FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

SUELOS COLAPSABLES

Comportamiento característico del suelo

Descripción breve

Se define suelo colapsable describiendo su comportamiento. Características comunes y clasificación mecánica. Se describe el mecanismo interno de colapso, que explica su comportamiento a nivel macro observable.
Se incluyen métodos ingenieriles para predecir la magnitud de los potenciales asientos y el concepto de suelos auto y potencialmente colapsables.
Se describen las diferentes ramas de acción profesional ante la presencia de estos suelos en un proyecto de ingeniería civil

Palabras claves

Colapso. Suelo metaestable. Asentamientos

VILLEGAS, CRISTIAN EMANUEL
cristianemanuelvillegas@gmail.com

Contenido

1. INTRODUCCIÓN....2
2. SUELOS COLAPSABLES....2

Caracterización de colapsibilidad....4

3. MECANISMO DE COLAPSO....5

Capilaridad....5

Cementación....6

Presencia de arcillas....7

4. MAGNITUD DEL ASENTAMIENTO POR COLAPSO....8
5. SUELOS AUTOCOLAPSABLES Y POTENCIALMENTE COLAPSABLES....10
6. SOLUCIONES INGENIERILES EN SUELOS COLAPSABLES....11

Mejoramiento del suelo colapsable....12

Medidas conducentes a evitar la iniciación del colapso....13

Estructuras y/o fundaciones que admiten y resisten los fenómenos provocados por el colapso....14

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA....15

1. INTRODUCCIÓN

En la Mecánica del Suelo y en la Ingeniería de Cimentaciones suele hacerse una división de los suelos según sean los factores que determinen su comportamiento en:

- Suelos estructuralmente estables
- Suelos estructuralmente inestables o metaestables

Se define a los primeros como aquellos, cuyo comportamiento depende sólo de sus propiedades intrínsecas y de factores mecánicos; y a los segundos, como suelos cuyo comportamiento no sólo está en relación directa con las solicitaciones mecánicas, sino que también está controlado por factores externos al suelo, por ejemplo, factores químicos, variaciones ambientales, etc. En este segundo grupo se encuentran los suelos colapsables.

2. SUELOS COLAPSABLES

Zur y Wisemam (1973) definen como colapso a cualquier disminución rápida de volumen del suelo, producida por el aumento de cualquiera de los siguientes factores:

- Contenido de humedad (w)
- Grado de saturación (Sr)
- Tensión media actuante (τ)
- Tensión de corte (σ)
- Presión de poros (u)

Establecida la definición general de colapso, nuestro análisis se centrará en aquellos suelos en los cuales, el colapso de la estructura del suelo es provocado por un incremento del contenido de humedad. Por lo tanto, en lo sucesivo cuando se hable de suelos colapsables, se entenderá que son aquellos suelos, en que un aumento en el contenido de humedad, provoca una brusca disminución de volumen, sin la necesidad de un aumento en la presión aplicada.



Ilustración 1 Asientos generados por colapsos en suelos

En simples palabras se tiene que un agente externo (el agua) influye provocando una destrucción en la estructura original de un estrato de suelo, provocando la falla de este.

Reginatto (1977) señala que, en general, los suelos colapsables presentan una serie de características comunes, tales como:

- Estructura macroporosa, con relación de vacíos (e), entre relativamente alta, a muy alta.
- Granulometría predominantemente fina, con predominio de fracciones de limos y de arcilla. El tamaño de los granos es generalmente poco distribuido y con los granos más grandes escasamente meteorizados. La mayoría de las veces, la cantidad de la fracción arcilla es relativamente escasa, sin embargo, tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular.
- Estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o "puentes" de material predominantemente arcilloso. En muchos casos existen cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas.



Ilustración 2 Terron de loess en estado natural. Ref[3]

En la ilustración 2, se presenta un terrón de loess (con características colapsables) en estado natural. A simple vista y tacto, se nota un terrón con elevada resistencia, muy compacto. Sin embargo, el Ing. Reginato lo sumerge en un vaso con agua y la estructura de este comienza a desgranarse a medida que empieza a saturarse (ilustración 3).

