

De todos son conocidos los numerosos problemas planteados por la mecánica del suelo, en relación con los esfuerzos que ha de soportar al servir de asentamiento a determinadas estructuras de edificación.

Entre todos los tipos de suelo, cuya clasificación y estudio detallado de ellos se sale de los límites del presente artículo, merece especial mención el comportamiento de los materiales arcillosos, de cuya estructura molecular se deduce la disposición en láminas paralelas de los silicatos constituyentes, particularidad que, unida a la presencia de cationes permutables, susceptibles de variar la capacidad de adsorción de aguas entre las diferentes capas, permite el desarrollo en forma notable de los fenómenos capilares, responsables, en gran parte, de los fenómenos de retracción y cohesión de los suelos, fenómenos ambos, resultantes de la tensión superficial del agua, como consecuencia a su naturaleza dipolar.

El origen de los suelos es muy variado, (depósitos fluviales, lacustres, marinos, cólicos, etc.) pero podemos decir, de forma general, que dadas las características de deposición y composición, los de origen marino son los más permanentes en lo que a composición y estabilidad se refiere. No obstante el hecho de encontrar depósitos arcillosos endurecidos e incluso superconsolidados, por sobrecargas, por sequía o por acción química, el conjunto es susceptible de ablandarse a consecuencia de una posterior saturación de agua, dando lugar a equivocaciones en cuanto a su capacidad de resistencia. Independientemente del origen y composición de los suelos, puede decirse que todos los procesos de modificación reciente en los mismos, pueden atribuirse a un movimiento del grado de humedad hacia el interior del depósito, de ahí que el nivel freático de las formaciones, sobre las que haya de proyectarse cualquier estructura, está íntimamente ligado con la resistencia de los suelos que han de soportarle, sin olvidar que en regiones muy áridas, pueden darse movimientos asensionales de humedad, como consecuencia de fenómenos capilares desarrollados a favor de niveles de agua más profundos.

Por otra parte, suelos de naturaleza primitivamente distinta, dan lugar, por determinados procesos de descomposición química de los minerales de la roca madre componente, a suelos arcillosos cuya potencia y estructura puede deducirse del correspondiente perfil edafológico.

De los diferentes estudios fisicoquímicos y de la estructura cristalina de los suelos, se deduce que pueden ser adsorbidos determinados iones existentes a la superficie cristalina de los materiales componentes de las arcillas, dando lugar a la adsorción de moléculas de

agua (dipolos) cuyo número crece con la carga del catión incorporado y con el radio iónico, dando lugar a la absorción de moléculas de adsorción cuyas propiedades son muy diferentes del agua ordinaria, debido a la gran presión a que están sometidas, como consecuencia de las fuerzas electrostáticas de adsorción, estimándose como promedio de presión de adsorción de agua (según Winterkan y Bayer) 20.000 kg/cm<sup>2</sup>, cuya cuantía hace crecer marcadamente el punto de solidificación de agua, lo cual explica los cambios de volumen experimentados en las arcillas como consecuencia de heladas y deshielos.

El tamaño, forma y drenaje de las partículas componentes del suelo, tienen considerable importancia en la explicación de muchos fenómenos relacionados con el comportamiento de los suelos, tales como la plasticidad o facultad de una sustancia, susceptible de sufrir grandes deformaciones al corte sin romperse, al ser sometidas a diferentes esfuerzos.

En el caso de los suelos arcillosos o de grano fino, la estructura resultante no es compacta, debido a las fuerzas electroquímicas de atracción entre las partículas escamosas, dando lugar durante el proceso de sedimentación, a estructuras arracimadas cuyo volumen de huecos es mucho mayor que en una estructura granulada ordinaria (suelo arenoso). La rotura de su estructura, origina una compresión del suelo y, como consecuencia, una amplia variación de su densidad y contenido de humedad, y consecuentemente, a una disminución apreciable de la resistencia al corte del suelo y aumento de comprensibilidad del mismo.

Durante el proceso de formación, las arcillas presentan una consistencia parecida al barro líquido, pero a medida que disminuye el volumen de sus huecos, pierde su capacidad de fluir, bien por el peso de las diferentes capas superpuestas o por la pérdida de agua experimentada; dando lugar a un estado intermedio plástico, capaz de variar de forma, sin disminuir apreciablemente su volumen. Sometido a compresiones posteriores o a fenómenos de desecación, pierde sus propiedades plásticas, alcanzando así su estado semisólido, capaz de desmoronarse al intentar moldearlas. Por un proceso de desecación posterior, las arcillas alcanzan finalmente un estado, en el cual no es posible reducir más su volumen, es decir, se ha producido su "retracción", fenómeno que va acompañado de cambio de color, haciéndose más clara al alcanzar su estado sólido.

