

CAPITULO 4. Consolidación y Colapso

1. Consideraciones sobre la consolidación. 2. Ensayo de consolidación. Diagramas. 3. Arcillas normalmente consolidadas y preconsolidadas. 4. Cálculo de asentamientos por consolidación primaria unidimensional. 5. Velocidad de consolidación. Solución de la ecuación de la consolidación. Coeficiente de consolidación. Consolidación secundaria. 6. Precompresión. 7. Suelos colapsables. 8. Suelos colapsables por humedecimiento. 9. Magnitud del asentamiento por colapso. 10. Métodos de identificación. 11. Soluciones ingenieriles en suelos colapsables.

4.7 **SUELOS COLAPSABLES**

4.7.1 **Introducción**

Muchos de los fenómenos que determinan el comportamiento de los suelos son complejos y no pueden siempre reducirse a causas puramente mecánicas, sino que muchas veces intervienen factores de otra índole (químicos, ambientales, etc.), provocando un comportamiento singular del terreno. En algunos suelos, estos factores "no mecánicos" tienen una importancia capital y son objeto de un estudio particular. Dicho grupo de suelos es conocido genéricamente como "suelos estructuralmente inestables".

Uno de los principales fenómenos que afectan a algunos de estos suelos es el colapso brusco de su estructura intergranular, denominándose a los suelos que presentan estas características: suelos colapsables. En estas notas se analizarán exclusivamente aquellos suelos en los cuales el colapso es provocado por humedecimiento.

4.7.2 **Suelos Metaestables**

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 sollicitaciones mecánicas, sino que también está controlado por factores externos al suelo, por ejemplo, factores químicos, variaciones ambientales, etc. Los suelos colapsables se encuentra dentro de los suelos metaestables.

4.7.3 **Características comunes:**

En general, los suelos colapsables presentan una serie de características comunes, tales como:

- Estructura macroporosa, con índice de huecos (e), entre relativamente alto, a muy alto.
- 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, pero 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.

