

ALGUNAS ACLARACIONES SOBRE LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS EN SUELOS COLAPSABLES EN NAVARRA

Antonio Aretxabala Díez

El presente escrito tiene por objeto aclarar algunas de las cuestiones que han suscitado curiosidad y han abierto interrogantes sobre el comportamiento, muy poco comprendido, de los terrenos de varias zonas de la Ribera de Navarra. Estos han desencadenado serias patologías en edificación y en otras construcciones.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se persigue mostrar el comportamiento poco usual ante distintos ensayos geotécnicos tanto “in situ” como de laboratorio de los denominados “suelos colapsables” navarros, aclarar por qué ante ensayos cotidianos como la placa de carga o el penetrómetro, por citar dos ejemplos conocidos, aparentemente un mismo terreno se comporta como si se tratase de dos terrenos diferentes, dando datos extraños o engañosos, mostrando dos caras que han traído más de un problema de planteamiento proyectivo. Por otro lado, tal comportamiento está íntimamente ligado a la génesis de estos suelos y su posterior evolución, al clima de la Ribera y al sustrato sobre el que evolucionan. Por ello se incluye un pequeño comentario en el que se evita en lo posible el lenguaje excesivamente técnico.

Los suelos colapsables navarros han dado serias patologías en localidades como Falces, Lodosa, Milagro, Arguedas, entre otras, pero es especialmente conocida y famosa, por el número de ellas y por el tamaño de las mismas, la localidad de Peralta.

¿QUÉ ES UN SUELO COLAPSABLE?

Un suelo colapsable es aquel susceptible de desmoronarse y perder su estructura íntima de una forma rápida, provocando, evidentemente, una perturbación física en el entorno a partir de una reacción en cadena.

El símil que más se asemeja al comportamiento de un suelo colapsable es el que obtenemos al imaginarnos el colapso de un castillo de naipes. El proceso de colapso así imaginado no dista mucho de la realidad de un terreno como los que aquí vamos a analizar, no obstante, si agudizamos la mirada vuelta hacia el castillo de naipes, no se nos escapa que:

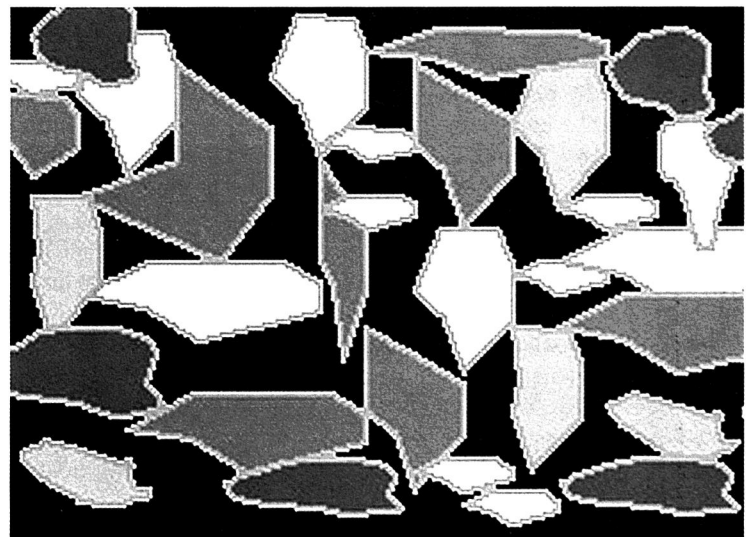
- Es una estructura en la que las partes involucradas (los naipes) se tocan en puntos o más bien líneas que suponen un porcentaje muy bajo de superficie en relación a su superficie completa.

- Los “huecos” entre naipes suponen una parte muy importante, la mayor parte, del castillo como estructura, siendo los naipes algo exclusivamente “constructivo”, algo que en relación a los huecos suponen cuantitativamente una parte muy pequeña, pero que realmente definen la unidad “castillo de naipes”, así sin ellos, o sin los huecos, no existe castillo.

- Cuando vemos colapsar un castillo de naipes es porque previamente estaba construido y algo externo, una fuerza externa, no inherente a la estructura, soplido, empujón con el dedo, o movimiento de la mesa en que se apoya introduce una perturbación que en un momento supera las fuerzas de unión entre los naipes, las cuales solamente pueden buscarse en una interacción entre la gravedad y las fuerzas de rozamiento y autosoporte.

