

LA MECÁNICA DEL SUELO Y LA EDIFICACION

Luis Fernández Renau
Ingeniero de Caminos

El tema es tan amplio, que fácil es caer en banalidades. Intentaré, por ello, centrar tema tan extenso en puntos concretos, examinados a la luz de mi propia experiencia. Con ello pretendo, al quitar cierta generalidad a la exposición, presentar algunas controversias, vividas en el curso del ejercicio de la profesión.

Sin embargo, para intentar dar contenido a este artículo, recurriré a conceptos básicos, necesariamente tomados de relevantes autoridades en el campo de la Mecánica de Suelos.

Desde Coulomb hasta 1925, en Europa se había venido creando una disciplina, la Geotecnia, como desarrollo, fundamentalmente matemático, de una rama de la estática, extendida al estudio del equilibrio de los macizos del suelo. Las teorías de la Elasticidad y de la Plasticidad se habían introducido y adaptado al estudio de los suelos. La Hidráulica subterránea había nacido y crecido. Se había pensado en algunos modelos sencillos para contrastar las teorías. Existían ya conceptos fundamentales, hoy evolucionados y refinados, más no caducos.

Sin embargo, pese a la osadía de intentar encerrar en el papel una Naturaleza idealizada, supersimplificada, nadie se había atrevido aún a intentar encerrarla, tal cual, en unos "sencillos" aparatos de laboratorio. Ese paso fundamental le ha dado a K. Terzaghi la paternidad de la nueva Ciencia. La fecha antes reseñada es sencillamente la de aparición de su libro "Erdbaumechanik", admitida hoy, con universal consenso, como fecha de nacimiento de la Mecánica del suelo.

Recalquemos la diferencia de espíritu entre Geotecnia clásica y Mecánica del suelo.

La Geotecnia, a la luz de nuestros días, aparece como una disposición del espíritu, un tanto defensiva, en que se admitían principios —desde luego razonables— que permitieran la aplicación de los conocimientos matemáticos ya avanzados, a través de las teorías de la Elasticidad, de la Plasticidad, de la Hidrodinámica clásica de los fluidos ideales.

La Mecánica de suelos apareció como una disposición del espíritu, agresiva, en que se pretendía arrancar a los suelos en el laboratorio el secreto de sus mecanismos de resistencia y deformación, de su comportamiento en el tiempo. No se intentaba aconsejar al suelo cómo debía comportarse, sino aprender de su observación metódica, cuáles eran las posibles leyes de su comportamiento.

El camino que va de la Hidrodinámica a la Hidráulica clásica y de ésta a la Mecánica de fluidos, obedece al mismo proceso histórico del desarrollo científico, que el anteriormente descrito en el contrapunto Geotecnia clásica-Mecánica del suelo. Al empirismo como control de la teoría idealizada, sucedió la teoría como fruto de la investigación empírica, con la metodología propia de la Física moderna.

Así en los comienzos del segundo cuarto de este siglo, Prandtl alumbraba la Mecánica de fluidos, y Terzaghi, la Mecánica de suelos. Sin embargo, se trataba de "nuevos testamentos", que venían a completar, no anular, "las viejas alianzas".

Nacida así, la Mecánica de suelos puede considerarse hoy una ciencia madura, que se nutre de la Geología, la Físico-Química y la Reología —ciencia de la deformación de la materia—, amén de la Mecánica de fluidos y las clásicas Elasticidad y Plasticidad. A su vez, la Mecánica de suelos ha visto nacer una hermana "tardía", la Mecánica de rocas.

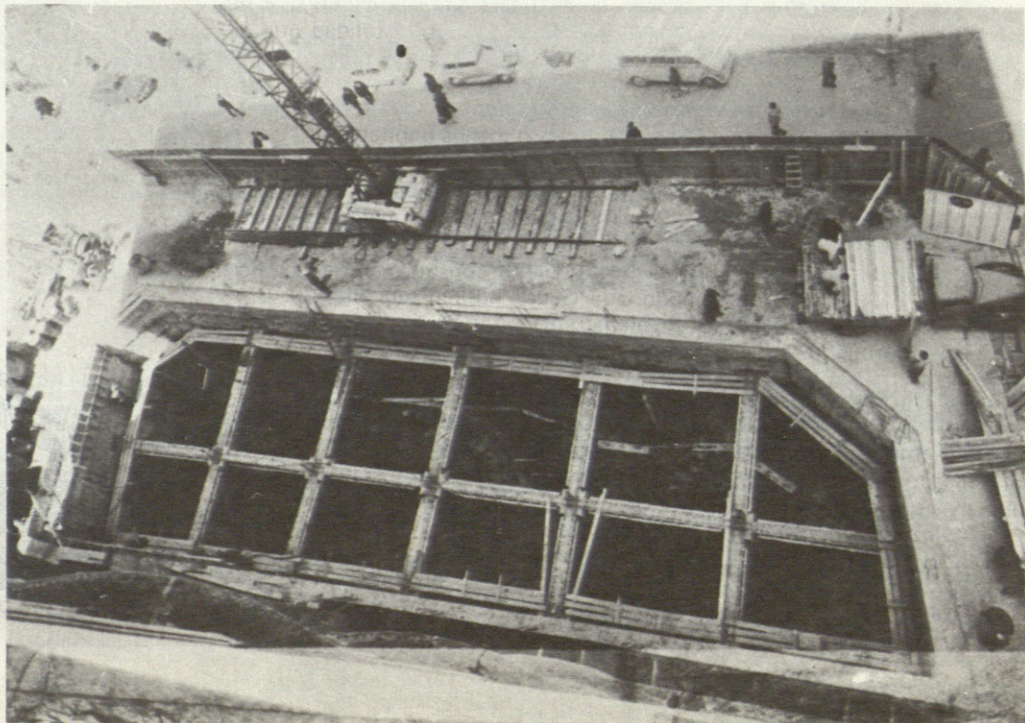
No se crea, sin embargo, que la Mecánica de suelos ha encontrado su culminación. Se mueve desde el virtuosismo del laboratorio hasta el empirismo con que aún se tratan muchos problemas no esclarecidos. Además, cubre hoy