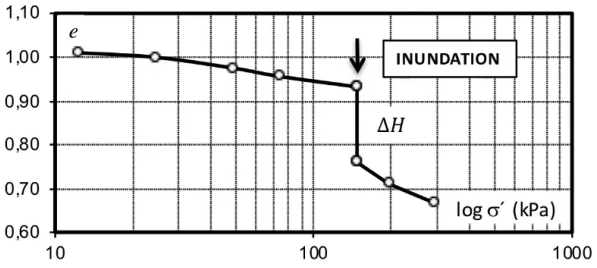


Ilustración 3 Terron de loess en proceso de saturación. Ref[3]

Caracterización de colapsibilidad

Existen numerosas formas de caracterizar la colapsibilidad del suelo, de las descritas en la referencia [1], destaco la correspondiente al índice de colapsibilidad Ie. Consiste en realizar un ensayo edométrico sobre una muestra a humedad natural, y previamente al escalón de cierta carga preestablecida por la normativa del ensayo, se satura la muestra y se mide el ΔH. A continuación, se ilustra el proceso.

- Ensayo en edómetro
- Se lleva la muestra a la presión efectiva objetivo o 200kPa, sin saturar
- Se satura la muestra y se mide ΔH
- Se calcula el índice de colapso I_c o I_e



Degree of Specimen Collapse	Collapse Index I_e, %
None	0
Slight	0.1 to 2.0
Moderate	2.1 to 6.0
Moderately severe	6.1 to 10.0
Severe	>10

ASTM D5333

$$I_c = 100 \times \frac{\Delta H}{H_0}$$

$$I_e = 100 \times \frac{\Delta H}{H_0}\Big|_{\sigma' = 200kPa}$$

Activar Windows
Ve a Configuración para ac

Ilustración 4 Ensayo edométrico, Índice de colapso. Ref [4]

3. MECANISMO DE COLAPSO

A continuación, se fundamenta el mecanismo de colapso de los suelos colapsables. Las siguientes condiciones generales son las que establece Dudley (1970) para que ocurra el colapso:

La estructura del suelo deberá tener ciertas características, de modo tal que se tienda a la ocurrencia de dicho fenómeno.

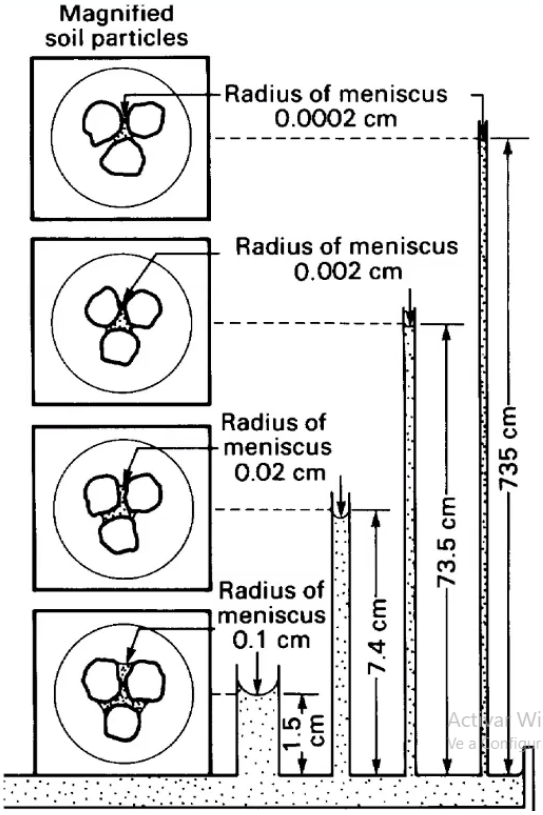
Las partículas estarán unidas entre sí por fuerzas o materiales cementantes que son susceptibles, -tanto unas como otros- pueden ser anulados o reducidos cuando aumenta el contenido de humedad del suelo.

Cuando este soporte es reducido o anulado, las partículas del suelo deslizan por una pérdida de la resistencia al corte.

Capilaridad

Los suelos granulares, como las arenas y las gravas, presentan un tipo de estructura simple, también ampliable a los limos. En ella, las uniones entre granos son contactos reales debidos a fuerzas gravitacionales, fuerzas exteriores o capilares. Estas últimas tienen un carácter temporal ya que dependen del grado de saturación que posea el suelo.