Si ahora nos imaginamos que en vez de naipes lo que vamos a estudiar es un volumen determinado de terreno que se asemeje a dicha descripción, tendremos partículas de suelo, huecos, una construcción de moderada estabilidad y un colapso por alguna perturbación externa.

Pero, semejante estructura interna, parece tan inestable que cuesta mucho imaginar cómo a través de los años, de los siglos y de los milenios algún terreno haya podido evolucionar a algo así sin haberse desmoronado previamente. ¿Cómo es posible que tras enormes intervalos de tiempo, con cambios climáticos extremos, con perturbaciones de todo tipo, pueda prevalecer una estructura aparentemente tan inestable? ¿Puede ser que en realidad la estructura es el resultado último de un proceso evolutivo, que precisamente culmina en algo como lo descrito, y por lo tanto existe algún tipo de fuerza cohesiva que se nos escapa? ¿Qué papel juega el agua entre los poros de semejante estructura?



Estructura interna en 'castillo de naipes' de un suelo colapsable

El profesional que se inicia en la Mecánica de suelos y rocas, suele razonar con aparente lógica que la composición de las partículas individuales de un elemento de suelo o terreno constituye una característica importante del mismo. Esta creencia es falsa en cuanto que existen muy pocas relaciones útiles entre la composición de un suelo o roca y su comportamiento. Por otro lado, tal creencia es cierta en lo que se refiere a un conocimiento fundamental del comportamiento. La naturaleza y disposición de las moléculas de mineral, agua y aire en un pequeño volumen de un terreno colapsable, es decir, su composición, tiene una considerable influencia sobre la permeabilidad, resistencia, y transmisión de los esfuerzos, tanto mayor cuanto más se acerquen al tamaño arcilla-limo sus partículas. Existen ciertas disposiciones minerales que pueden conferir propiedades no usuales al material que los contiene. Así pues, el profesional que trate con estos materiales necesita conocer su composición si quiere entender los fundamentos del comportamiento de las partículas con estructura de castillo de naipes y, en particular, la variación de este comportamiento con el tiempo, la presión y las condiciones exteriores.

Todas las partículas de suelo poseen una carga eléctrica. Aunque teóricamente una partícula puede poseer carga positiva o negativa, solamente se han medido cargas negativas. Además de la carga eléctrica neta, una partícula de terreno puede poseer una carga de distribución, pues no suele coincidir el centro de la carga negativa con el de la carga positiva debida a enlaces estructurales. Análogamente los enlaces cristalinos de una partícula dan lugar a cargas locales.

Como la magnitud de la carga eléctrica está en relación directa con el área de la partícula, la influencia de esta carga sobre el comportamiento de la partícula en lo que se refiere a las fuerzas de masa (o sea, su peso) estará directamente relacionado con el área por unidad de masa (superficie específica), dato muy importante en la influencia relativa de las cargas eléctricas sobre el comportamiento de la partícula.

El término coloide se emplea para describir una partícula cuyo comportamiento viene controlado por fuerzas de tipo superficial, en lugar de por fuerzas de masa.

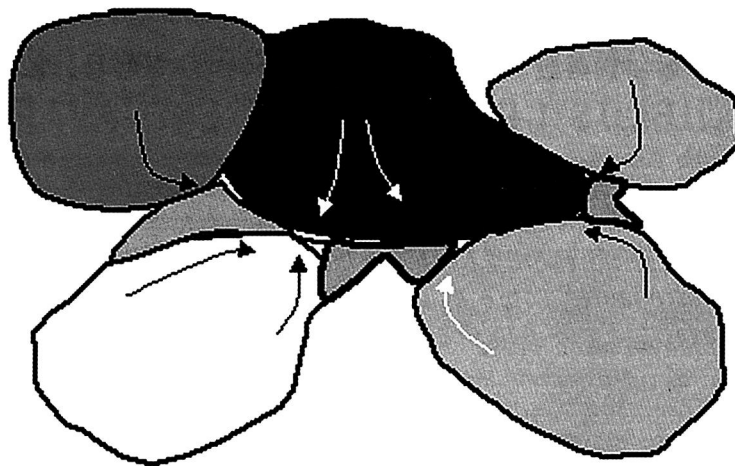
Una partícula de arcilla es un coloide debido a su pequeño tamaño y forma irregular. Cuanto más pequeña es una partícula mayor es su superficie específica.