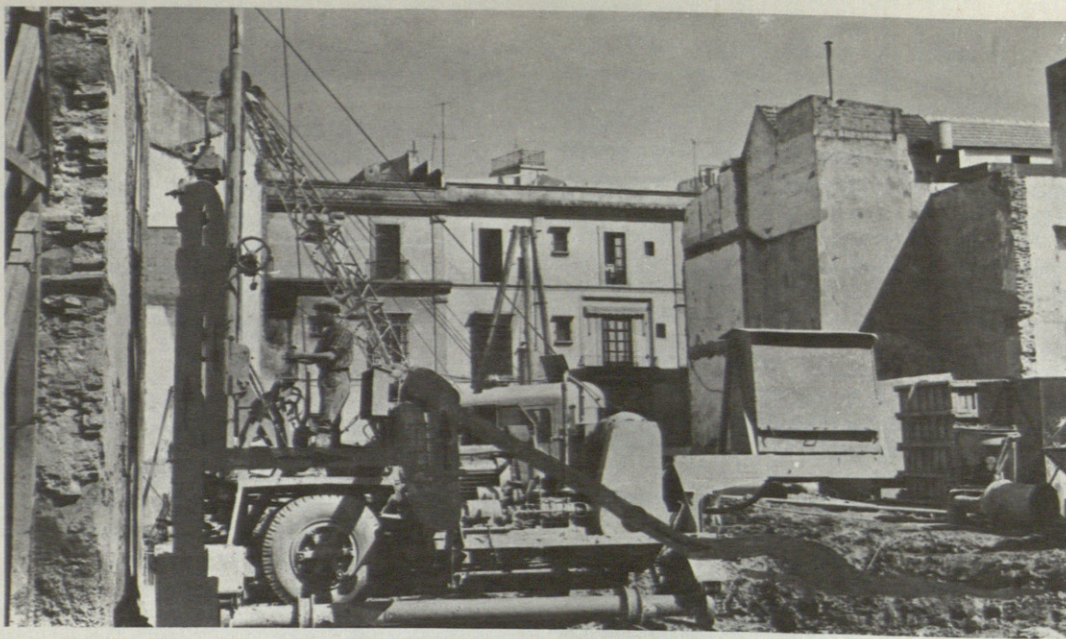
tan vasto dominio que necesariamente se fragmenta en numerosos campos de auténtica especialización. Hemos, pues, de habituarnos a plantear nuestros problemas al ingeniero de suelos, como acudimos al médico de cabecera, es decir, aceptando que, en casos, nos oriente hacia el especialista de una determinada rama.

Las aplicaciones tecnológicas de la Mecánica de suelos están en continua y rápida evolución. Como ejemplo, las primeras pantallas continuas ejecutadas en nuestro país, sirvieron de sótanos a los edificios del Banco Pastor de La Coruña (Fig. 1) y del Hotel Luz Sevilla (Fig. 2) de Sevilla, en los años 1962 y 1963, respectivamente. (Dos Arquitectos, de generaciones alejadas, acogieron con entusiasmo esa, entonces, nueva técnica de los lodos bentoníticos). Los métodos entonces empleados han evolucionado y nuevas máquinas, muchas proyectadas y construidas en nuestro país, han refrendado la generalización de esta nueva técnica, de múltiples e interesantes aplicaciones. Primera llamada de atención, con esta cita, al hecho de que el desarrollo de las aplicaciones de la Mecánica de suelos está íntimamente ligado a la colaboración de los Arquitectos y los Geotécnicos. Insistiremos sobre este extremo.

Ciertamente, el primer colaborador del

Sótanos del Banco Pastor, La Coruña.





Sótanos del Hotel Luz Sevilla, Sevilla.

Arquitecto es el Ingeniero de suelos (o de cimentaciones). Es el primero en el tiempo, pues todo proyecto de edificación debe comenzar por el estudio del suelo de cimentación. Pero aún más, me atrevería a decir que es su colaborador básico, pues el éxito de la obra del Arquitecto está ineludiblemente ligado al satisfactorio comportamiento de la cimentación.

A recalcar aquí, que esa colaboración debe empezar ya con el Técnico urbanista, mucho antes del planteamiento concreto del proyecto de un determinado edificio.

Dos ejemplos. En el barrio de Amara (S. Sebastián), el trazado de la topografía oculta de las diversas capas de terreno, bien caracterizadas por estudios geotécnicos, permitió descubrir a tiempo que se disponían las zonas verdes sobre zonas de cimentación fácil, y se reservaban aquellas zonas de mayor dificultad de cimentación para magníficos edificios de plantas, tipo rascacielos, con enormes cargas concentradas en escasos y robustos pilares. La incidencia económica de tal constatación puede fácilmente imaginarse.