La humedad del suelo puede variar entre el estado saturado y el seco, del mismo modo las tensiones capilares serán variables con el contenido de humedad y desaparecerán tanto al saturarse, como al secarse el suelo.



Según puede verse, la forma que toman los meniscos hace que el agua esté traccionada y por lo tanto la presión de poros sea negativa. Esto origina un aumento de la presión efectiva que une un grano con el otro. Este aumento de la presión efectiva origina un aumento en la resistencia, por lo cual los granos opondrán una mayor resistencia al deslizamiento.

Cementación

Los vínculos entre partículas pueden estar impregnados de un agente cementante que confiere una resistencia cohesiva adicional al deslizamiento de un grano respecto a otro. Esta cohesión puede tener un carácter temporal semejante al de las fuerzas capilares.

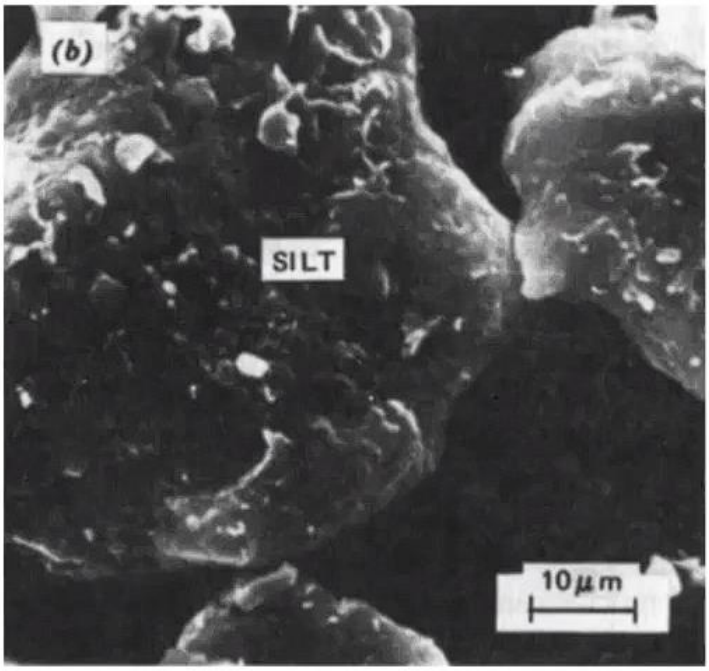
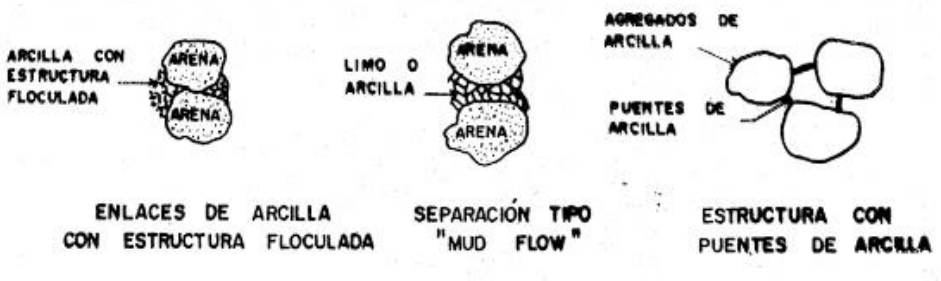


Ilustración 5 Vista de cementante en los contactos entre partículas

El incremento de humedad en ambos casos podría generar una perdida de resistencia. Reduciendo la presión negativa que ofrece la presencia de los meniscos de agua y, para el caso de resistencia por cementación, la pérdida dependerá tanto de las características del agente cementante como de las del fluido. Así, si la cementación deriva de sales cristalizadas, la pérdida de resistencia será función del grado de solubilidad de estas sales.

Presencia de arcillas

Cada partícula de arcilla posee una carga neta negativa que se equilibra con los cationes de la doble capa que la rodea. Dos partículas se repelerán entre sí cuando entran en contacto sus dobles capas. A medida que se trate de acercarlas, esta fuerza de repulsión aumentará. Además de esta fuerza de repulsión existe una fuerza de atracción entre las partículas debidas a las fuerzas de Van der Waals o fuerzas de enlace secundario, esta fuerza también es función de la distancia entre las partículas. Por lo tanto, las partículas se atraerán o repelerán en función de la resultante de estas dos fuerzas.