La gama de tamaños de los coloides se ha fijado entre 1μ y 1μ . Por debajo de 1μ se encuentran los diámetros de átomos y moléculas. La mayoría de las partículas de tamaño superior a 1μ vienen influidas predominantemente por fuerzas de masa. También se ha propuesto una superficie específica de $25\text{m}^2/\text{g}$ como límite inferior de la fracción coloidal. Los principios de la química coloidal son muy útiles para comprender el comportamiento de las arcillas.

Las partículas de limo o mayores tienen superficies específicas menores de $1\text{m}^2/\text{g}$, es decir, considerablemente inferiores al límite inferior de la fase coloidal.

Una partícula de arcilla en la naturaleza, atrae iones para neutralizar su carga neta. Estos iones atraídos, iones intercambiables o iones de cambio, se disponen alrededor de la partícula con un leve enlace sobre su superficie. La partícula con los iones de cambio es neutra. En este caso, a la fuerza de rozamiento entre las partículas, se le suma la "atracción" electrónica y la fuerza capilar.

Hasta aquí queda aclarado que las causas responden a una dinámica que no estamos acostumbrados a manejar, es decir, que las



Meniscos de agua adheridos entre partículas con esquema de las fuerzas de capilaridad

leyes que rigen el comportamiento de algunas partículas no responden al mero rozamiento y peso, sino que fuerzas hasta ahora poco consideradas como la atracción electrónica o las fuerzas de atracción capilar, tienen un papel protagonista en esta historia, más protagonistas cuanto más pequeña es la partícula. Por lo tanto, nos queda la pregunta: ¿Pero, cómo son realmente los suelos colapsables y cómo han llegado a ser lo que son?

GÉNESIS DE LOS SUELOS COLAPSABLES

Como todos los suelos, por definición compuestos de materiales sueltos, granulares, orgánicos, químicos, etc, su formación es una acumulación de partículas provenientes de la diseminación diferenciada de material originario de las rocas, normalmente, de rocas cercanas.

El denominador común en cuanto al nacimiento de éstos es la existencia de una "Roca Madre" margosa y yesífera: el terciario continental de las localidades involucradas comparten formaciones rocosas de esta naturaleza por toda la ribera, Formación Cárcar, Yesos de Falces, Formación Lerín, e incluso los mismos residuales formados más tarde en el cuaternario tienen denominaciones locales, como las Terrazas de Cadreita, etc.

La roca margosa es una mezcla de elementos terrígenos silicados y calcáreos, el yeso es un mineral compuesto por $\text{SO}_4\text{Ca}+2\text{H}_2\text{O}$, soluble al agua y famoso por su poder de agresividad a las cimentaciones de hormigón ejecutado sin cementos SR. Esta solubilidad al agua es crucial a la hora de estudiar la estructura final en "castillo de naipes" antes comentada.

Dado que la marga en general necesita tiempos de ataque mayores y su evolución a merced de los agentes atmosféricos es más física o mecánica al principio, los trozos desprendidos de marga y yeso se acumulan en depósitos potentes que llamamos suelos. El tamaño predominante en estos depósitos es el correspondiente a limo, aunque también están presentes otras fracciones (arena, arcilla y hasta gravas). Ello es muy importante a la hora de estudiar su comportamiento geotécnico. Ya en la deposición este tipo de fuerzas electrónicas "ordena", de alguna manera, una estructura poco común, pero el proceso que ya comienza siendo poco común evoluciona igualmente de forma no convencional.

Posteriormente, una solubilización selectiva del agua de lluvia "elimina" el yeso (ahora huecos), haciéndolo desaparecer literalmente. ¿Qué es lo que queda? Lo que queda es una estructura de

suelo en la que las partículas de margas y lo que queda de yeso sin solubilizar comparten las vacantes del yeso desaparecido, es decir, así se forma la estructura en castillo de naipes, estos terrenos presentan porosidades que llegan a más del 40% y hasta más del 60%.

¿Por qué no colapsa esta estructura? Porque a las fuerzas puras del rozamiento entre las partículas se añaden las de naturaleza eléctrica suministradas por el agua y las de capilaridad de adhesión de las moléculas de agua, que provocan una verdadera cohesión. Cuando se desencadena una patología en estos terrenos, con la primera generación de deformaciones se presupone la existencia de huecos en los terrenos cuaternarios (40 - 60%) son los responsables más directos de dichas patologías, éstos tienden a cerrarse de forma natural. Un pequeño impulso puede generar un colapso en el suelo.