El segundo ejemplo, menos afortunado, muestra un caso en que el Urbanista olvidó hablar con el Geotécnico. En Bilbao, un bello conjunto de edificios se cimentó sobre pilotes que, atravesando fangos, transmitían las cargas al substratum rocoso. El vertido de rellenos para alcanzar las cotas previstas en esa zona por Urbanismo, motivó la consolidación de los fangos y la transmisión de esfuerzos imprevistos sobre los pilotes, sea por rozamiento negativo, sobre los mismos, sea por importantes fluxiones (fig. 3), e incluso deslizamientos del terreno (la fig. 4 muestra una "giba" de terreno que ha inclinado una caseta de madera. Esta "giba" es signo externo del deslizamiento). De haberse previsto una consolidación de los fangos, acelerada por drenes de arena, con anterioridad a la construcción del pilotaje, se hubieran economizado importantes recalces para corregir la rotura de gran parte de los pilotes.

Concluyamos que la colaboración Arquitecto-Geotécnico debe ser el principio de todo nuevo plan de urbanismo.

Pero también esa colaboración debe ser un fin, una meta común profesional. Me refiero a que la Mecánica de suelos, como ciencia básica, necesita el control de los ensayos de campo, de los ensayos a escala natural y de las auscultaciones o mediciones sobre la obra ejecutada. Estos tres tipos de medidas son, no sólo control necesario, sino jalones orientadores de la investigación y del progreso de la Mecánica de suelos. Y tales ensayos y mediciones deben ser previstos por la Dirección de obra, cuya misión es clave antes, durante y después de la ejecución de los trabajos. Ciertamente que esa Dirección necesitará la colaboración del Geotécnico para planear los ensayos de campo (tales como penetraciones estáticas y dinámicas, carga de placas), los ensayos a escala natural (tales como pruebas de carga sobre zapatas y pilotes) y las auscultaciones de la obra terminada (fundamentalmente mediciones

Viga deformada por desplazamiento lateral de un relleno.

Deslizamiento provocado por un relleno.

de asientos y, en algunos casos, como silos, registro de las importantes sobrecargas a través de las partes de explotación del propio silo, así como, en otros casos, control de la variación del peso propio durante la erección de la estructura). Todas esas mediciones suponen apropiar medios económicos, que sólo el Director de la obra puede solicitar de la Propiedad.

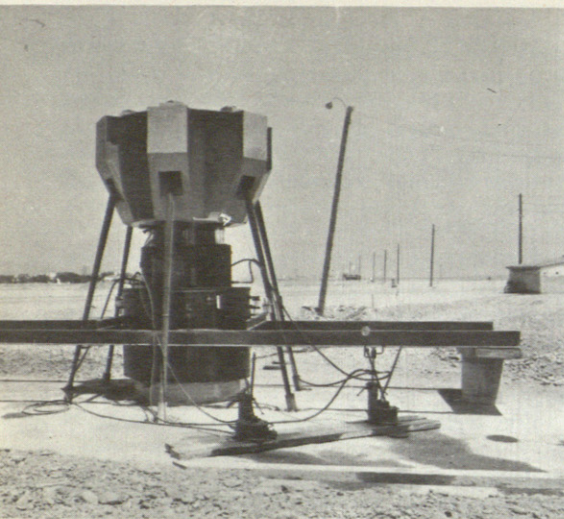
Pero la tarea común es aún mayor: los datos así obtenidos serán fructíferos si son remitidos a un organismo central que pueda recopilarlos y analizarlos con una visión general de conjunto. Esta tarea no creo ha sido asignada aún a ningún centro oficial.

Una legislación conducente a la obtención de un mínimo de mediciones "in situ", permitiría la intervención de los Colegios profesionales y de las Delegaciones de los Ministerios competentes, por ejemplo, que, a la escala regional, podrían llevar a cabo una primera recopilación de datos, para su posterior remisión al centro oficial de ámbito nacional.



NIVEL DESPUES DESLIZAMIENTO

NIVEL ORIGINAL



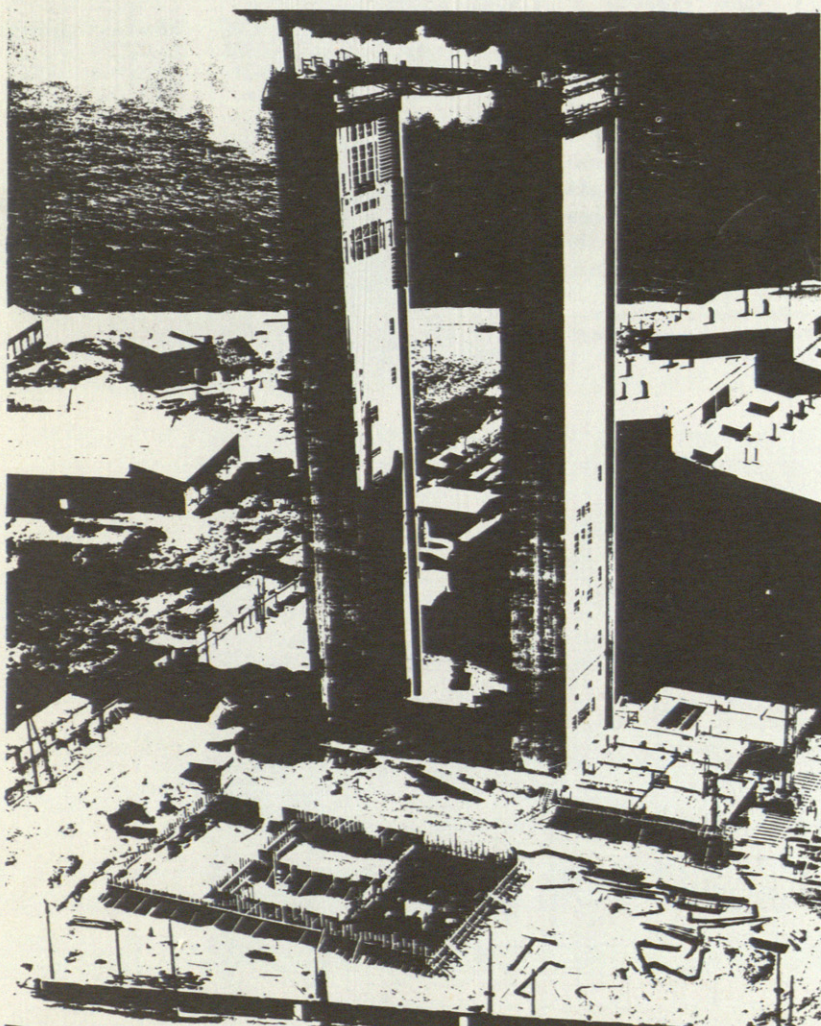
Prueba de carga de un pilote por gato reaccionando contra anclajes pretensados inyectados en el suelo.