Las fuerzas de repulsión son dependientes de las características del sistema (espesor de la doble capa), no así las fuerzas de atracción, que en general son independientes de él. Las partículas podrán alejarse o acercarse, modificando las características del medio y por ende el espesor de las dobles capas. El proceso de acercamiento de una partícula con otra se denomina floculación y al proceso de alejamiento de una partícula respecto a otra dispersión.

Lambe y Whitman (1969) indican que se provoca una tendencia a la floculación aumentando una o varias de las siguientes características:

- Concentración de iones Valencia iónica

- Temperatura o disminuyendo una o más de las siguientes:

- Constante dieléctrica

- Tamaño del ión hidratado

- Absorción de aniones

- pH

Durante un proceso de saturación, además de una disminución de las fuerzas capilares, hay una disminución en la concentración de iones, y por lo tanto un proceso de dispersión. Partículas que antes estaban unidas por fuerzas de atracción, comienzan a repelerse y adquirir una estructura dispersa y probablemente menos resistente.

Si la estructura del suelo se encuentra en estado de equilibrio, y un agente externo -cualquiera- provoca una disminución o anulación de las fuerzas que vinculan unas partículas con otras, puede suceder que el suelo pase a un nuevo estado de equilibrio. Este proceso entre dos estados de equilibrio puede provocar o no, un cambio de la estructura del suelo, reacomodando sus partículas, reduciendo su volumen, y en consecuencia, resultando un asentamiento en superficie.

4. MAGNITUD DEL ASENTAMIENTO POR COLAPSO.

La magnitud del asentamiento adicional por humedecimiento de un manto de suelos se representa de la siguiente manera:

$$W_{col.t} = \sum_{j=1}^{n} W_{col.j} = \sum_{j=1}^{n} \delta_{col.j} \times H_j$$

Donde:

- $Wcol_J$: Asentamiento por colapso en estrato j.
- δcol_J: Colapso relativo del estrato j. a la presión σzj
- σz: presión total en el estrato j
- H_J: Espesor del estrato j.

Como se aprecia, depende del espesor del manto colapsable, de la colapsibilidad del mismo (colapso relativo), del incremento de tensión y del grado de humedecimiento. Este colapso relativo puede definirse como:

$$\delta_{col} = \frac{h_{HN} - h_s}{h_1} \quad \text{ó} \quad \delta_{col} = \frac{\varepsilon_{HN} - \varepsilon_s}{1 - \varepsilon_1} \quad \text{ó} \quad \delta_{col} = \frac{e_{HN} - e_s}{1 - e_1}$$

Donde:

- h_{HN}: Altura de la probeta a humedad natural, sometida a una tensión vertical de compresión σ cualquiera.
- h_S: Altura de la probeta saturada, sometida a una tensión vertical de compresión σ cualquiera.
- h_1: Altura de la probeta a humedad natural, sometida a una tensión vertical de compresión σ peso propio del suelo.
- h_S: Altura de la probeta saturada, sometida a una tensión vertical de compresión σ cualquiera.

El valor del índice colapso relativo, δcol_J, se obtiene mediante ensayos edométricos de laboratorio y es una característica intrínseca del material.