Estos huecos se encuentran en un estado de semisaturación, es decir, aparecen con humedades de saturación en torno al 50 - 80%, lo que les confiere unas fuerzas de unión a las partículas que vamos a llamar endógenas ya que el agua, presente en el porcentaje dado, hace que las fuerzas, en este caso y al contrario que en los suelos saturados, se localicen en los meniscos situados en los mismos contactos entre partículas y actúan normalmente al plano tangente a las mismas. Éstas aumentan la resistencia a la separación o al deslizamiento del contacto y, en cambio, no producen ninguna tendencia a deslizamientos o reordenaciones de las partículas, como lo producen las demás tensiones efectivas que vamos a llamar exógenas o impuestas desde el exterior de la estructura del suelo. Dichas fuerzas endógenas son una parte muy importante a tener en cuenta a la hora de valorar el sostenimiento de las edificaciones antes de ninguna actuación de fuerzas exógenas, pues confieren al esqueleto de partículas minerales una auténtica cohesión y, por lo tanto, un aumento de la resistencia intrínseca del conjunto del suelo.

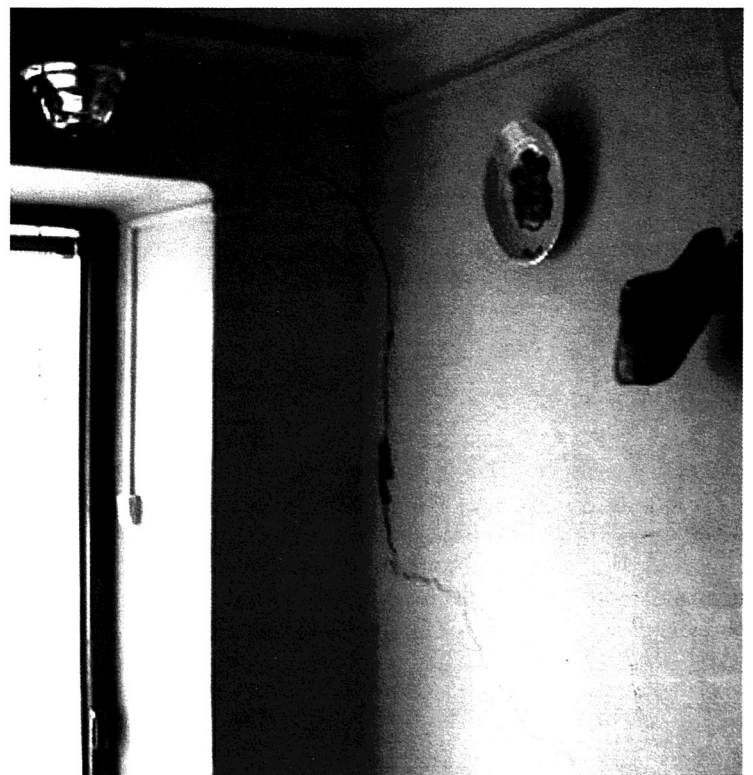
Dada la estructura y disposición de las partículas de suelo inherentes a su naturaleza limosa y soluble (seguimos pensando en un castillo de naipes), hace que una disposición de un terreno de una potencia determinada, pueda en un momento dado, por una fuerte inundación por ejemplo, colapsar (como la caída del castillo de naipes). En este momento, la actuación de fuerzas exógenas explica la aparición de dos hechos. Por un lado, el colapso: las tensiones efectivas endógenas refuerzan mucho la estructura del suelo; si las disminuimos e incluso aumentamos el sumando exógeno, se producirá una lubricación entre partículas y una pérdida de cohesión, dando como resultado la reordenación más estable y equilibrada de las partículas con una pérdida de volumen. Este punto lo hemos estudiado en el laboratorio con muestras de suelo tomadas en calicatas o sondeos y con presiones de confinamiento variables, provocando una repentina inundación de la muestra y midiendo sus deformaciones antes y después de la misma, siendo el resultado variable dependiendo de la muestra, la profundidad, las condiciones iniciales y la presión de confinamiento.

A pesar de la dependencia de tantas variables, los resultados muestran valores que podemos utilizar de modo cualitativo para observar que dicho fenómeno ha sido en parte el culpable de muchos de los primeros o inmediatos asentamientos de edificios. Posteriormente y una vez inundado el terreno, la historia de deformaciones sigue su curso normal correspondiente a un terreno saturado.

