales o artificiales, se habían basado en el uso directo de las variables aleatorias. Las limitaciones y errores considerables a que conduce esta descripción se han señalado en numerosas ocasiones.

A partir de esta descripción aleatoria de propiedades se han resuelto una serie de problemas y situaciones típicas en geotécnica con objeto de valorar el efecto de la heterogeneidad del terreno y profundizar (buscando aspectos no accesibles a formulaciones deterministas) en su conocimiento. Así, se ha analizado el efecto de la variación aleatoria de la permeabilidad del terreno en problemas de consolidación y de su deformabilidad variable en los complejos problemas de interacciones suelo-estructura. Con cierto detalle se ha estudiado también el problema de la estabilidad de taludes procurando cuantificar todas las causas de incertidumbre presentes, desde las asociadas a las propiedades del terreno y de desconocida evolución de niveles piezométricos hasta la imputables a la propia geometría del talud.

Éstos y otros trabajos han permitido llevar a cabo una crítica de los habituales métodos de controlar el riesgo en geotécnica (factores de seguridad) y proponen alternativas más racionales. Es incluso posible proceder desde un principio global de optimización del proyecto a una definición del mismo que tenga en cuenta, ya desde las primeras etapas del reconocimiento, la incertidumbre de propiedades típica de los depósitos naturales.

¹¹² Matheron, G.: «Traité de Géostatistique Appliquée». Technip, París, 1962.

Matheron, G.: «Les Variables Regionalisées et leur estimation». Masson, París, 1965.

Krige, D. G.: «The role of Mathematical Statistics in Improved Ore Evaluation Techniques in South African Gold Mines». «Tropics in Mathematical Geology». Eng. Consultants Bureau, New York, 1970.

Agterberg, F. P.: Geomathematics, Elsevier, Amsterdam, 1974.

Jöreskog, K. G., Glovan, J. E. y Reyment, R. A.: Geological factor analysis, Elsevier, Amsterdam, 1976.

¹¹³ Marco, A. y Alfaro, S.: «Curso práctico de Geoestadística». Fundación Gómez Pardo, Escuela T. S. de Ingenieros de Minas, Madrid, 1974.

¹¹⁴ Alonso, E. y Krizek, R. J.: «Randomness of Settlement Rate under Stochastic Load». Journ. Eng. Mech. Div. ASCE 100: EM 6: 1211-1226.

Alonso, E. y Krizek, R. J.: «Stochastic Formulation of Soil Properties». 2.ª Conf. Int. sobre Aplicaciones de la Estadística y Probabilidad de la Ingeniería de Suelos y Estructuras. Aquisgrán, 1975, pp. 9-32.

Alonso, E.: «Risk Analysis of Slopes and its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays». Géotechnique, 26: 3: 453-472, 1976.

Alonso, E.: «Enfoque probabilista del proyecto geotécnico». Bol. Inf. Lab. Transporte y Mecánica del Suelo, 135: 15-37; 136: 27-49 1979.

Krizek, R. J. y Alonso, E.: «Behavior of beams on randomly non homogeneous bases». 1974, Trans. Research. Record, 510: 77-91.

Lloret, A., Alonso, E. y Santos, J.: «La fiabilidad de los análisis de interacción suelo-estructura». Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia, 145: 33-49, 1981.

LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN TERRENOS NATURALES

Uno de los problemas más importantes y típicos de la geotécnica, al cual ya hemos hecho varias referencias, es el de la estabilidad de taludes en terrenos naturales, y es, por otra parte uno en el que la necesidad de introducir un tratamiento estadístico ha resultado más claro.

Es evidente que, para una determinación cuantitativa, deberíamos conocer la disposición de los materiales, de sus estratos y también de sus eventuales diaclasas o estructuras inducidas o relictas. Son muchas veces éstas, como tanto el cálculo como la experiencia demuestran, quienes deciden la estabilidad del conjunto, el cual puede deslizar a lo largo de alguna fisura o estrato de tan sólo milímetros de potencia.

Si pudiésemos conocer con exactitud todos los datos del terreno, los métodos de cálculo hoy existentes son de una notable precisión, comprobada reiteradamente, en construcciones reales, mediante instrumentación muy refinada.

LOS MÉTODOS DETERMINISTAS. EL MÉTODO VARIACIONAL DE CASTILLO Y COLABORADORES

Entre estos métodos, hemos citado ya la aplicación del de las características, por Santiago Uriel Romero. Hoy, sin embargo, sabemos que un estado de equilibrio estático así definido es tan sólo una cota inferior, pudiendo determinarse otra cota, ésta superior, mediante el método cinemático. La casi totalidad de los procedimientos empleados hoy para el uso práctico común, pertenecen a este tipo, debido a la facilidad de adaptación a los detalles de la estratigrafía del terreno, y también a la sencillez con la que pueden llevarse a cabo con la ayuda del ordenador. No podemos olvidar, sin embargo, que no representan más que una aproximación del lado de la inseguridad, sin que tengamos medio de saber la distancia que nos separa de la solución verdadera, aún cuando la experiencia nos diga que debe de ser pequeña.