Estas ideas podían ayer parecer utópicas, pero pensemos que en algunos países tiempo ha que se han redactado códigos locales de cimentaciones. El camino aquí, apuntado permitiría crear normas, con base técnica apropiada, en ciudades como Barcelona, Madrid, Sevilla, Valencia... a su vez integradas en un código nacional de carácter oficial, código hecho con espíritu de "garantizar al máximo, tanto la seguridad de los trabajadores como la solidez y calidad de los edificios", pero también

dando pie a la curiosidad investigadora. Normalización de fondo, y no de forma, flexible y que valora, lógicamente, cuanto ya existe. Ello requerirá una leal colaboración de los organismos oficiales con los profesionales en ejercicio libre, tendente a controlar la calidad de la construcción, fomentar el progreso de la técnica y ayudar a la economía del país.

Para acometer una tal empresa hace falta tener fe en la Mecánica de suelos, creer que es una Ciencia, aun conociendo sus limitaciones, y reconociendo que muchos principios, teóricamente sancionados, crean situaciones complejísimas, al superponerse en la práctica. La necesidad de hacer recurre entonces a la experiencia, cuyo valor es innegable, cuando ha sido intensamente vivida. (En caso contrario, es magia negra).

Y a este respecto, bueno es oír la persona experimentada, aun cuando sea a un nivel técnico medio. Recuerdo, en efecto, una arcilla roja en Pontejos (Santander), que mostraba resistencias a compresión simple de 1.2 kg/cm^2 . y, sin embargo, en el campo, las paredes de los pozos de excavación tenían estabilidad precaria. Los viejos de la localidad recordaban que procedía de lavaderos de mineral de hierro, abandonados hacía unos 50 años. Mostrada, a modo de broma, a un grupo de colegas de nuestro laboratorio, sólo un inteligente laborante, con 18 años de experiencia, se percató pronto de que aquel no era un suelo natural, circunstancia inicialmente insospechada para varios técnicos de muy superior formación académica.



Central Térmica de San Adrián. Badalona.

La experiencia juega mucho en materia de suelos, pero, dejando la anterior anécdota, bueno es recordar las palabras de Leonardo de Vinci:

"Primero estudia la ciencia; luego seguid la práctica que nace de la ciencia".

Y la Mecánica de suelos es ciencia, en su doble vertiente, básica y pragmática.

Cuando analizando unos ensayos edométricos de una arcilla preconsolidada de Buenos Aires se es capaz de predecir en una oficina de Madrid la altitud máxima posible de la zona de la ciudad del Plata, se siente que se maneja una Ciencia.

Cuando unos ensayos de expansión en el laboratorio nos advierten que una arcilla durísima de Barajas (Madrid) puede aumentar de volumen —cosa no sospechable— y luego descubrimos grietas en aquellas partes de la obra no proyectadas con consideración del carácter expansivo del suelo, se siente que se maneja una Ciencia.

2. CONTROVERSIAS

Tema tan amplio como "La Edificación y la Mecánica de Suelos", no puede tener un desenlace final, pero dejaré para lo último ciertas consideraciones fundamentales en cuanto a las limitaciones que la Mecánica de Suelos tiene. Antes, recordaré ciertos puntos que dan lugar a controversias relativamente frecuentes entre Propiedad y Geotécnico, en que puede verse envuelto el Arquitecto.

2.1) Los reconocimientos geotécnicos y los informes.

Por convicción técnica o prudente costumbre, se ha generalizado la práctica de ejecutar sondeos de reconocimiento previamente a la ejecución de la obra y, a menudo, como debe ser, ya antes de la elaboración del proyecto. Creo que, escasas veces, los sondeos preceden a un plan de urbanización.

Quisiera traer aquí a consideración que los sondeos deben ser *siempre* planeados por el binomio Arquitecto-Ingeniero de suelos. No deben confiarse a la casa ejecutante, a su libre criterio. Ciertamente que la ejecución material del reconocimiento de suelos es una tarea cuya especialización va del Ingeniero al Sondista. Este deriva su calificación, en su mayor parte, de su prolongada experiencia. Pero una bien ejecutada campaña de reconocimiento, puede resultar poco significativa para el Técnico responsable del proyecto de la cimentación, si éste no ha intervenido y dirigido los trabajos de campo desde un principio.