Por otro lado, el aumento de volumen (pequeño) del suelo al secarse: sobre todo aquellas partes del mismo no confinadas. Al retirarse el agua, de ocupar una parte importante de los poros, a unos meniscos localizados en los contactos, se puede dar un cierto esponjamiento de la estructura interna pues vuelven a tomar las riendas las fuerzas endógenas, siendo la recuperación de volumen mayor en las zonas no sometidas a carga (periferia de los edificios).



Patología por colapso en una vivienda situada en el pueblo de Mendoza. Véase la dirección izquierda-derecha del movimiento



Vista de la fachada desde el interior

DISOLUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE SULFATO

Lo expuesto en el párrafo anterior es una parte a tener en cuenta en la aparición de deformaciones en el terreno y por lo tanto de edificaciones afectadas; sin embargo, hay que añadir que las inundaciones provocadas desde el exterior, no solamente desbaratan el equilibrio mecánico preexistente en la estructura del suelo sino que, dada la susceptibilidad del mismo a la disolución, se suma su efecto desestabilizador al campo de la físico-química del mismo. Este aspecto ya ha sido tratado anteriormente, indicado por varios arquitectos e ingenieros, que han achacado la responsabilidad de las patologías a la naturaleza soluble del suelo. Al recibir una fuerte inundación, se produce la disolución de las partículas de yeso (presentes en un 20 - 60 %) induciendo al colapso del mismo por pérdida de materia sólida que es llevada por el agua en disolución (no se debe confundir este fenómeno con el tan renombrado “lavado del terreno”, hablamos de una disolución, de un fenómeno químico, no de arrastre), también la naturaleza de los materiales terciarios compuestos por yesos y margas es soluble. Este fenómeno también es aplicable a los mismos, aunque en menor medida y no a los casos que razonablemente no se ajustan a esta dinámica, ya que las fugas detectadas (Peralta, Lodosa, Cadreita, etc.) tendrían muchas veces que haber “subido” por la formación terciaria (las formaciones terciarias suelen encontrarse a cotas topográficas superiores dado que su dureza es mayor, ellas suministran el material, son la Roca Madre), algo que solamente podría haberse pro-

ducido por capilaridad y en ciclos sucesivos de forma que el acceso del agua no saturada en iones SO_4^{2-} , se realizase varias veces para poder volver a solubilizar parte de la roca. Por ello, debe estudiarse por un buen conocedor de la dinámica de las rocas y sus propiedades físicas, para no llegar a conclusiones un tanto fantásticas.

Este fenómeno de la disolución y el colapso en macizos rocosos terciarios es bien conocido en toda la ribera navarra pues es responsable de innumerables daños a edificaciones situadas sobre semejantes terrenos kársticos en las que no se han tomado las medidas de seguridad oportunas.

Sin embargo, el hecho de existir en muchas localidades corrientes de agua y aguas subterráneas, no quiere decir que con el tiempo todo el yeso vaya a desaparecer, pues una vez que dichas aguas se saturan en iones sulfato, dejan de solubilizar.

Esto nos sirve para ver que los argumentos varias veces sostenidos de escape de agua, solubilización y colapso cobran mucho peso, pues el agua que se escapa, al no haber estado previamente en contacto con sulfatos, no estaba saturada en iones, por lo que su avidez para solubilizar es muy elevada.

Por otro lado, estas presencias intermitentes de agua con sulfatos plagados por doquier, hace que la peligrosidad del terreno vaya a parar a otros aspectos hasta ahora no tenidos en cuenta, a saber: la agresividad de los iones en disolución al hormigón de las cimentaciones que, por lo que se ha visto en muchos proyectos, no ha sido tenida en cuenta.