Son muchos los métodos publicados de esta clase, buscando, en estos últimos años, la mejor disposición para el tratamiento en

ordenador. Una síntesis y análisis crítico de todos ellos fue efectuada por V. Escario¹¹⁵, quien también ha llevado a cabo otras contribuciones valiosas señalando las incoherencias y defectos de algunos de ellos cuando se les pretende aplicar en determinadas circunstancias¹¹⁶. Posteriormente Antonio Soriano¹¹⁷ ha publicado un nuevo análisis en el que examina el origen de los errores observados a la luz de la compatibilidad de las hipótesis simplificatorias que cada uno de dichos métodos postula, con el cumplimiento del conjunto de ecuaciones del equilibrio estático.

Dentro de estos métodos que podemos llamar clásicos, las aplicaciones españolas a casos reales de interés son muy numerosas, y no resulta posible citarlas aquí. Tan sólo con carácter de muestra aleatoria nombraré el trabajo de F. Beyana Picón y R. Modroño Allende¹¹⁸ sobre un fenómeno de inestabilidad en Aranda, otro de J. M. Angoloti¹¹⁹ de un carácter más general sobre corrimientos en masas con estratos paralelos al talud, por pandeo de los mismos, y otro de L. Fort¹²⁰ sobre la influencia de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes.

Mención especial merece, por la magnitud del fenómeno estudiado y por la hipótesis original que se formula sobre las causas de uno de sus aspectos, el análisis de uno de los mayores deslizamientos de los tiempos modernos. En el año 1963 el monte Toc, en los Alpes italianos, abatió sobre el embalse de Vaiont una masa de 200.000.000 de m³ de roca y tierras. El desbordamiento del agua inundó el poblado de Longarone ocasionando más de 2.000 víctimas. Uno de los aspectos que asombró a los técnicos fue la gran velocidad del deslizamiento, unos 100 km/h. Santiago Uriel Romero y R. Molina¹²¹, efectuaron un estudio termodinámico del fenómeno, y demostraron que gran parte de la energía liberada se disipó en la fricción de una zona de roca de pequeña potencia. El consecuente calentamiento produjo una elevación de la temperatura del agua intersticial, suficiente para aumentar su presión hasta igualar el peso de la gran masa rocosa que había por encima. En tal circunstancia dejó de existir la fricción, y la energía potencial se transformó casi íntegramente en aceleración. Los datos del estu-

¹¹⁵ Ver nota (54) a pie de página.

¹¹⁶ Escario, V.: «Errors arising from the simplified method of slices». 5th Int. Conf. ISSMFE, París, 2: 585-589. Discusión a la Sección 6 del mismo Congreso, 3: 358-359, 1961.

¹¹⁷ Soriano, A.: «Iterative Schemes for Slope Stability Analysis». Int. Conf. on Numerical Methods in Geotech, Eng. Blacksburg, Virginia, 1976.

¹¹⁸ Berganza Picón, F., Modroño Allende, R.: «The instability phenomenon of the banks of the river Duero in its passage through Aranda (Burgos) in tertiary soils». 3rd Int. Cong. Ass. of Eng. Geology, I: 1: 184-196, 1978.

¹¹⁹ Angoloti, J. M.: «Glissements en alternances avec stratification parallele au versant». 3rd Int. Cong. Ass. of Eng. Geology I: 1: 159-165, 1978.

¹²⁰ Fort, L.: «Modelo para el estudio de la acción de la vegetación sobre las características resistentes del terreno; aspecto estabilizador de los taludes». Tesis doctoral Escuela. T. S. Ingenieros Agrónomos, 1975.

¹²¹ Uriel Romero, S. y Molina, R.: «Cinematics aspects of Vaiont slide». 3.er Congreso Internacional de Mecánica de las Rocas, Denver, 1974.

dio teórico, coinciden sensiblemente con las observaciones reales del corrimiento.

Todos estos trabajos, sin embargo, constituyen aplicaciones del método cinemático, hoy plenamente establecido, sin introducir modificaciones en su esquema general.

Pero, desde hace poco más de una década se ha iniciado un nuevo camino, en el cual la aportación española ha sido importante. Consiste en el empleo del cálculo de variaciones. En los primeros intentos publicados por autores extranjeros, éstos no se han ocupado desgraciadamente, de examinar rigurosamente las condiciones suficientes para su validez, ni tampoco han sido consideradas previamente todas las condiciones necesarias. Esto puede afirmarse de los trabajos publicados por Baker y Garber y por Chen¹²².