El límite de "retracción" de un suelo se define, en su valor exacto, por cambios de características físicas dependientes de fenó-

menos capilares del agua, cuya tensión superficial, responsables del ascenso en los finísimos capilares, es de 0,0764 grs/cm., siendo mayor la altura de ascenso cuando mayor afinidad existe entre el agua y el material componente del capilar; tal como ocurre entre las arcillas y el agua.

Para alcanzar el equilibrio, se requiere que el peso del agua arrastrada por la fuerza de la tensión superficial, sea igual a la componente vertical de dicha fuerza, lo cual se produce cuando el ángulo que forma la pared del tubo y la superficie del menisco es igual a cero.

Por otra parte, a la fuerza ascensional del agua en el capilar, se opone la reacción que comprime las paredes capilares, cuya conducta puede hacerse patente al observarse la evaporación del agua existente en su interior.

En cuanto comienza la evaporación, causante de un menisco ligeramente curvado, se produce un menisco ligeramente curvado, un ligero acortamiento de la columna de agua y en el capilar, si continua la evaporación, el fenómeno progresa simultáneamente. Como consecuencia, la componente de la tensión superficial del agua, según el eje del tubo, aumenta, originando un acortamiento del mismo capilar. Cuando la resistencia creciente del capilar iguale el máximo posible de la fuerte compresión, se detendrá el acortamiento. Simultáneamente, si la evaporación continua, el menisco descenderá dentro del capilar, de tal forma que si su naturaleza es perfectamente elástica, al ser nuevamente hidratado volverá a recobrar su longitud original.

La determinación del ascenso capilar en un terreno tiene gran importancia en lo que a su comportamiento se refiere, ya que es susceptible de hincharse durante las heladas, por adsorción de aguas subterráneas, permitiendo la formación de cristales de hielo. Este ascenso capilar, puede medirse por observación directa en un tubo de cristal, (capilaridad activa) o midiendo en un aparato especial la succión necesaria para vencer las fuerzas capilares de los huecos, (capilaridad pasiva) que se hace patente mediante el descenso, por drenaje, del nivel freático.

La máxima compresión posible que pueden desarrollar las fuerzas capilares, en un suelo sujeto a desecación viene expresada por la fórmula de Terzaghi,  $p = \frac{0.306}{b} \text{ g/cm}^2$ , en que  $p$  = compresión máxima y  $b$  = longitud del lado de la abertura capilar, de sección cuadrada y llenando toda el área, sus valores pueden ser muy considerables a causa de las denominadas grietas de retracción.

En cualquier caso, la disminución de volumen o "retracción" de un suelo arcilloso, se debe a fenómenos capilares, cuya actividad se detiene al llegar al "límite de retracción",

valor a partir del cual los meniscos de agua retroceden hacia el interior de la arcilla, con el consiguiente cambio de color de las arcillas, a más oscuro. En resumen, el resultado de tal fenómeno se traduce en un considerable aumento de presión, que da lugar, en la superficie de los materiales arcillosos a la formación de las denominadas grietas de retracción o "bujeo". Pero debido a que las arcillas son perfectamente elásticas, el proceso no es totalmente irreversible, aun cuando se intente restaurar el grado de humedad primitivo de los mismos.

El asiento de un suelo se origina principalmente por la reducción del volumen de los poros, siendo prácticamente despreciable el asiento producido por la reducción de volumen de los granos del esqueleto componentes del suelo. En consecuencia, si los huecos de un suelo se hallan completamente llenos de agua, el asiento únicamente puede producirse por la expulsión de la misma. Al proceso provocado por las fuerzas estáticas de gravedad, el peso del suelo y el de las estructuras levantadas sobre él, se llama "consolidación" o asiento gradual.