Una cosa es hacer buenos sondeos, y otra, muy distinta, llevar a cabo un competente estudio de suelos. Por perogrullada a que esto suene, lamentablemente constatamos con frecuencia cómo la casa ejecutante se encuentra de sopetón con que se esperaba de ella un informe geotécnico, cuando ni tan siquiera se le había informado de las características más generales de la estructura prevista.

2.2) El uso de fórmulas a modo de recetas

Nunca se pondrá suficiente énfasis sobre el

peligro que encierran las fórmulas, particularmente las de capacidad portante de una zapata o un pilote.

Su manipulación queda al alcance de todos. No existe censura. Sin embargo, su interpretación correcta pertenece al dominio del especialista.

En ciertos tópicos, tales como la hinca de pilotes, se han desarrollado tantas fórmulas como detergentes ofrece el mercado. Unas son simplistas, otras teóricamente muy elaboradas. Como nacen de premisas diferentes, su alejamiento de la realidad se fija por coeficientes de seguridad, contrastándolas con pruebas de carga a escala real.

No pretendemos sembrar escepticismo, sino prudencia en el uso de las fórmulas, muchas de las cuales ceden paso a otras nuevas más refinadas y experimentadas. Hay que seguir su desarrollo, estar al día. Y cada día intentar confrontarlas con mediciones reales sobre las propias obras o partes de las mismas.

En casos concretos, se dispone de buenas teorías, acordes con la realidad. En otros, la distancia entre teoría y práctica es grande, lo que suele reflejarse en abultados coeficientes de seguridad, altamente conservadores. Disminuir esos márgenes es tarea primordial y continua de la Mecánica de suelos.

El uso de las tablas de cargas admisibles no debe ir más allá del anteproyecto. Las tablas no permiten ni vislumbrar los márgenes de seguridad y no incluyen importantes variables del problema, como son, aparte del tipo de suelo, la profundidad, dimensiones y forma del cimiento; carácter, excentricidad e inclinación de las cargas y efecto de la posición de la capa freática.

2.3) La búsqueda indiscriminada de los parámetros "c" y "φ"

La Propiedad suele exigir notas de cálculo y está en su derecho. Siente así haber gastado mejor su dinero y cubre su responsabilidad. A Ingenieros, por los que siento todo respeto, he oído decir que todo aquello que no se calcula no es Ingeniería. Creo, sin embargo, que en materia de cimentaciones, se debe hablar mejor de estimar numéricamente, y ello sólo dentro de un conocimiento profundo de las bases de la teoría y de sus limitaciones. Muchas veces, los cálculos "visten un proyecto" y se lanzan con la esperanza de que no caigan bajo el control de persona entendida o especializada. Denuncia grave ésta, pero no calumniosa.

Como para hacer cálculos suele venir bien disponer de unos valores de la cohesión "c" y del ángulo de rozamiento interno "φ", he aquí el porqué de la búsqueda de esos datos, a toda costa.

Este es justamente un concepto clásico —la recta de Coulomb— que, posteriormente, fue perfeccionado al dar entrada a la influencia de la presión del agua intersticial sobre el rozamiento, lo que viene, en parte, condicionado por la velocidad del corte a que se somete el suelo:

$$\gamma = c + (p - u) \operatorname{tg} \varphi$$

Con todo su refinamiento, esta ecuación no es más que una linearización de la curva intrínseca o envolvente de los círculos de rotura

en la conocida representación de Mohr y según el criterio de rotura del mismo autor: a saber, la resistencia al corte es función exclusiva de la tensión normal efectiva.

Debemos, por tanto, distinguir tensiones totales (p) y efectivas (p - u), y tener siempre en mente que tratamos un sistema de tres fases: sólida (partículas del suelo), líquida (agua intersticial) y gaseosa (aire, en los suelos parcialmente saturados).

En un suelo saturado, la carga (p) es tomada inicialmente por el agua y transferida paulatinamente al esqueleto sólido, a medida que progresa el drenaje. La velocidad de esta transferencia depende de la permeabilidad del suelo en cuestión. Según el momento en que se produzca el cizallamiento del suelo (velocidad de corte), se dispondrá de una diferente resistencia al corte.

En el laboratorio cabe, por tanto, ejecutar ensayos drenados o lentos y ensayos no drenados o rápidos, según que durante el proceso de corte se permita toda o ninguna disipación de presiones intersticiales. También se hacen ensayos consolidados, en que se permite la anulación de las presiones intersticiales durante una fase del ensayo (consolidación) y se impide toda disipación de tales presiones en la segunda fase (corte).

En la práctica también se encuentran todos los casos. Si se trata de la estabilidad a largo plazo de la cimentación de un edificio o un talud en arcillas, estaremos en el caso de drenaje total. Si, por el contrario, nos interesa la estabilidad a corto plazo —lo que encierra un coeficiente de seguridad menor que en el caso anterior— se tratará de un drenaje impedido o corte rápido.

(En el caso de una presa de tierra, hace tiempo construida, en que el embalse baja rápidamente, se estará en un caso de consolidación plena del terraplén, seguida de un corte rápido).

Lo que interesa aquí resaltar es que la resistencia al corte de un suelo y, por ende, los valores de "φ" y de "c", dependen del tipo de ensayo del que se han obtenido y, a su vez, ese ensayo debe planearse de acuerdo con el problema especial que quiere resolverse. No pueden aceptarse, sin más, valores indiscriminados de "φ" y "c".

2.4) El coeficiente de seguridad

Dos puntos fundamentales se plantean al proyectista de una cimentación:

—Margen suficiente hasta el hundimiento del suelo.