En la Universidad de Santander, y bajo la dirección de Enrique Castillo Rón, este investigador con J. Revilla y, posteriormente, Alberto Luceño han dado una nueva solución y han hecho un riguroso análisis de los funcionales planteados, demostrando que los métodos anteriormente citados son incorrectos, debido al hecho de que el funcional que debe ser minimizado no tiene cota inferior o la tiene trivial careciendo en todo caso de significado físico real.

Sin embargo, la solución de Castillo y Revilla¹²³ satisface un conjunto de condiciones suficientes para la existencia de mínimo absoluto del funcional planteado en el caso de terreno puramente cohesivo, mientras que la aportación de Luceño consiste en obtener analíticamente la solución general de la ecuación de Euler para el caso de ángulo de rozamiento no nulo, lo que permite definir una familia uniparamétrica de extremales que contiene la solución propuesta.

Proponen, por otra parte, los teoremas de límite como método de definición de funcionales de seguridad o de cargas aplicadas. Esto proporciona la ventaja de que, cuando se satisfacen las condiciones de aplicación de dichos teoremas, es suficiente analizar la primera variación del funcional planteado puesto que exis-

te cota inferior (en el caso de aplicación del teorema de la cota superior) o cota superior (en el caso de aplicación del teorema de la cota inferior) de dicho funcional en virtud del teorema.

En particular, se define un funcional cociente de seguridad, basado en el teorema de la cota superior, se estudia la anulación de la primera variación a través de un funcional auxiliar que pierda la forma de cociente y se obtiene así un sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas que permite calcular el coeficiente de seguridad del talud y el campo de velocidades asociado, de acuerdo con el método.

Éste puede ser aplicado a todo tipo de problemas de estabilidad en mecánica del suelo, puede ser utilizado a partir del teorema de la cota superior o del de la cota inferior y además permite utilizar campos de velocidades o de tensiones con la configuración que se desee.

LA ESTABILIDAD DE TALUDES, COMO PROBLEMA ESTADÍSTICO

La estabilidad de taludes, como acabamos de ver, es algo que ha llegado a ser calculable en términos tan precisos como pueda serlo cualquier otra estructura. Esto es cierto y se comprueba con toda certeza en casos determinados, como, por ejemplo, en las presas de tierra. Son éstas estructuras fabricadas en las que conocemos, punto por punto, los materiales que las componen, y en donde las circunstancias hidrológicas también tienen sus condiciones de contorno perfectamente definidas.

Pero en el mayor número de taludes esto no ocurre así: se trata de terrenos naturales cuya constitución se conoce tan sólo a través de un modelo geotécnico conjetural. Éste puede contener errores graves, ya que, como hemos dicho, pequeños detalles pueden suponer un gran cambio en la estabilidad del talud. Las circunstancias hidrológicas, mal conocidas, dependientes de la meteorología y frecuentemente evolutivas, añaden otro decisivo factor de incertidumbre.

¹²² Baker, R. y Garber, M.: «Variational approach to Slope Stability». 9th Int. Conf. ISSMFE. Tokyo, 2: 9-12, 1977.

Chen, W. F.: «Limit analysis and Soil Plasticity». Elsevier, 1975 (apartado 9.5).

¹²³ Castillo, E. y Revilla, J.: «El cálculo de variaciones y la estabilidad de taludes». Bol. Inf. Lab. Transporte, 108: 31-37, 1975.

Castillo, E. y Revilla, J.: «Una aplicación del cálculo de variaciones a la estabilidad de taludes». Bol. Inf. Lab. Transporte, 175: 3-23, 1976.

Castillo, E. y Revilla, J.: «The Calculus of Variations and the Stability of Slopes». 9th Int. Conf. ISSMFE, Tokyo, 2: 25-30, 1977.

Revilla, J. y Castillo, E.: «The Calculus of Variations applied to Stability of Slopes». Géotechnique, 29: 1: 1-11, 1977.

Castillo, E. y Luceño, A.: «One application of the Calculus of Variations to Bearing Capacity of Foundations». 2nd Int. Conf. App. Num. Modelling, 3: 12: 1-11, 1978.

Luceño, A. y Castillo, E.: «Análisis crítico de los métodos variacionales aplicados a la estabilidad de taludes». Bol. Inf. Lab. Carreteras y Geotecnia, 139: 3-14, 1980.

Todo esto tiene como consecuencia que, apartando las estructuras «fabricadas», como son las presas, la determinación de la estabilidad de los taludes sea hoy, a pesar de la precisión de los métodos de cálculo, tarea conjetural, y no es fácil encontrar obra extensa, tal como un canal o una autopista, que no encuentre algún problema de inestabilidad durante la construcción o después de ella.