En el caso de un suelo permeable (p. ej. si se trata de arena) la consolidación por aplicación de las cargas estructurales, se produce casi instantáneamente ya que el agua contenida en los poros no encuentra ninguna dificultad para salir de los huecos. Por el contrario, en el caso de una arcilla cuya permeabilidad es muy baja, así como la velocidad de salida del agua intersticial, el proceso de consolidación, es muy lento. No obstante con el tiempo parte del agua de la arcilla escapa a través de los contornos permeables de la misma, cuando existen, con la consiguiente reducción de volumen, equivalente al del agua expulsada. El resultado se traduce en una unión más íntima, entre los granos del esqueleto del suelo, lo cual se traduce en adsorción de parte de la carga aplicada, denominados tensiones efectivas que contribuyen al aumento de la resistencia al corte del suelo, mientras que las presiones soportadas por el agua existente en los huecos no influye en el aumento de dicha resistencia, recibiendo por ello el nombre de "tensiones neutras".

Por tanto resulta de indudable interés práctico, efectuar ensayos de consolidación de suelos, con objeto de conocer la duración del asentamiento de estructuras erigidas sobre bancos de arcillas, así como el aumento de resistencia al corte de las mismas, en razón directa con las tensiones efectivas, cuya magnitud puede aumentarse mediante la realización de drenajes convenientemente dispuestos.

Ofrece especial interés para consolidación

de suelos, constituidos por capas arcillosas, la teoría de Terzaghi cuyo esquema general es como sigue:

Consideremos una capa de arcilla, de espesor dado entre, dos capas de arena permeable, sometida a la acción de esta carga, la capa de arcilla comenzará a comprimirse a medida que el exceso de agua intersticial es expelida hacia el contorno permeable de arena. Si la capa de arcilla es homogénea, el exceso de agua de la mitad superior fluirá hacia arriba, mientras que el agua de la capa inferior irá hacia la capa arenosa de abajo.

Teniendo en cuenta que la presión aplicada  $p$  es en todo momento la suma de presiones efectiva ( $pe$ ) y neutra ( $u$ ) en el instante ( $t_0$ ) que se aplica la carga, toda la presión aplicada, de forma que las presiones neutras en ambas zonas permeables será nula. En instantes sucesivos, las leyes de presiones neutras y efectivas están representadas por sus correspondientes curvas, cuya pendiente en un punto dado indica la velocidad de variación de la presión neutra, con la profundidad en el instante correspondiente, que, a su vez es el gradiente hidráulico del cual depende la velocidad de expulsión del exceso de agua de los poros.

Como quiera que la justificación matemática se sale de los límites de este artículo, resumiremos diciendo que el porcentaje de consolidación ( $U$ ) en una capa, a una profundidad ( $z$ ) viene expresado por la fórmula

$$U_z = \left(1 - \frac{u}{p}\right) 100$$

En la práctica se calcula el tiempo necesario para la consolidación de una capa, en función del coeficiente de permeabilidad y el espesor de la capa, siendo independiente de la presión aplicada.

En algunos tipos de arcillas, el factor tiempo produce una serie de efectos secundarios, como consecuencia de un progresivo deslizamiento de grano sobre grano, a medida que las partículas se adaptan al estado más denso.

El tiempo necesario para alcanzar un cierto grado de consolidación, varía con el cuadrado del espesor de la capa, es decir, con el cuadrado de la distancia que ha de recorrer una molécula de agua hasta llegar a la zona permeable, circunstancia que permite acelerar la consolidación de bancos potentes de arcillas, mediante la aplicación de drenes verticales de arena. Si la separación entre éstos es notablemente inferior al espesor de la capa, se acelera notablemente el proceso de consolidación.

Se ha demostrado que todas las deformaciones de la arcilla, durante su consolidación, están exclusivamente determinadas por la

velocidad de expulsión del agua de los huecos. Según esto cabe esperar que los asientos superficiales de terreno, fueran mayores en las proximidades de los drenes que en puntos alejados de ellos; especialmente en los casos de superficies de drenaje horizontales.

Por otra parte se ha confirmado, experimentalmente, que las tensiones tangenciales a lo largo de los contornos verticales permeables y rígidos, pueden, hasta impedir los asientos superficiales de arcillas blandas en su proximidad inmediata. Estos asientos se rigen, entonces por desplazamientos plásticos de trayectorias curvilíneas de la masa total de la arcilla blanda, hacia el contorno permeable, circunstancia que puede producirse en las proximidades de pilares de madera u hormigón, pero no cerca de drenes de arena, dada su naturaleza compresible.