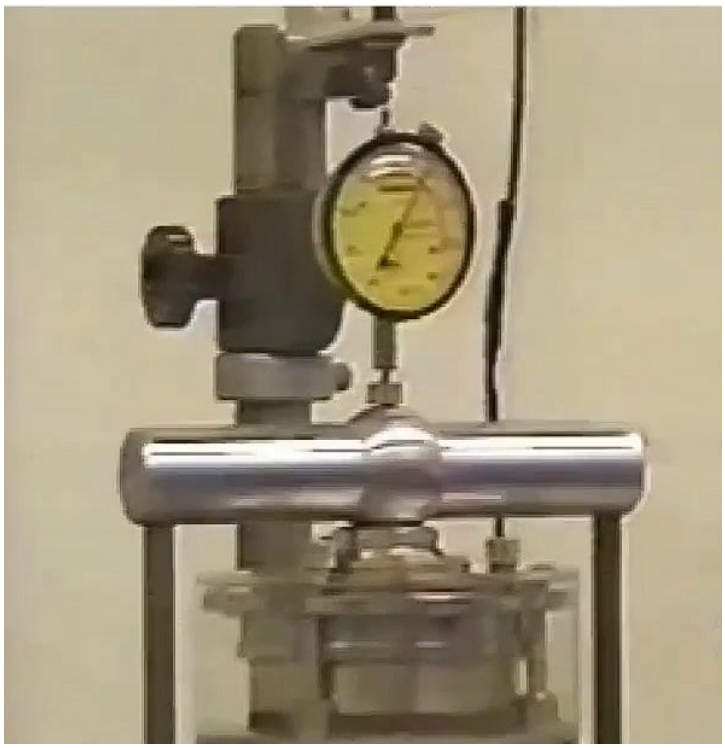


Ilustración 6 Ensayo edométrico sobre muestra saturada

La ecuación para el cálculo de asiento por colapso suele ir acompañada de un coeficiente m, que representa el proceso de humedecimiento y las dimensiones del área humedecida. Generalmente la fórmula da resultados adecuados para áreas de humedecimientos del orden del espesor considerado. Para humedecimientos locales, productos de fuentes puntuales como

cañerías dañadas, etc., el valor de m cae sustancialmente y entonces los cálculos dan un asiento de menor magnitud

$$m = f(B,L,Z)$$

donde B y L son las dimensiones del área de inundación y Z el espesor de la zona humedecida.

5. SUELOS AUTOCOLAPSABLES Y POTENCIALMENTE COLAPSABLES

En el gráfico semilogarítmico que representa el comportamiento de un suelo, un ensayo a compresión confinada realizado sobre en condición saturada, se puede observar un quiebre en la curva de compresibilidad. La presión axial a la cual se produce este quiebre o este cambio de comportamiento se la denomina **Presión de Fluencia Saturada o Presión Inicial de Colapso.** En principio se establece que, para presiones menores a esta, el suelo tiene un comportamiento elástico y los asentamientos por colapso son bajos y nulos. Por el contrario, para presiones mayores a la de Fluencia, el suelo tiene un comportamiento elásto-plástico y los asentamientos por colapso son importantes.

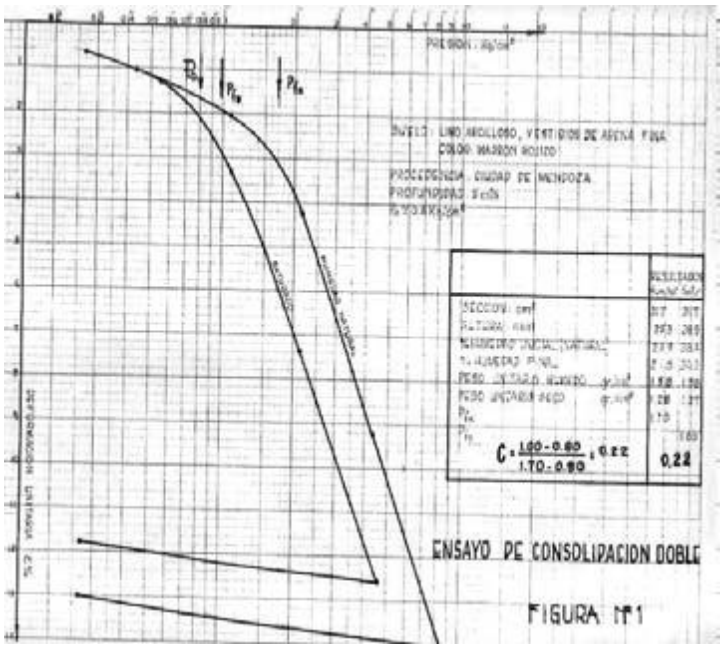


Ilustración 7 Ensayo edométrico

Se dice que un suelo es auto colapsable cuando la presión de tapada o geoestática (σ0) es superior a la Presión Inicial de Colapso (σi.col). Esto quiere decir que cuando en ese suelo se produzca el humedecimiento, se producirán asentamientos importantes con solamente la acción de su peso propio.

Se designa como suelos potencialmente colapsables a aquellos en los que la presión de tapada o geo-estática (σ0) es menor a la Presión Inicial de Colapso

Lo realmente interesante de los conceptos antes enunciados, radica fundamentalmente en que han permitido generar una metodología de análisis de los perfiles con suelos susceptibles al colapso.