El método de ataque, pues, toma un aspecto diferente, en el que el propio algoritmo de cálculo pierde importancia relativa frente a la estimación de los datos de partida. Los medios actuales, y aun los futuros en un plazo medio previsible, no son capaces de proporcionarlos con una precisión determinista, con lo cual tenemos que entrar en el camino de la estadística. Ésta puede aplicarse a los datos de partida, siguiendo los procedimientos de Alonso y demás autores antes citados, pero también puede tomarse un camino que parece en cierto modo más directo, que es el puramente inductivo.

En una población cinética cuya educación se ha basado primordialmente en el método observacional, éste ejerce una atracción inmediata y así encontramos en diversos países trabajos puramente estadísticos, en los que se registran los fenómenos de inestabilidad (generalmente detectados solamente a partir de fotografía aérea) en correlación con unos pocos parámetros, como son la inclinación, la orientación y el piso estratigráfico.

Este procedimiento de ataque es erróneo ya que para efectuar el análisis estadístico de un fenómeno debemos partir de la comprensión del mismo y de los factores que le afectan.

En España se han llevado a cabo varios trabajos de esta clase, pero con una orientación mucho más acertada que, por otra parte, también encontramos en otros trabajos extranjeros.

La orientación seguida emplea extensamente la observación de los fenómenos de inestabilidad, pero los analiza con los conocimientos que, respecto a su producción nos ha proporcionado la mecánica del suelo. Si el tratamiento algorítmico es, en términos rigurosos, inaplicable por falta de definición de los datos, subyace como un esqueleto oculto y, en todo caso, define la fórmula dimensional que debemos tener en cuenta.

Así pues los estudios regionales sobre fenómenos de inestabilidad de J. M. Rodríguez Ortiz (catedrático de la Escuela T. S. de Arquitectura de Madrid), J. A. Hinojosa y C. Prieto¹²⁴, las directrices de J. A. Hinojosa y C. León¹²⁵ sobre la elaboración de mapas de zonas inestables, y el estudio regional de Severino Fernández Blanco¹²⁶ sobre los taludes naturales en Andalucía configuran una metodología muy certera y que tiene rasgos originales, aunque tenga, evidentemente, precedentes en investigaciones extranjeras¹²⁷.

LA ESTABILIDAD DE TALUDES, COMO FACTOR EN EL NACIMIENTO DE LA MECÁNICA DEL SUELO

La estimación de la estabilidad de taludes, tanto naturales como artificiales, constituye, como hemos visto, uno de los problemas que con mayor abundancia se presenta dentro de la zona de influencia de la geotécnica. Y, por ello, es también uno de los temas-testigo que mejor nos puede servir para ilustrarnos sobre la evolución de la misma.

Un dato fundamental para entender ésta es la fecha del nacimiento de la mecánica del suelo, que, un poco dogmáticamente, he fijado, al principio de mi disertación, en 1925, con la publicación de la *Erdbaumechanik*. Es la más generalmente aceptada, pero hay quienes la remontan a 1913.

En esa época, en diversas partes del mundo, y en particular en Suecia, Estados Unidos y Alemania, habían ocurrido accidentes catastróficos en obras que implicaban movimientos importantes de tierras. Esto, nos damos cuenta hoy, que se debió al progreso en los cambios mecánicos para efectuar esta clase de obras había permitido un aumento de escala, sin que la teoría de estabilidad de muros y taludes hubiese acompañado a ese progreso.

Así pues, en varias trincheras de los ferrocarriles suecos se habían producido varios corrimientos súbitos, algunos de los cuáles habían costado muchas vidas, lo cual condujo a la formación de una Comisión Geotécnica (y es, por otra parte, la primera vez que se usa esta palabra) para investigar sus causas y la seguridad del resto de los taludes existentes. Esta Comisión, presidida por el profesor Fellenius en Estocolmo, alumbró a lo largo de sus diez años de actuación, el método que seguimos llamando del «círculo sueco».

¹²⁴ Rodríguez Ortiz, J. M., Prieto, C. e Hinojosa, J. A.: «Regional Studies on Mass Movements in Spain». 3rd Int. Cong. Ass. of Eng. Geology, Madrid, I: 1: 267-277, 1978.

Rodríguez Ortiz, J. M., Prieto, C.: «A proposal for quantitative terrain evaluation for highway construction» Q. Journ. Eng. Geol., 12: 139-146, 1979.

¹²⁵ Hinojosa, J. A. y León, C.: «Unstable Soil Mapping in Spain». 3rd Int. Cong. Ass. of Eng. Geology, 1: 2: 217-227, 1979.

¹²⁶ Fernández Blanco, S.: «Estudio de las propiedades geotécnicas de las arcillas azules del Guadalquivir con especial aplicación a la estabilidad de los taludes naturales a largo plazo». Tesis doctoral dirigida por D. José A. Jiménez Salas, Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, 1979.

¹²⁷ De Lory, F. A.: «Long term stability of slopes in over consolidated clays». Dr. Thesis Un. of London, Imperial Coll., 1957.