El estudio detallado de la distribución de tensiones en el suelo ha demostrado la falsedad de una serie de principios que venían siendo aceptados abiertamente, por los técnicos como verdaderos, hasta hace escasamente veinte años. A continuación relacionamos algunos de ellos:

- A) "Si se distribuyen uniformemente las cargas, sobre un área de la superficie de un terreno homogéneo, el asiento de dicha área es también uniforme". Sabemos ahora, que el asiento máximo se produce en el centro del área, y que la superficie tiende a tomar una forma parecida a la de un plato.
- B) "Las capas de un terreno inmediatamente debajo del cimientamiento originan la mayor parte del asiento que experimentan". Hoy conocemos la inexactitud de tal aseveración, ya que capas profundas de terreno débil, bajo la cimentación, pueden causar asientos superficiales y roturas considerables de la superestructura.
- C) "El asiento de una cimentación depende exclusivamente de la naturaleza del terreno subyacente y de las presiones aplicadas a su superficie". Grave error, ya que en igualdad de condiciones de terreno y presiones, una cimentación de mayor superficie tiende a sentar más que otra de pequeña superficie.

Presenta especial interés el concepto de "carga de hundimiento" definido como el valor extremo de la presión media, ejercida sobre superficie que produce la rotura, por deslizamientos, de la masa del terreno. Algunos valores de presión máxima, han sido calculados por Prandtl, en función del ángulo de rozamiento interno y de la resistencia a la compresión total.

En sumen, es de especial interés ejecutar un estudio previo de la naturaleza, condiciones y características del suelo, que, ha de soportar estructuras, con objeto de poder prever la

variación y mecánica del mismo, al ser sometido a las condiciones específicas de cada caso.

Para ello es necesario efectuar un estudio científico del suelo, por procedimientos geofísicos, mecánicos y de laboratorio, que nos permitan determinar los factores más importantes, que pueden influir en el comportamiento del suelo; frente a los esfuerzos creados por las estructuras suprayacentes; cuyo costo frente a la magnitud de los problemas que pueden resolverse, a priori, quedan diluidos en la fase de anteproyecto y estudios de viabilidad de los mismos.

Para el reconocimiento de los suelos, se dispone de una serie de métodos, directos e indirectos, que permiten conocer la naturaleza litológica de las diferentes capas, su estructura, nivel freático y permeabilidad de los diferentes horizontes que le constituyen.

Existen varios procedimientos indirectos, cuya finalidad es conocer la naturaleza y espesor de las capas profundas del suelo, mediante la determinación de sus características magnéticas, gravimétricas, sísmicas o eléctricas; si bien para poder efectuar una interpretación satisfactoria de los resultados obtenidos, deben compararse con los proporcionados por un sondeo mecánico, ejecutado en el mismo emplazamiento, con objeto de conocer la columna litológica real de dicho punto.

El procedimiento sísmico consiste en promover una conmoción del terreno en un punto y momento dados, y medir el tiempo que transcurre hasta la primera aparición de la misma en puntos más o menos alejados. Dicha conmoción, es producida por una carga explosiva dispuesta a una profundidad del suelo convenientemente alojada, dentro de una perforación. En caso de medidas superficiales, dicha carga puede ser reemplazada por un simple martillazo. En cualquier caso, el objeto es provocar una sacudida al terreno capaz de provocar unas vibraciones longitudinales, cuya velocidad de transmisión variará con la naturaleza de las capas atravesadas y con los coeficientes de elasticidad y de Poisson, lo cual unido a los datos geológicos, permite determinar el espesor y naturaleza de las formaciones investigadas.

La conmoción provocada y la distancia de la misma al emplazamiento de los sismógrafos, registrarán una onda reflejada sobre el techo de la capa profunda (sísmica por reflexión) o una onda refractada por la capa inferior (sísmica por refracción).

De todos los métodos indirectos de investigación geofísica del subsuelo, merece especial mención por su sencillez, rapidez y economía, el procedimiento eléctrico, en su modalidad de sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) y cali-

catas eléctricas, o perfiles horizontales de resistividad.

El método S.E.V. se basa en la determinación, desde la superficie, de la resistividad eléctrica de las distintas capas que componen el sustrato.

Se emplea para ello dos electrodos, denominados de corriente y designados, respectivamente, por las letras A y B, que, clavados en el subsuelo, introducen una corriente eléctrica de características adecuadas, producida por un generador especial.