—Deformaciones admisibles para las estructuras sustentadas.

Desarrollaremos más adelante este segundo tema (parte III).

Los cálculos de la Mecánica de suelos son cálculos en rotura. Definir estados elásticos y de pre-rotura es muy difícil. Aspiramos a conocer el comportamiento del suelo en rotura franca y, cuan a menudo —pruebas de carga, sin ir más lejos— es difícil saber dónde y cuando la rotura plástica comienza. Nos tenemos que contentar con hablar de un coeficiente de seguridad para cada fórmula que, estática o dinámica, se aparta de la realidad de manera aún imprecisa, pues la Naturaleza no se deja expresar por simples

expresiones matemáticas, aun cuando, a veces, nos parezcan complicadas. Ante todo, nos interesa alejarnos del estado de rotura, para el que las fórmulas han sido deducidas. Un coeficiente de seguridad 3 es normal para fórmulas bien experimentadas, y permite, en general, tener limitados los asentos para las cargas de servicio de la estructura.

En Mecánica de suelos existen diversas definiciones del coeficiente de seguridad.

La carga admisible suele obtenerse de dividir la carga de hundimiento teórico por un factor K, tanto en caso de zapatas como pilotes.

En estabilidad de taludes se hablaba antaño de la relación entre las fuerzas que provocan el deslizamiento y las que lo resisten. Hoy se prefiere hablar de la relación entre resistencia al corte y tensiones tangenciales a lo largo de las superficies de deslizamiento.

En problemas de empujes sobre muros, se suele dividir el empuje pasivo por un coeficiente y tomar el empuje activo sin reducción.

Más recientemente Brinch Hansen (1) ha propuesto un criterio análogo al utilizarlo en el cálculo del hormigón armado, que preconizara E. Torroja en su fundamental trabajo "pionero", aceptado internacionalmente. A saber, las características geotécnicas del suelo se afectan de coeficientes divisores (de minoración) y las cargas de multiplicadores (de mayoración).

Recordemos existen tres líneas de pensamiento:

—Método de "tensiones admisibles". Las cargas no deben provocar tensiones superiores a las obtenidas de dividir las resistencias del material por un coeficiente de seguridad:

$$f(G, P) = \frac{\sigma_{\text{rot}}}{K}$$

—Método de "cargas de hundimiento". Las cargas, afectadas de multiplicadores de seguridad, deben agotar la resistencia del material:

$$f(K_G \cdot G, K_P \cdot P) = \sigma_{\text{rot}}$$

—Método de "coeficientes de seguridad parciales". Las cargas mayoradas no deben conducir a tensiones superiores a las resistencias minoradas del material.

$$f(K_G \cdot G, K_P \cdot P) = \frac{\sigma_{\text{rot}}}{K}$$

El primer método presupone centrar toda nuestra desconfianza en la determinación de la resistencia del material; el segundo método considera a las cargas como responsables de nuestras incertidumbres.

El tercer método es más justo y pretende, sobre una base estadística, responsabilizar tanto a las cargas, como a las resistencias, en la medida que son culpables de la imprecisión con que se dejan caracterizar. Cuanto mayor es la incertidumbre, mayor será el coeficiente de seguridad parcial.

Revisemos las cargas actuantes.

—Los pesos específicos se determinan por ensayos simples y precisos. Además inciden a veces en favor, a veces en contra de la estabilidad. Deben tomarse sin coeficiente de seguridad: $K_G = 1$.

—Las cargas hidrostáticas deben afectarse también por $K_a = 1$. Sólo cuando la estabilidad

dependa exclusivamente de cargas muertas ($K_G = 1$) y presiones hidráulicas, deberá tomarse $K_a > 1$.

Cuando los niveles de agua sean imprecisos, se tomará $K_a = 1,2$.

—Las sobrecargas vivas deben afectarse por $K_p = 1,5$, a menos que exista escasa probabilidad de que se vean superadas, como en casos de volúmenes de ensilado o cargas de máquinas o vehículos. En estos casos: $K_p = 1,2$.

Revisemos los parámetros del suelo

Para pasar de los resultados de laboratorio a los valores a introducir en el cálculo, se usan estos coeficientes:

$$K_\varphi = \frac{t_g \varphi_L}{t_g \varphi_c} = 1,2$$

$$K_c = \frac{C_L}{C_c} = 1,5 - 2$$

Tomando estos coeficientes de minoración y los anteriores citados de mayoración se llega a coeficientes de seguridad totales, del orden de 2 para cimentaciones con carga muerta únicamente, y del orden de 3 para el caso en que predominen sobrecargas vivas. Entre estos dos casos ideales, se sitúan los coeficientes de seguridad que procura el método de coeficientes parciales.

Cuando se disponga de ensayos a escala natural, el coeficiente de seguridad total a tomar será más bajo, del orden de 1,5.

(Recordemos, de pasada, que aparte de la adopción adecuada de las características geotécnicas del suelo, existe la tarea de asignar esos valores con buen juicio a las diversas zonas del terreno que intervienen en el problema).

Procede resaltar en este momento, que el precisar demasiado un coeficiente de seguridad puede estar económicamente injustificado, pues, por ejemplo, si un pilote ha debido atravesar potentes capas de débil resistencia, un aumento, relativamente pequeño, del empotramiento en la capa portante subyacente, puede representar un aumento sustancial del coeficiente de seguridad, sin apreciable repercusión sobre el precio del pilote.

2.5) Asientos y hundimiento

Recordemos brevemente conceptos básicos.