Por aquellos años, el aumento del calado obligado por el mayor tamaño de los buques, en el puerto de Gotemburgo, origina varios deslizamientos de muelles, lo que ocurre también en el canal de Kiel, movilizándolo la atención del Laboratorio de Trabajos Hidráulicos de Berlín, dirigidos por Krey. En Estados Unidos, los catastróficos corrimientos del Canal de Panamá, principalmente en la trinchera de La Culebra, demuestran la insuficiencia de los conocimientos disponibles, y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ese mismo año 1913, forma un Comité, presidido por R. A. Cummings, para investigar la situación.

Tenemos así tres frentes, tres puntos calientes, cada uno de ellos dotado de medios considerables, en los que pudo polimerizarse el cristal aperiódico constitutivo de la mecánica del suelo. Pero no fue así: los hallazgos científicos son pájaros montaraces que no gustan de venir a comer a las manos institucionales por pródigas que estas se muestren. Ciertamente, se obtuvieron resultados, algunos tan interesantes que seguimos utilizándolos. También Tartaglia había constituido sus tablas de tiro cuatro siglos antes. Pero ni en uno ni en otro caso se inició la reacción.

Krey, en Berlín, perfeccionó los ya complicados (y bellos) procedimientos de la estática gráfica aplicados a los problemas de empuje de tierras, aplicándolos, en análisis retrospectivo, a los accidentes observados, y dando normas para calcular las nuevas obras. Es decir, desarrolla un poco más las reglas de la artesanía existente para adaptarla a las últimas observaciones. En cuanto a los suecos, su desarrollo tiene un aspecto de mayor novedad, pero no es realidad más que una extensión de la misma teoría de empuje de tierras, aplicando la superficie curvada que había sido ya observada directamente en los casos reales de Coulomb. No se encuentra en los trabajos de la Comisión Sueca ni siquiera incitaciones a la experimentación, ni una consideración precisa de las propiedades del terreno, habiéndoseles escapado la gran pieza de que estaban tratando con unas arcillas de una extrema susceptibilidad tixotrópica, como no se encuentran más que en áreas muy reducidas de la superficie terrestre. Las propiedades del terreno las deducen, con resultados erróneos, igualmente de análisis retrospectivos, método que ha demostrado ser de utilidad suma en mecánica del suelo, pero que, como han hecho notar recientemente

ter Leroueil y Tavenas¹²⁸, puede conducir a grandes errores cuando no se ha comprendido bien el fenómeno que se estudia.

Estos trabajos no fueron, ni mucho menos, inútiles. Aumentaron la cantidad, la calidad y la temperatura del medio, pero no sobrepasaron el nivel artesanal. Incluso, si las cosas hubieran transcurrido de otra manera, hubieran podido ser retardadores del nacimiento de la mecánica del suelo, ya que daban reglas, recetas de aspecto muy preciso para resolver los problemas que habían sacudido la conciencia de los profesionales. Aquí, como tantas veces ha ocurrido, el éxito pragmático hubiera podido ser una barrera para el conocimiento racional del hecho.

Quizá podamos considerar como la más acertada la Comisión Americana, que llegó a muy pocos resultados «prácticos», pero concluyó que era muy necesario llegar a identificar magnitudes medibles en los suelos, sin lo cual no se podía en absoluto pretender trasladar la experiencia obtenida en un caso a otro cualquiera. El análisis de los corrimientos de Panamá quedó, sin embargo, sin hacer, y tuvo que esperar a 1948¹²⁹.

LOS MEDIOS FUNDACIONALES DE LA MECÁNICA DEL SUELO

Pero fue en el año 1917, en el declive de la Primera Guerra Mundial, cuando Terzaghi es reclutado por el Ministerio de Asuntos Exteriores de su país, como profesor de la Escuela Técnica de Constantinopla, capital de un país hermano de armas y a cuyo desarrollo tecnológico Austria se ha comprometido colaborar. No encontramos en el momento ni en el ambiente nada que incite a la investigación. En cuanto a los medios, han quedado relatos de cómo, en un patio, monta aparatos compuestos con elementos, alguno del laboratorio de física; la mayor parte, de la cocina de la institución. Carente de instrumentos para medir desplazamientos muy pequeños, cuenta el paso de los anillos de interferencia que se producen colocando un cubre sobre un portaobjetos.

Y así es como va acumulando algunos datos experimentales y estableciendo algunas teorías sobre el comportamiento de los suelos, que publica primero fragmentariamente¹³⁰ y luego reúne en su «Erdbaumechanik».

¹²⁸ Leroueil, S. y Tavenas, F.: «Pitfalls of Back-Analyses. 10th Int. Conf. ISSMFE, Estocolmo, 1: 185-190, 1981.

¹²⁹ Binger, W. V.: «Analytical studies of Panama Canal slides». 2nd Int. Conf. ISSMFE, Rotterdam, 2: 54-59, 1948.