Se produce así, en la superficie del terreno, una distribución de potencial eléctrico que depende del espesor y naturaleza de cada estrato del subsuelo. Dicha distribución, se estudia mediante un segundo par de electrodos llamados M y N, que van unidos a un milivoltímetro electrónico muy estable y de gran impedancia de entrada. Para realizar un sondeo eléctrico se transmite al terreno mediante los electrodos AB, una corriente eléctrica de intensidad conocida, alterna o preferiblemente continua, y se mide la diferencia de potencial existente entre los electrodos MN, cuya distancia es aproximadamente  $1/4$  de la de AB.

Conocidas la intensidad y la diferencia de potencial, se puede calcular la resistividad, que equivale, esencialmente, a la de un paralelepípedo de terreno cuyo espesor sea igual  $1/4$  de AB, su anchura  $1/2$  de AB y su longitud igual a  $3/2$  de AB. En consecuencia, si se aumenta progresivamente la longitud AB y se mantiene fija la relación AB, MN, podrán medirse las resistividades aparentes de capas de terreno, cada vez mayores.

La interpretación de las curvas obtenidas, se efectúa mediante su ajuste, comparándolas con una serie de curvas patrón, calculadas a tal efecto. Dentro de las configuraciones electrónicas posibles merece especial interés la configuración OP.

Consiste esta configuración en una variación del sistema de electrodos activos, único sistema en que la influencia del segundo electrodo se elimina prácticamente al alejarlo a suficiente distancia del perfil de medición.

El dispositivo de medida, es asimétrico y rectilíneo, en el que los dos electrodos de potencial permanecen fijos a ambos lados del punto que se trata de investigar, moviéndose un solo electrodo de emisión, aumentando progresivamente su distancia al centro del dispositivo.

Conocidas la intensidad de la corriente introducida, y la d.d.p. que aquella origina en el subsuelo, en este caso el medio resistente, puede calcularse su resistividad en función de las magnitudes antes citadas y de un coeficiente que depende de la geometría del dispositivo utilizado.

Ahora bien, cada roca o estrato posee una resistividad propia, función de su porosidad, permeabilidad, humedad, etc. Como el volumen y la profundidad de la masa del terreno cuya resistividad se mide, es proporcional a la separación de los electrodos, al aumentar progresivamente su distancia, al centro del dispositivo de medida, se obtiene un perfil de resistividades aparentes que es función, de la resistividad verdadera de las capas del subsuelo y la profundidad de penetración de la corriente.

De las medidas efectuadas, se obtiene en suma, una curva que expresa la variación, de las resistividades aparentes, con la profundidad.

El método de perfiles horizontales de resistividad o calicatas eléctricas, consiste en el desplazamiento, y a lo largo de un perfil rectilíneo, de una configuración electrodo fija, eso es, tal que no se altere la posición de investigación o penetración teórica del dispositivo que puede suponerse constante.

Para la medición de las calicatas eléctricas puede utilizarse cualquier dispositivo o configuración electrodo de los empleados para la realización de sondeos eléctricos verticales. Pero resulta muy conveniente el método OP, ya descrito, que expresa la variación de las resistividades aparentes a lo largo del perfil investigado y a profundidad constante.

Los procedimientos directos de reconocimientos de los suelos están basados en la ejecución de una serie de sondeos convenientemente dispuestos y con características de diámetro y profundidad adecuada, que nos permitan obtener muestras de los diferentes materiales componentes del subsuelo, mediante el empleo de un "sacatestigos", capaz de proporcionar muestras representativas de las formaciones existentes en profundidad. De esta forma podremos someter las muestras obtenidas a los ensayos de laboratorio necesarios, en cada caso, que permitirá diagnosticar de forma real su comportamiento mecánico, una vez sometidos a las circunstancias específicas de cada caso.

Personalmente, según datos experimentales obtenidos, creo que, antes de promover cualquier labor mecánica de perforación, debe efectuarse un reconocimiento geofísico; por procedimientos eléctricos, con objeto de obtener los suficientes datos estructurales y litológicos, que permitirán un racional emplazamiento de los sondeos mecánicos de investigación y de esta forma testificar los datos requeridos en aquellos puntos que elegidos, a priori, puedan plantear problemas concretos; y de esta forma, reducir el número de perforaciones, con la consiguiente economía que ello supone.