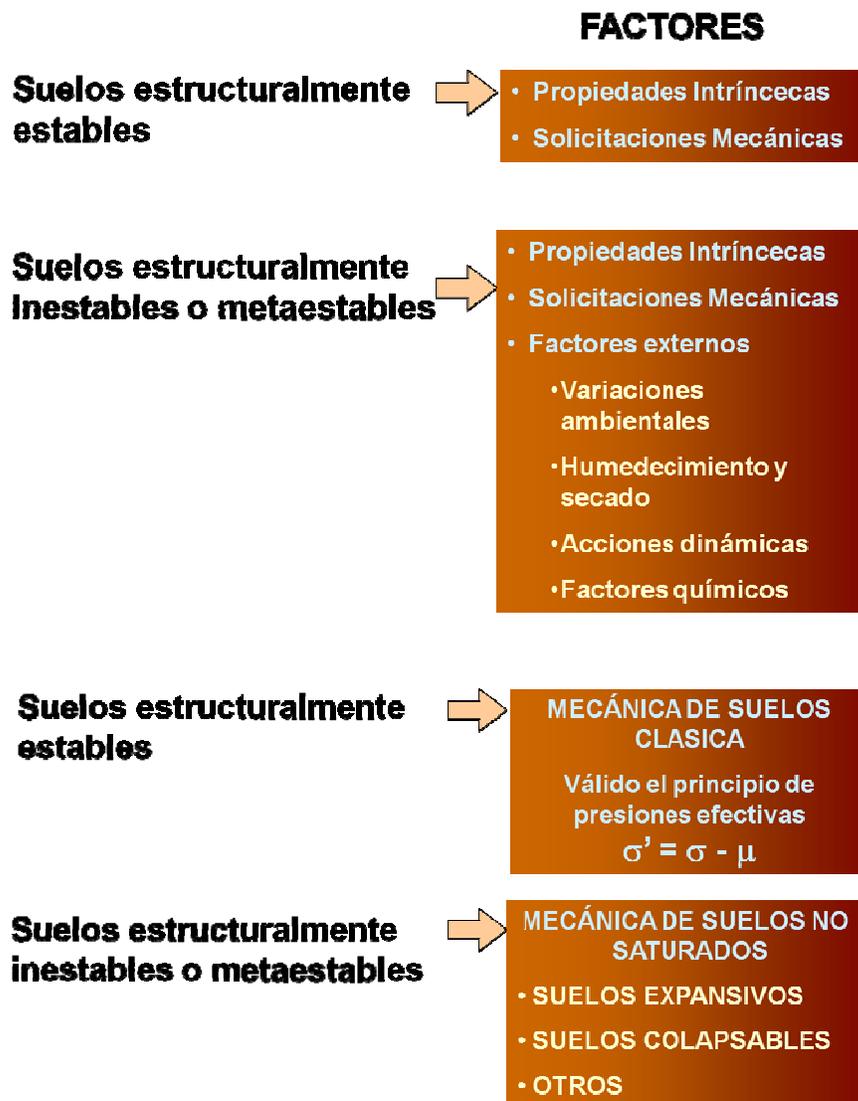


Figura 4.1. Suelos estables y suelos metaestables.

4.8 SUELOS COLAPSABLES POR HUMEDECIMIENTO:

4.8.1 *Definición de colapso*

Se define 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 (S_r)
- Tensión media actuante (τ)
- Tensión de corte (σ)
- Presión de poros (u)
- Interacción química entre el líquido saturante y la fracción arcillosa.

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.

A partir de esta definición, se advierte:

- Por un lado una destrucción o un **cambio en la estructura** que el suelo tenía originalmente, y
- Por el otro lado, **un agente externo**: el agua, que provoca este fenómeno.

En la Mecánica de Suelos clásica de los suelos saturados o de los suelos secos el fenómeno de colapso generalmente viene asociado a un cambio en el estado tensional del suelo. En cambio aquí, y en una primera definición, estaría provocado por un agente externo (cambio en el contenido de humedad).

En el proceso de consolidación de suelos saturados (Teoría clásica de Terzaghi) también se produce una disminución de volumen, pero puede decirse que en muchos aspectos el colapso es lo contrario de la consolidación, tal como se indica en la Tabla 1.

PROPIEDADES	COLAPSO	CONSOLIDACIÓN
Grado de saturación inicial	<i>No saturado</i>	<i>Saturado</i>
Índice de vacíos	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
Flujo de agua durante el proceso	<i>Absorción</i>	<i>Expulsión</i>
Presión de poros	<i>Tienden a disiparse</i>	<i>Aumentan rápidamente</i>
Duración en el laboratorio	<i>10 a 20 minutos</i>	<i>Horas/días</i>
Resistencia al corte antes del proceso	<i>Alta</i>	<i>Baja</i>
Resistencia al corte después del proceso	<i>Baja</i>	<i>Alta</i>

Tabla 1: Comparación entre parámetros de colapso y consolidación (Adaptado de Reginatto, 1977).

4.8.2 Mecanismo de colapso

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 en la Figura 4.2, 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.