COMPORTAMIENTO ANTE ENSAYOS GEOTÉCNICOS COMUNES

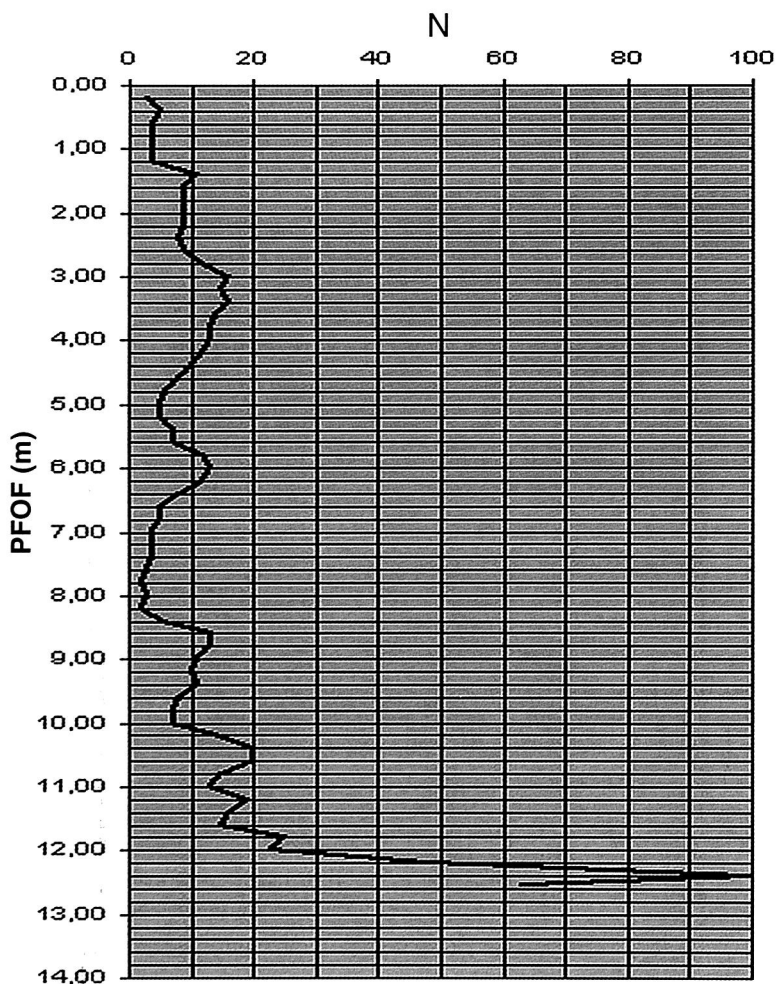
Como ya se ha adelantado, estos terrenos parecen tener comportamientos un tanto contradictorios ante los ensayos geotécnicos convencionales. Vamos a ver cuáles son éstos y por qué se producen; de esta manera no solamente desvelamos este hecho evidente sino que además nos prevenimos para futuras actuaciones a la vista de contradicciones en el mismo terreno.

Para empezar, diremos que los ensayos más rápidos, directos y económicos y, por lo tanto, los más extendidos son aquéllos de interpretar los golpes de los ensayos de penetración o de las gráficas carga-deformación de las placas de carga. No se suelen hacer ensayos de compresión en laboratorio por su desmoronabilidad; tampoco ensayos mecánicos previo desecado, pues suelen fraguar en el remoldeado.

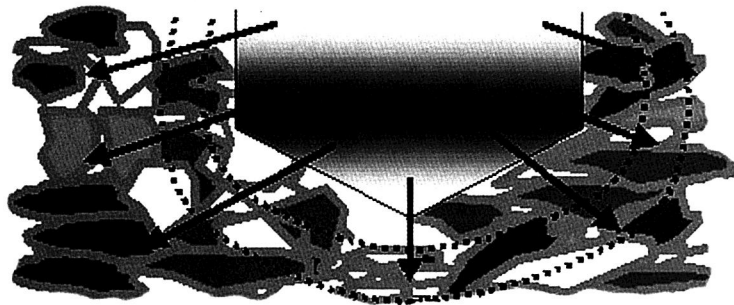
El penetrómetro mostrado está realizado en un terreno de estas características (concretamente en Milagro, en las Terrazas de Cadreita) siendo una vista rápida bastante engañosa. Vemos que se trata de un terreno de muy bajo golpeo, es decir, de una resistencia en punta muy baja, o lo que es lo mismo, un terreno de características geotécnicas muy deficientes.

Se puede observar un golpeo muy bajo (N) hasta los 10 m de profundidad, incluso menores de $N=7$ a esas profundidades, algo que nos indicaría una falta absoluta de homogeneidad y seguridad hasta los rechazos a más de 12,50 m. Decantándonos enseguida (a falta de más referencias) claramente por una cimentación profunda.

Sin embargo, la placa de carga que aparece a continuación habla de un terreno bastante favorable geotécnicamente, con un comportamiento elástico hasta la máxima carga (4 kp/cm^2) y sin observarse rotura del terreno aparente, ni colapso, ni indicios de perturbación.