Antes (2.4) decíamos que un margen amplio hasta la rotura, en general, llevaba consigo el tener limitados convenientemente los asientos de la estructura bajo sus cargas de servicio. Esto es verdad para lo que pudiéramos llamar asientos inmediatos, a corto plazo o producidos sin apreciable variación en el contenido de humedad del suelo saturado, asientos que son debidos a los desplazamientos asociados a las variaciones de forma, sin variación de volumen, por esfuerzo cortante —en suelo saturado, agua y partículas sólidas son prácticamente incompresibles, dentro del campo de variación de tensiones en que nos movemos.

En estados muy alejados de la resistencia al corte del suelo, las deformaciones y tensiones tangenciales son aproximadamente proporcionales y las teorías de la Elasticidad pueden usarse.

La anterior afirmación es falsa en el caso de

los asientos diferidos o a largo plazo, que se producen por drenaje o evacuación del agua intersticial al recibir una carga. Esta es tomada inicialmente por el agua y paulatinamente transferida al esqueleto del suelo, muy deformable. Es el caso de la bien conocida consolidación de las arcillas.

Aparte de estos asientos hidrodinámicos (consolidación primaria), existe una consolidación secundaria (secular), debida a flujo plástico o ajuste estructural, bajo la carga impuesta. Esta consolidación se produce, cuando todo exceso de presión intersticial ha sido ya disipado. Aún no existe un tratamiento satisfactorio de este problema.

Esta consolidación secundaria es de importancia para los suelos orgánicos jóvenes (fangos). La teoría de la consolidación hidrodinámica o primaria (Terzaghi) resuelve la mayor parte de los problemas prácticos, dando lugar a una predicción de asientos, en general, mayores que los reales. El desarrollo de los asientos en el tiempo es anticipado por dicha teoría con menor precisión que la magnitud de los asientos totales.

Los asientos dependen fundamentalmente del tipo de estructura, características del suelo, dimensiones del cimiento y cargas de cimentación.

La sensibilidad de la estructura a los asientos es primordial. Las estructuras muy rígidas o muy flexibles son las menos sensibles, pues o asentarán en bloque, sin asientos diferenciales apreciables (caso de los silos, como ejemplo) o podrán tolerar tales asientos sin daño estructural (caso de los tanques metálicos de petróleo). Entre estos dos extremos se sitúan la mayor parte de las estructuras y, en particular, las reticulares, que aquí nos interesan de manera especial.

Las tolerancias de las estructuras vendrán fijadas por estos tres conceptos:

—Ausencia de daños estructurales, o sea, de fisuración de la estructura. Inexistencia de lesiones en las partes fundamentales resistentes del edificio.

—Ausencia de daños arquitectónicos, o sea, de fisuración de los cerramientos —fachadas sobre todo. Inexistencia de lesiones en las partes no fundamentales de la estructura desde el punto de vista de su resistencia.

—Ausencia de deformación relativas que impidan el buen servicio de la estructura para el fin que se proyectó. Es el caso en que las tolerancias vienen fijadas por el buen funcionamiento de grúas, máquinas, tuberías...

En cuanto al tipo de suelo, con carácter general diremos que los asientos no suelen ser determinantes en caso de arenas de densidad media a fuerte y arcillas preconsolidadas.

En arenas sueltas, los asientos inmediatos y bajo cargas repetidas, deben ser nuestra primera preocupación; en arcillas blandas, los asientos lentos, por consolidación, son aspecto esencial del problema de cimentación.

La dimensión del cimiento controla el dominio del suelo sobre el que las cargas inducen sus tensiones y, donde, por ende, tienen su sede las deformaciones.

La incidencia de la magnitud de las cargas en los asientos se refleja a través del coeficiente de seguridad que las separa del hundimiento.

Brinch Hansen, (1) da esta clasificación general del problema de cimentación, según el criterio que debe prevalecer en el proyecto:

Criterio de asientos

Estructura sensible
Suelos sueltos o blandos
Cimientos grandes
Grandes cargas unitarias

Criterio de hundimiento

Estructura insensible
Suelos densos o duros
Cimientos pequeños
Pequeñas cargas unitarias

El tema de la delimitación de los asientos admisibles creemos, sin lugar a dudas, es en la hora actual el de mayor discusión. Pero tratándose de un auténtico vacío entre los Técnicos de estructuras y los de cimentaciones, nos parece algo más que una mera controversia. Sólo puede juzgarse en el contexto de la certeza e incertidumbre que la Mecánica del suelo, como todo Ciencia, encierra. Este es el contenido de la parte 3, al que relegamos, por unos momentos, el tema de la tolerancia de las estructuras frente a los asientos.

Del hundimiento, como fenómeno de plasticidad plenamente desarrollada, ya hemos hablado (2.4). Pero definir dónde y cuándo se produce la rotura es otro tema de controversia. Fiar del aspecto de una curva de carga de una zapata o pilote es, en general, algo demasiado subjetivo. Basta dibujar una misma curva a diferentes escalas para convencerse.

Por otra parte, existen roturas del terreno por fallo al corte local o general. En las primeras, un codo marcado puede descubrirse. En las segundas, la rotura es un fenómeno progresivo, y seleccionar el punto o zona restringida de la curva de carga, donde se inicia la rotura, es tarea difícil. Un criterio, debido a Hansen, (2) que es interesante, dice que la carga de rotura es aquella carga P_{rtal} , que para $0,9 P_r$ el asiento es mitad del que se produce bajo P_r .

2.6) La capa freática. Piezómetros

Este es un tema más propenso al olvido que a la controversia. Y es fundamental.