Este análisis permite confrontar a cada profundidad considerada la magnitud de la Presión Inicial de Colapso (σi.col) con la Presión total (σT) igual a la suma de la presión debida a la carga aplicada (Δσ) más la presión por peso propio (σ0).

En la ilustración 5 se presenta un perfil de suelo en el que se ha dibujado la variación de ambas presiones (la Presión Inicial o de Fluencia y la Presión Total) en función de la profundidad.

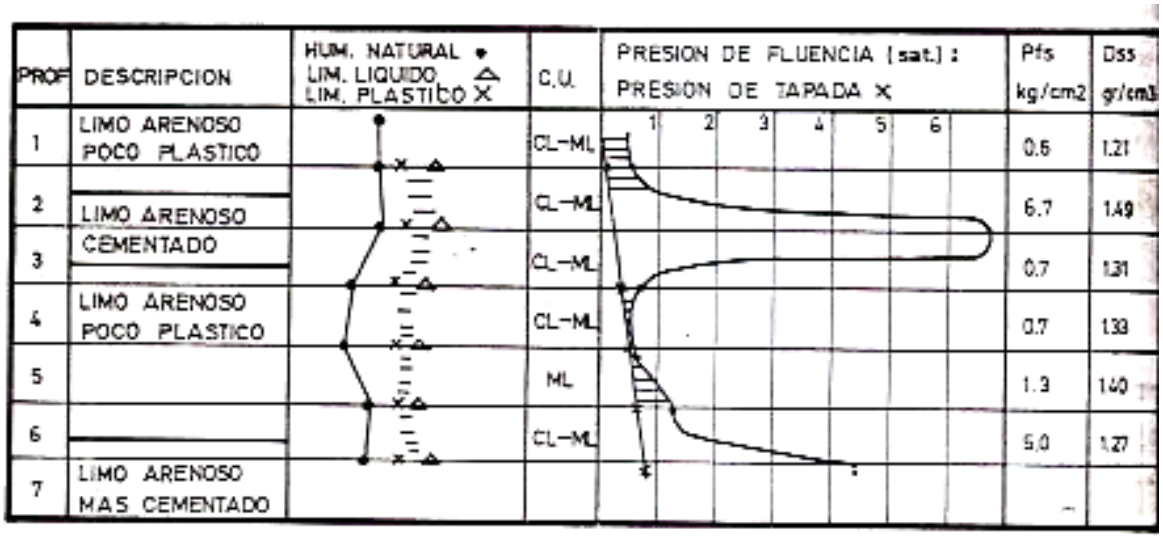


Ilustración 8 Perfil de colapsibilidad de un suelo.

A partir del análisis de estas curvas pueden establecerse, por ejemplo, los espesores de los suelos que autocolapsarán por humedecimiento, y aquellos que colapsarán si además de la saturación se aumentan las cargas; y consecuentemente clasificar los suelos en sus diferentes grupos: suelos verdaderamente colapsables (autocolapsables) o suelos condicionalmente colapsables (colapsables bajo cargas externas).

Aun cuando el valor de la Presión Inicial sea aproximado, este tipo de análisis es de fundamental interés en el diseño de los diferentes tipos de cimentaciones, ya que se podrá conocer cuáles serán, en forma aproximada, los principales problemas que se presentarán en el diseño de las obras, permitiendo de esta forma elegir correctamente el tipo de cimentación o el método de mejoramiento del suelo a emplear para disminuir o anular la susceptibilidad al colapso.

6. SOLUCIONES INGENIERILES EN SUELOS COLAPSABLES

La primera cuestión que debe analizarse cuando se diseñan cimentaciones en suelos susceptibles al colapso, es la probabilidad que el agente desencadenante del fenómeno, el agua, pueda o no introducirse en el terreno y por ende "sensibilizar" al suelo en donde se apoyarán las estructuras. Por definición, sin la presencia del agua, el suelo no colapsa. Esta cuestión es

significativa, puesto que pueden existir numerosos casos en donde la probabilidad que el agua se infiltre en el suelo sea lo suficientemente baja como para analizar la posibilidad de fundar la estructura, considerando el comportamiento del suelo en su estado natural. Por lo tanto cuando se hable de suelos potencialmente colapsables por humedecimiento, no debe pensarse unívocamente en las soluciones ingenieriles que se utilizan en suelos colapsables.