Gráfica de resultados obtenidos en los ensayos con el penetrómetro



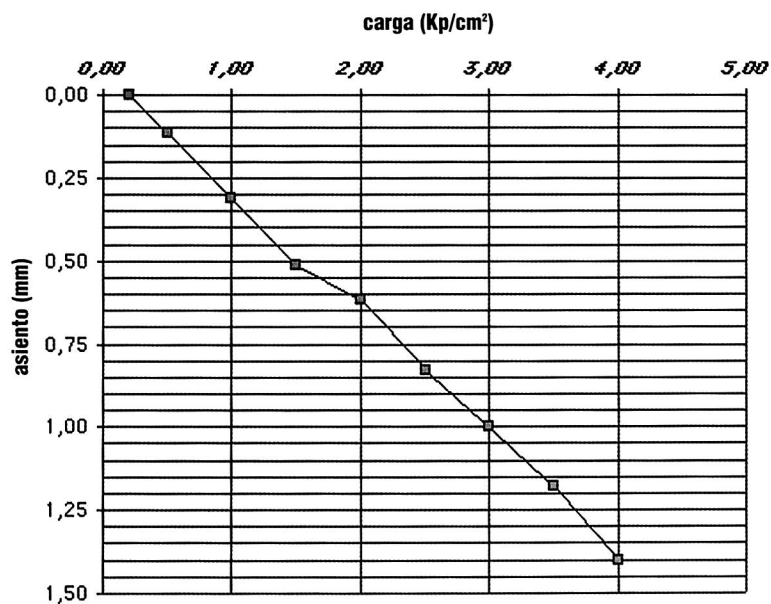
Perturbación introducida por la punta del penetrómetro y colapso por vibración en el entorno

La interpretación pasaría por una cimentación superficial de carga media, sin ningún problema, dado que a partir de esta gráfica se pueden estimar módulos de deformación en el entorno de los 800 ó 900 kp/cm², algo que dependiendo del tamaño de las zapatas podría llevarnos a prever asentamientos admisibles menores de 2 cm, o sea, hablamos de 2 - 4 kp/cm².

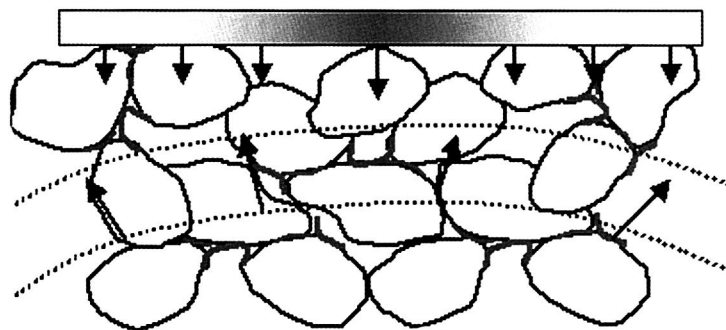
Pero, paradójicamente, el terreno es el mismo. Ahora surge la inevitable pregunta: ¿con cuál nos quedamos?

La lectura suministrada por el ensayo de penetración dinámica nos da una visión en profundidad que aporta una valiosa información cualitativa y cuantitativa, pero nosotros conocemos de antemano este material. Si esto no sucede, si nosotros no sabemos que se trata de un terreno predominantemente limoso y semisaturado, calcularemos una transmisión de esfuerzos acorde con los datos suministrados por este ensayo de penetración subestimando el comportamiento del terreno. Este prejuicio se debe (como todos) a un desconocimiento de la estructura interna del terreno, su comportamiento, su dinámica y su evolución.

El ensayo de penetración introduce una fuerte perturbación en el terreno que, en este caso, y para estos terrenos (esto no vale para suelos de otras naturalezas) vence las fuerzas endógenas y desmorona a su paso la estructura, colapsando al mismo tiempo que avanza, y presentando de esta manera un valor de N que no lleva implícito este fenómeno.



Placa de carga

Resistencia de las fuerzas endógenas ante un incremento de presión externa, $\Sigma f_i > \Delta \sigma$