Variando las presiones intersticiales al ser cargado el terreno, cae de su peso cuán importante es conocer los niveles freáticos o presiones intersticiales iniciales en el agua del suelo " U_0 ". Esta es una variable independiente en nuestro problema, en tanto que la variación intersticial " ΔU " con las tensiones inducidas en el suelo es una variable dependiente, que puede anticiparse por ensayos de laboratorio y debe comprobarse por medición "in situ".

Recordemos que pueden existir varios niveles freáticos, sean profundos, artesianos o semiartesianos. Estos niveles deben detectarse mediante la instalación de piezómetros, simples o múltiples. En estos últimos, se aíslan y seleccionan "tomas de presión" a diversas profundidades.

Cierto que frecuentemente bastará con seguir las variaciones de una única capa freática por observación de los niveles del agua en un pozo. Pero éste no es siempre el caso.

La permeabilidad del suelo puede estimarse por ensayos "in situ", siguiendo el descenso o ascenso del nivel original, previamente recargado o deprimido artificialmente. Estos ensayos son practicables en suelos incoherentes. En los suelos coherentes, las permeabilidades pueden determinarse en el laboratorio.

Cuando la importancia del problema lo justifica, se recurre a ensayos de bombeo con medición de niveles piezométricos en un número discreto de puntos de la capa freática. Cada ensayo mide "su coeficiente de permeabilidad". Así, el bombeo se refiere, especialmente, a K_h —permeabilidad horizontal—.

Debe analizarse químicamente el agua del terreno con vistas a la futura ejecución de la obra.

2.7) Los controles de obra

Una breve observación tangencial a las aplicaciones de la Mecánica del suelo.

El terreno de cimentación, por su frecuente inaccesibilidad y por la existencia de la capa freática, fuerza casi siempre a métodos constructivos radicalmente distintos a los procedimientos empleados en la ejecución "aérea" de las estructuras. Por generalización, el "Técnico de superficie", en casos, impone al "Constructor subterráneo" unos Pliegos de Condiciones que pueden llevar a una mala ejecución, incluso habiendo obtenido unos buenos resultados en los controles efectuados.

¿Qué ocurre? Que los controles no son adecuados para una buena ejecución, y más bien fuerzan, a través del Pliego de Condiciones, a una mala práctica constructiva.

Caso típico, es el hormigón sumergido. Si se especifica una alta resistencia característica del hormigón, un obediente Constructor conseguirá

mantenerla a lo largo de la obra, pero a costa de colocar un hormigón insuficientemente plástico y que rellenará mal el encofrado o la excavación previa. En definitiva: mala ejecución con excelentes probetas de control.

El método de control debe ser representativo de una correcta ejecución, correcta dentro de las posibilidades peculiares de la obra subterránea.

2.8) El conocimiento de los fracasos

Frecuentemente se quita importancia a los fracasos, o se les oculta, sin beneficio para el progreso de la Técnica.

Los constructores tenemos que depositar nuestra confianza en el investigador y en nuestra propia experiencia, sinceramente vivida.

La incertidumbre de nuestros coeficientes de seguridad nos lleva a ser prudentes. Pero el progreso lleva consigo cierto riesgo. En esta confrontación, tenemos que ejecutar cimentaciones seguras, cuya financiación esté justificada.

El progreso sólo será posible con un "riesgo controlado". La teoría y los ensayos de campo y laboratorio deberán recibir por tanto la confirmación de las pruebas a escala natural y las auscultaciones de la obra en servicio. Las pruebas de carga pueden y *deben* alcanzar estados de rotura, única manera de evaluar el margen al fracaso que la teoría nos deja prever. Una prueba de carga que no alcance la rotura es, en general, poca ayuda al progreso de la Mecánica de suelos. Naturalmente las mediciones sobre la obra ejecutada no permiten observaciones a escala natural en estados cerca de rotura. Por lo menos, no permiten normalmente tales observaciones, si como

ocurre casi siempre, la obra está holgadamente proyectada y bien ejecutada. Se comprende que sólo los fracasos brindan ocasiones de observar en la realidad los estados de rotura.

Excepcionalmente en Sudáfrica se han construido casas experimentales, debidamente instrumentadas, en estructura y cimiento, sobre arcillas expansivas. La destrucción de las casas al ocurrir el hinchamiento del suelo, constituyó un formidable medio de estudio programado. Casos como éste son realmente muy infrecuentes, como puede comprenderse.

Pero como los fracasos no se anticipan, carecemos de una previsión o programa de ensayo, que hubiera permitido fijar ciertas variables del problema para así interpretar más fácilmente las variables dejadas libres en el ensayo. Consecuencia: enjuiciar los fracasos es tarea muy compleja, propia de un equipo de especialistas, que, por supuesto, debe recibir cuanta información exista y en forma absolutamente fidedigna. Desgraciadamente, el amor propio de los individuos o de los grupos profesionales no siempre es superado por un responsable sentido de servicio a la Comunidad, de humilde aceptación del fracaso, de tributo sincero a los perjuicios ocasionados, que, a veces, alcanzan el precio incalculable de la vida misma. Se comete así la grave traición de ocultar información a los expertos y sus peritajes no aportan gran cosa, o lo que es peor, desvían la Mecánica de suelos hacia caminos falsos, que la alejan del progreso.

Afortunadamente y con frecuencia, la sinceridad prevalece; prueba de ello es que la Ciencia avanza. Pero el calificativo de traidor para el Técnico incapaz de mirar lejos, no creemos deba sonar a exagerado.

(Continuará)