¹³⁰ Como ejemplos de las publicaciones en las de Terzaghi iba configurando la doctrina que había de presentar, como un esquema coherente, en su «Erdbaumechanik» podemos citar, entre otras: «Die physikalischen Grundlagen des technisch

geologischen Gutachtens». Oesterreichischer Ing. und Arch. Ver. Zeitsch., 73: 36/37: 237-241, 1921.

«Die Beziehungen zwischen Elastizität und Innendruck», Akademie der Wissenschaften in Wien. Sitzungsberichte. II a: 132: 3/4: 105-124, 1923.

«Die Theorie der hydrodynamischen Spannungsercheinungen und ihr erdbautechnisches Anwendungsgebiet». Int. Cong. App. Mechanics. Delft, 1: 288-294, 1924.

No hay que pensar que ésta es recibida como la buena nueva esperada por los medios de una artesanía que, como antes hemos visto, era consciente de que existían graves carencias teóricas en sus conocimientos. Esto no ocurrió así, ni ha ocurrido en ocasiones parecidas.

Siglo y medio antes, el método de cálculo del empuje de tierras de Coulomb no se introdujo fácilmente en una profesión que tenía las reglas empíricas de Vauban y, todavía en 1881, sir Benjamin Baker, en Inglaterra, lo tachaba de inútil.

Las ideas de Terzaghi, expresadas en el «Erdbaumechanik», encontraron al principio grandes contradictores, y, en especial, al profesor Paul Fillunger de la misma Escuela Técnica de Viena, el cual publicó en 1936 un folleto paradigmático en el que se afirmaban, entre otras cosas¹³¹:

1. La investigación en mecánica del suelo es superflua, ya que la experiencia de quienes realmente practican las tareas de construcción relacionadas con el terreno ha obtenido resultados satisfactorios y suficientes.

2. Las teorías de la mecánica del suelo, por otra parte, no tienen ninguna aplicación práctica, ni pueden tenerla.

Y todo esto típicamente fundado en que «desde hace seis o siete mil años al menos, desde que se comenzó la torre de Babel, pasando por las pirámides, los palacios minoicos, los acueductos romanos, el Coliseo, los edificios góticos con sus altas torres, la iglesia de S. Pedro, hasta los terraplenes de los ferrocarriles y la torre Eiffel, se ha recogido un rico caudal de experiencia que nos proporciona datos suficientes para cualquier cosa que queramos construir».

Afortunadamente, Terzaghi consiguió que el claustro de la Escuela formase una comisión que consideró que era útil y viable el nuevo enfoque.

Peor suerte tuvo Alexandre Collin¹³² que, en 1846 presentó a la Academia de Ciencias francesa una memoria sobre la estabilidad de taludes en los canales, tropezando con Poncelet, ingeniero militar que, aparte de sus innegables méritos científicos no supo en aquella ocasión desprenderse del efecto de lastre de su gran experiencia en la construcción de fortificaciones e hizo que rechazaran la memoria, por «superflua», puesto que los problemas de que trataba ya estaban adecuadamente resueltos y «sólo» presentaba como novedad el tratamiento de la cohesión, cuya influen-

cia se sabía que era despreciable y que, por otra parte, no había medio de medir. Y así quedo en la sombra un magnífico estudio basado en observaciones de primera mano de corrimientos en los canales franceses, interpretados teóricamente con una penetración tal, que es preciso esperar sesenta años para que la evolución de la mecánica del suelo, con los trabajos de la Comisión sueca, llegue a un punto próximo aunque todavía menos rico en perspectivas, a donde Collin había llegado.

Vemos así ejemplos, cuyo valor de generalidad no pretendo establecer, la relativa esterilidad de la investigación «de encargo», iniciada bajo petición, para llenar una necesidad profesional y social. Muchos casos podrían citarse de lo contrario, pero me atrevo a suponer, en la mayoría, hallaríamos que el resultado representa sólo un ensanche de la artesanía, y, en otros, una aplicación de un descubrimiento previo, quizá poco visible en ocasiones.

Y hay una clase muy numerosa de necesidades humanas que no lo fueron hasta que los científicos hubieron inventado el instrumento de habría que llenarlas. Es así como del descubrimiento accidental de Oersted se derivó, como un fruto natural, el telégrafo eléctrico, y más tarde el teléfono, en un momento en el que el mundo civilizado se sentía orgulloso de sus sistemas ópticos de telecomunicación.

Esto no debe llevar de ninguna manera a la idea de que no hay que prestar oído a las necesidades prácticas. Muy al contrario son el medio en el que polimeriza el descubrimiento y es también donde se ha de desarrollar la actividad de transformación, aunque no siempre sea la misma probeta en la que la molécula se ha engendrado, aquélla donde luego actúa (veamos hoy la energía nuclear, cuyos precursores apuntaban más bien a la trasmutación de los elementos).