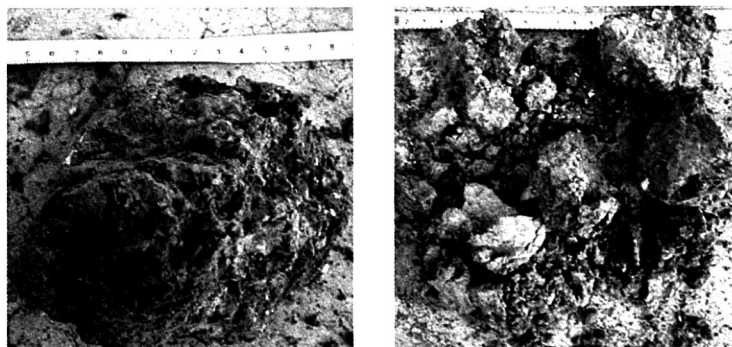
Si analizamos el ensayo de placa de carga, veremos que todo el esqueleto de suelo con sus fuerzas endógenas, de rozamiento, de confinamiento, etc. juegan un papel fundamental. Cada una de las pequeñas unidades involucradas (f_i) en el sostenimiento de la estructura, multiplicadas por un gran volumen nos daría una resistencia muy respetable (Σf_i), en este volumen se pueden suponer casi infinitas interacciones que sobrepasan la fuerza exógena (σ) de forma que la suma de las primeras puede con la segunda ($\Sigma f_i > \Delta \sigma$). Esto hace que el conjunto se comporte como un material elástico.

Por esta causa, los ensayos de placa de carga sí cuentan con el conjunto completo de fuerzas inherentes en el subsuelo y, por ello, los resultados se acercan mucho más a la realidad tensional que aquéllos con la perturbación correspondiente de penetración dinámica.

Ello no quiere decir que se subestime la aportación de dichos ensayos, pues con ellos se saben muchas cosas del terreno y de la distribución en profundidad de capas, en conjunto, un buen conocimiento geológico y la suma de ensayos de varias naturalezas suministran toda la información necesaria para conocer un terreno, cualitativa y cuantitativamente, en vertical y en horizontal.

Sin embargo, queda la pregunta: dado que la resistencia del terreno es alta debido a las denominadas fuerzas endógenas, entonces, ¿dónde yace el peligro?

El verdadero peligro que han provocado las patologías observadas radica en fuerzas exógenas repentinas, de las que las cimentaciones en sí no son responsables, entre ellas, cabe destacar la vibración producida por maquinaria de obra al trabajar en zonas cercanas y la más importante: el reventón y pérdida de agua de una tubería de conducción, la cual lubrica, como ya se ha explicado, el contacto entre partículas y provoca el desmoronamiento de la estructura, en este caso ($\Sigma f_i < \Delta \sigma$), dado que desaparecen las fuerzas de cohesión que suministran los meniscos de agua y las fuerzas eléctricas, a la par que el ángulo de rozamiento disminuye por la presencia de agua abundante.



Aspecto de un terrón típico de suelo colapsable antes y después de perturbarlo presionando con el dedo



Suelo colapsable por inundación repentina en una vivienda de Lodosa



Vista interior de la vivienda

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS EN SUELOS COLAPSABLES

Como ya se ha explicado, estos suelos son muy sensibles a cambios externos, vibraciones e inundaciones repentinas, por ello se les puede considerar como buenos terrenos aptos para soportar cargas medias-altas siempre y cuando quede garantizado el hecho de preservar a los mismos de las influencias externas provocadas por obras adyacentes, vibraciones fuertes o reventones de tuberías y pérdidas prolongadas de agua. En muchos casos, si la presencia de agua va a ser peligrosa, se ha descartado el apoyar las cargas sobre estos terrenos, bajando la cota de cimentación hasta los substratos terciarios entre 6 y 20 m de profundidad por medio de cimentaciones profundas a base de pilotes. En otros casos, se han realizado cimentaciones superficiales aislando las conducciones y garantizando de esta manera la no afectación por pérdidas prolongadas de tuberías o reventones repentinos.

En el primer caso, se debe contar con el rozamiento negativo que introducirá el posible colapso y que puede “colgarse” literal-

mente del pilote. En el segundo caso, debe realizarse un estudio serio de las relaciones tensión deformación para la zona determinada que se estudie.

En cualquier caso, una visión libre de prejuicios basados en el desconocimiento, un buen conocimiento de la geología de la zona y la participación de un profesional con experiencia puede evitar muchos problemas no deseados y un ahorro razonable en la planificación y proyección de las estructuras que se establezcan.

Todo ello es una garantía de seguridad y calidad en el resultado final. De esta manera, pueden evitarse muchos de los problemas que desde el Laboratorio de Edificación de la Escuela Superior de Arquitectura de la Universidad de Navarra se han canalizado y han puesto en movimiento a técnicos, abogados, jueces y usuarios que tienen que vivir con las engorrosas molestias que un proyecto falto de visión ha introducido en sus quehaceres, encareciendo costes y provocando molestias a personas que no tienen nada que ver con la falta de previsión y mala comprensión de un proceso puramente natural.