Ilustración 9 Daños en vivienda ocasionados por asiento de fundaciones (Redolfi 2017)

Hecha esta aclaración, a continuación, se tratará de ofrecer un panorama de las distintas soluciones ingenieriles que se adoptan en suelos colapsables por humedecimiento, cuando las probabilidades de que se produzca el fenómeno sean considerables.

El objetivo central de todas estas soluciones es prevenir las fallas estructurales o de servicio que pueden sobrevenir sobre las estructuras construidas sobre estratos de suelos colapsables.

Aitchison (1973) divide a estas soluciones en:

a) Tratamiento del suelo colapsable con vista a eliminar la tendencia al colapso a lo largo de todo el estrato de suelos desmoronables.
b) Diseño de elementos constructivos que eliminen o disminuyan a límites razonables la posibilidad que se inicie el colapso.
c) Diseño de estructuras y/o cimentaciones insensibles a los asentamientos provocados por el colapso, por ejemplo, fundaciones profundas apoyadas sobre un manto profundo no sujeto a los asentamientos por humedecimiento.

Mejoramiento del suelo colapsable

El primer grupo de soluciones comprende los métodos de mejoramiento de suelo, por medio de los cuales la susceptibilidad al colapso es eliminada, modificando las propiedades resistentes del

suelo mediante la compactación o la cementación de los vínculos entre partículas. A continuación, se nombran diferentes metodologías para lograr la solución:

- Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo **por compactación**.
- Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo **por modificación de su granulometría.**
- Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo **por la creación de nuevos contactos cohesivos.**
- Métodos de mejoramiento **por medio del reemplazo del suelo colapsable por suelo no colapsable.**
- e) Métodos de mejoramiento **que incorporan elementos resistentes a la tracción dentro del suelo.**

En la referencia [1] se describen cada uno de los métodos nombrados.

Medidas conducentes a evitar la iniciación del colapso

El segundo grupo incluye la adopción de medidas constructivas tendientes a aislar el agua, de manera de evitar o disminuir la presencia de condiciones favorables al colapso, admitiendo no obstante ciertos riesgos.

Goldstein (1969) definió los tipos de humedecimientos que pueden presentarse en una masa de suelo:

a) humedecimiento localizado por rotura de conducciones hidráulicas o infiltraciones de aguas de lluvia;
b) humedecimiento extenso causado por roturas de canales o efluentes industriales;
c) ascenso del nivel freático;
d) aumento gradual y lento del contenido de humedad, por condensación del vapor de agua, provocados por condiciones ambientales.

Muchos de estos tipos de humedecimientos pueden ser prevenidos, principalmente los primeros, pues en general éstos son debidos a fallas o roturas de las instalaciones de la misma construcción. Sin embargo, los otros tipos de humedecimientos están condicionados por factores externos al proyecto, como por ejemplo puede ser el ascenso del nivel freático o la rotura de un canal cercano y ajeno al proyecto. La acción del proyectista debe estar encaminada principalmente a impedir, dentro de los límites del proyecto, la generación de estos humedecimientos provocados por elementos de la propia construcción.

Robinson y Narkiewicz (1982) sugieren las siguientes medidas de protección contra el humedecimiento de edificios:

a) Pendientes adecuadas en la superficie del terreno que rodea a la construcción, de modo que no se produzcan embalsamientos de agua en las cercanías de las fundaciones y que cualquier pérdida de agua pueda ser eliminada con rapidez.

b) Canalización de todos los desagues de techos y patios hacia el exterior de la construcción.
c) Instalación de membranas impermeables o pavimentación de la superficie que rodea a la construcción, de modo de limitar la infiltración de agua en el suelo adyacente a las construcciones.
d) Encerrar las conducciones de agua o efluentes cloacales dentro de conductos de fácil acceso, a efectos de detectar posibles pérdidas.