Precisamente, se ha señalado que el desarrollo de todo nuevo campo de investigación sigue una forma en S, comenzando con un crecimiento acelerado hasta un punto de inflexión donde se amortigua hasta llegar a un estancamiento.

Esto corresponde a que, al principio, es una idea teórica, luego, conecta con aplicaciones prácticas, de donde viene la gran aceleración. Luego, estas aplicaciones están ya cubiertas. Todo organismo vivo, si se encuentra en un medio no renovado, muere víctima de sus propios desechos.

¹³¹ El folleto de Fillunger: «Erdbaumechanik?» editado por Friedrich Jasper, Viena, 1936, era ya imposible de encontrar en 1942, cuando intenté comprarlo; y en las bibliotecas de Viena, Berlín y Munich donde lo busqué, figuraba como «Perdido». Las referencias están tomadas de citas textuales incluidas en el

folleto de respuesta de Terzaghi, K. y Fröhlich, O. K.: «Erdbaumechanik und Baupraxis. Eine Klarstellung». Leipzig und Wien, Deuticke, 1937.

¹³² Ver nota 52 a pie de página.

Esta regla general puede experimentar numerosas variaciones, de acuerdo con circunstancias a veces internas, pero, con más frecuencia del medio. En la mecánica del suelo es posible detectar la aparición abortada de una autointoxicación de este tipo hacia los años 60. Es esa época, conocemos ya mucho de las arcillas azules, se llamen Wienertegel, arcilla azul de Boston, de Oxford o del Guadalquivir, y también de las arenas limpias bien o mal graduadas, provengan de Ottawa, de Bloom de Belín o del Loira.

Los jóvenes investigadores de un día que se preguntaron el porqué de tantas cosas, se han convertido en expertos, que conocen todas las respuestas. En los Congresos de 1965, en Montreal, y de 1969, en México empieza a flotar el ambiente exquisito y paralizante del virtuosismo. Un signo claro es que, por primera vez en el Congreso de México se presentan «estados del arte», escritos, de encargo, por los más eminentes especialistas que se editan en un tomo especial que se vende por separado. Esto es, para muchos, lo único que conocen del Congreso. En este tomo se pone punto final a muchas cuestiones que habían alentado durante muchos años nuestro interés. La mecánica del suelo estaba hecha.

Pero justamente en ese momento podemos advertir que empiezan a crecer algunas plantas salvajes en los intersticios entre los sillares del edificio tan regularmente establecido; plantas que, para algunos, lo afean, y en todo caso, no hay duda de que pueden llegar a ponerle en peligro.

El mismo año del de Montreal, se ha celebrado en Tejas el primer Congreso de arcillas expansivas¹³³, en 1971 Deere y Patton¹³⁴ nos muestran las propiedades peculiares de los suelos residuales; en 1972 Sherard¹³⁵, de los dispersivos. Más aún, en 1966 se ha fundado la Sociedad Internacional de Mecánica de las Rocas, para ocuparse de una inmensa variedad de terrenos que la mecánica del suelo, que en aquél momento puede llamarse ya clásica, casi había desdeñado.

Todo esto ensanchaba enormemente el medio en el que la actividad de las enzimas de la ciencia de la mecánica del suelo podía ejercerse, y vino a salvar a ésta de una vejez prematura. Fue un fenómeno que algunos dirán que fue «de encargo», pues tendió a llenar las necesidades de aquel momento, de aquellos años en los que se extiende un concepto global de la economía, cuando las colonias pasan a ser «países en vías de desarrollo», pero lo cierto es que éstos, con su rudimentaria tecnificación, hubieran preferido reglamentos, recetas y normas, antes que los más refinados

métodos de reconocimiento, proyecto e instrumentación, que es lo que se les ha suministrado.

Otras nuevas inyecciones de vitalidad han venido de la revolución de los ordenadores que ha golpeado de lleno a la geotécnica en el momento oportuno, permitiendo el empleo de ecuaciones constitutivas que responden a las reacciones reales del terreno en lugar de las antiguas, en el extremo límite de la simplicidad, heredadas de los experimentadores del hierro y del hormigón.

Sólo con los ordenadores ha sido posible adentrarse, por otra parte, en el mundo de los esfuerzos cíclicos y dinámicos, en el efecto sísmico, y se ha renovado por completo toda la práctica en obras marítimas, incluyendo la todavía muy joven de alta mar. Y es este otro ejemplo claro, en contra de lo que puede ser la apariencia, de investigación no promovida por un encargo. Las plataformas petrolíferas del mar del Norte comenzaron a hacerse con la «bien probada» técnica americana creada en el lago de Maracaibo y perfeccionada en el golfo de México. Son los geotectónicos noruegos e ingleses los que conciben el tipo radicalmente distinto de plataformas de gravedad, pero su interés, más que por el problema de las plataformas, fue atraído por la extraordinaria densidad de las arenas, evidentemente no preconsolidadas, del fondo del mar del Norte, descubriéndose que esto puede ser debido a los esfuerzos tangenciales cíclicos producidos por el paso de las olas de temporal, cuya altura, en ese mar, es de magnitud ya comparable con el calado¹³⁶.