Algunas de estas medidas requieren una serie de medidas de control y mantenimiento durante la vida útil de la obra, de manera que periódicamente se realicen inspecciones a las instalaciones y puedan detectarse pérdidas o daños en las mismas. También es aconsejable que los propietarios de la obra conozcan perfectamente los riegos a que está expuesta la misma, de modo que su actividad y/o descuidos no inicie procesos de humedecimiento del terreno.

Es frecuente que en ciertos tipos de obras, como viviendas unifamiliares de una planta o incluso caminos y canales, las únicas medidas a adoptar sean las presentadas en este apartado, ya que la utilización de técnicas de mejoramiento o fundaciones profundas resultan prohibitivas. En realidad la mayoría de las obras aludidas se construyen admitiendo el riesgo de un posible colapso del terreno. El buen comportamiento que han tenido la mayoría de ellas se debe fundamentalmente a que no se ha producido ningún tipo de humedecimiento. En contraste, los daños son serios en aquellas obras que los han sufrido. Por todo ello, es un deber de los investigadores a ingenieros buscar nuevas soluciones económicas que permitan disminuir los riesgos, y por ende los daños en este tipo de obras. Uno de los caminos en tal sentido, es el estudio de estructuras que absorban o minimicen los posibles asentamientos diferenciales provocados por el humedecimiento localizado del suelo sin un aumento excesivo de los costos.

Estructuras y/o fundaciones que admiten y resisten los fenómenos provocados por el colapso

Finalmente, el tercer grupo engloba tanto las soluciones tradicionales por medio de fundaciones profundas, como el diseño de estructuras con fundaciones directas insensibles a los asentamientos diferenciales provocados por el colapso del suelo.

La lista de estructuras que se asientan directamente sobre mantos de suelos potencialmente colapsables es amplia, entre ellas pueden señalarse: viviendas unifamiliares, construcciones transitorias, galpones, ductos enterrados, canales, caminos, etc.

Las fundaciones directas sobre suelos colapsables pueden ser divididas en dos grupos:

a) Fundaciones rígidas, utilizadas principalmente en estructuras livianas y con cargas puntuales, por ejemplo, torres de líneas de alta tensión, columnas de naves industriales o depósitos. En general, este tipo de estructuras tienen algunos rasgos comunes, como son, por ejemplo: cargas verticales bajas, cargas horizontales importantes, y en general suelen aceptar asentamientos admisibles mayores.

b) Fundaciones de baja rigidez longitudinal, en este caso se trata de estructuras con cargas lineales (muros de carga, canales, etc.) con baja rigidez en el sentido de las cargas. Este tipo de

estructuras son sensibles a humedecimientos localizados del terreno que generan asientos diferenciales importantes. En general, las medidas que suelen tomarse para disminuir los efectos de los asientos diferenciales son las siguientes: diseño de elementos que rigidicen la estructura (Clemence Y Finbarr, 1981), y el diseño de elementos constructivos que eviten la introducción del agua en el terreno, señalados anteriormente.

En cuanto a la adopción de incluir fundaciones profundas que atraviesen los estratos inestables, es una solución tan confiable y a la vez costosa como las del 1er grupo y la decisión de utilizarla debe ser analizada desde el punto de vista económico relativo a la obra.

En resumen, en el primer grupo de soluciones se interviene directamente en el suelo, evitando así el colapso; en el segundo grupo se intenta evitar que se produzca el colapso, sin modificar el suelo; y en el último grupo se construyen estructuras y/o fundaciones que admitan y resistan los fenómenos provocados por el colapso del suelo.

7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Dr. Ing Redolfi Emilio, SUELOS COLAPSABLES, Grupo Geotécnico Córdoba – Argentina 2007. UNC.

[2] Terzariol Roberto, 40 AÑOS DE ESTUDIO DE LOS SUELOS LOESSICOS EN CORDOBA, ARGENTINA. Desafíos y Avances de la Geotecnia Joven en Sudamérica. 2009

[3] https://www.youtube.com/watch?v=J_Iu4h-NCUc&ab_channel=geotecnia.ONLINE. Fuente de imágenes, video de Ingeniería Global, Nota a Redolfi FCEFyN / UNC - Abril 2017.

[4] https://www.youtube.com/watch?v=8rDUhmDOkP4&ab_channel=FIUBA-DepartamentodeEstabilidad. Minuto 50. Clase de suelos colapsables. FIUBA – Departamento de Estabilidad.