Todas estas líneas de penetración en direcciones muy diferentes desintegran la fijeza del edificio clásico y hacen perder cohesión a la mecánica del suelo. Pero no por ello imposibilitan una futura síntesis, ese punto cero, que será una culminación, pero que en el fondo, como ocurre con la muerte, casi nadie deseamos. Porque la vitalidad de una rama de la ciencia no depende de la necesidad que de ella tenga la sociedad, ni siquiera de los medios materiales que ésta ponga a su disposición. Su medida es la del entusiasmo que despierte en las jóvenes inteligencias mejor calificadas de cada nueva generación.

Para esta finalidad, las dos condiciones anteriores: llamada social, y medios, pueden ser importantes, si se saben ofrecer de manera adecuada. La llamada social por ejemplo, si se presenta como urgente, puede ser disuasoria, ya que el joven verdaderamente inteligente pensará que esa es cuestión para el experto, y

¹³³ Ver nota 75 a pie de página.

¹³⁴ Cuarto Congreso Panamericano de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones. San Juan, Puerto Rico, 1971.

¹³⁵ Ver nota 57 a pie de página.

¹³⁶ Nataraja, M. S., Singh, H. y Maloney, D.: «Ocean wave induced liquefaction analysis». Int. Symp. Soils under Cyclic and Transient Loading-Swansea, 2: 509-516, 1980.

que ya estará resuelta mucho antes de que él esté en condiciones de producir respuestas.

Lo esencial es que el campo constituya un punto caliente en el panorama de la ciencia.

Hablando ahora de la geotécnica, cuando era alumno de la Escuela de Caminos, en 1940, oí del catedrático D. José Entrecanales Ibarra, la siguiente apreciación: «ay actividades humanas que se ejercen como Artes, otras son Ciencias. Pero entre unas y otras hay muchas, en las que la inteligencia humana se debate queriendo actuar con arreglo a la Ciencia, pero teniendo que recurrir muchas veces al Arte, cuando la Ciencia no le da respuesta. Así ocurre con la Medicina, y así pues, a todas estas actividades que están en un estado intermedio de evolución, les llamaré «Medicinas». Y la Geotécnica en una Medicina».

Curiosamente, veintidós años después, y pienso yo que por completo ignorante del punto de vista que exponía en su clase de Madrid D. José Entrecanales, el profesor de la Universidad de Urbana (Illinois) R. B. Peck¹³⁷ exponía en la principal revista de la especialidad una opinión coincidente. En su artículo, va describiendo con gran detalle, paso a paso, las analogías entre la ingeniería del subsuelo, o geotécnica (o quizás debiéramos decir «geotécnica clínica») con la medicina y entre la mecánica del suelo y lo que llama ciencia médica.

El geotécnico se ve obligado por lo tanto, con frecuencia, a tomar decisiones basadas exclusivamente en el precedente, concreto o condensado en alguna fórmula empírica; pero, en el estado actual de su actividad, no puede decirse que esté actuando como un artesano. Él tiene en todo momento la conciencia de que aquello sobre lo que discurre es un proceso físico, cuyos conceptos fundamentales comprende y que puede ser expresado mediante el lenguaje matemático. Lo que ocurre es que a veces se encuentra con que todavía no conoce los parámetros ni la fórmula de esa expresión. Pero sabe que existe, que algún día se encontrará y que él puede aproximar ese momento con su observación exacta y con sus cálculos, aún cuando sean todavía fragmentarios. Y pienso, señores académicos, que es en esto en lo que consiste vuestro propósito, aunque hayáis tenido que recurrir para ello a mi persona no puedo negar que representativa de la especialidad, pero científicamente sin méritos para sentarse entre vosotros; que es en esto en lo que radica la posibilidad de vuestro acierto al prestar vuestro apoyo y respaldo al mundo geotécnico. Vuestra comprensión será, para esa extensa comunidad de investigadores de cuyos afanes y logros os he hablado, como esa luz interna que el Dr. Fausto sentía¹³⁸, cuando se debate en medio de la confusión y oscuridad en la cual el soplo de la Angustia del Mundo le ha sumido.

¹³⁷ Peck, R. B.: «Art and science in subsurface engineering» *Géotechnique*, 12: 60-66, 1962.

¹³⁸ Alusión a una de las últimas frases del Dr. Fausto en la segunda parte «Der Mensch in seinem dunklen Drange ist sich des rechten Weges wohl bewusst».