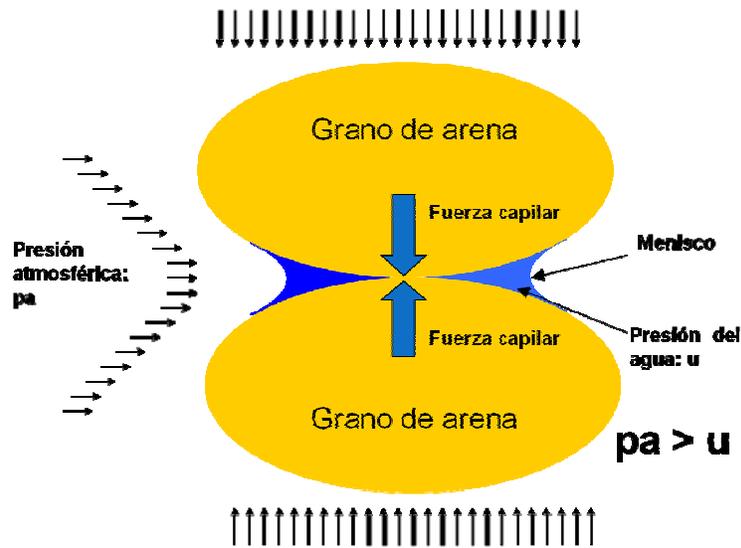


Figura 4.2: Fuerzas capilares en los suelos granulares

Si en este estado el suelo se satura, la presión efectiva disminuirá, y con ella la resistencia al corte, pudiendo provocar un deslizamiento relativo entre los granos de suelo.

Cuando la estructura es macroporosa, este deslizamiento entre granos se manifiesta en una importante disminución de volumen.

Este tipo de mecanismo de colapso o desmoronamiento puede ampliarse también para aquellas arenas en las que sus vínculos están formados por partículas de limos, como se esquematiza en la Figura 4.3.

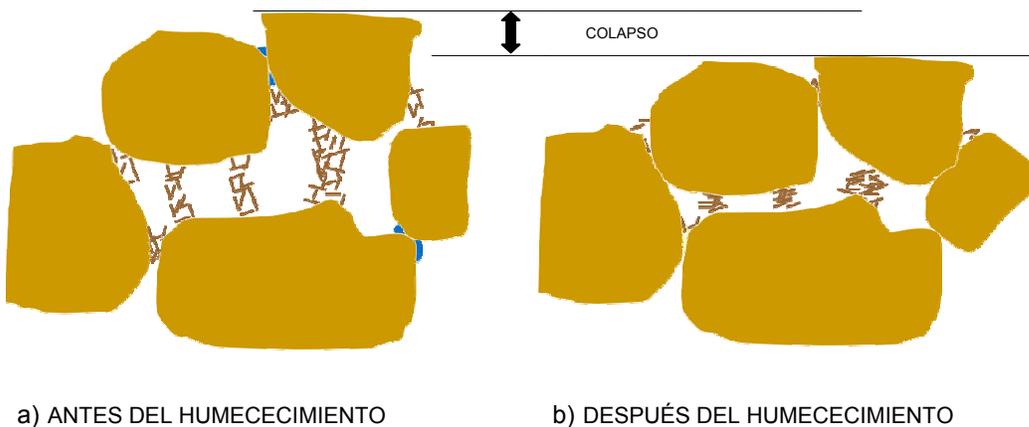


Figura 4.3: Mecanismo del colapso en un suelo limo arcilloso

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.

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. Las partículas que antes estaban unidas por fuerzas de atracción, comienzan a repelerse y adquirir una estructura dispersa y probablemente menos resistente.

Esta es una manera bastante simple de explicar un mecanismo mucho más complejo, en el que pueden intervenir, además de los nombrados, otros factores. Sin embargo, se advierte cómo una estructura "estable" puede ser modificada cuando entra en juego un agente externo que desestabiliza y modifica los vínculos que primariamente le conferían una resistencia aparente.

En cualquiera de los tipos de estructuras antes descritas, 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. También esta cohesión puede tener un carácter temporal semejante al de las fuerzas capilares.

La pérdida de esta resistencia 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.

Finalmente, cualquiera sea el tipo de estructura de suelo que se esté considerando, siempre es posible hablar de vínculos o fuerzas que unen o ligan una partícula a otra. En unos casos, las partículas están en contacto directo entre sí (partícula-partícula) unidas por fuerzas externas o capilares, y en otros casos estas tuerzas o vínculos pueden tener carácter físicoquímico o eléctrico, a incluso no existir contacto directo entre las partículas.

4.8.3 Magnitud del colapso

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, dependiendo de:

- La magnitud de los cambios provocados en los vínculos y/o fuerzas por el agente externo.
- Del estado tensional existente en los vínculos.

Si los cambios provocados por el agente externo en las características de los vínculos, no son suficientes como para movilizar un cambio de estructura, ésta permanecerá inalterada. Sin embargo, la condición de equilibrio puede haber variado, dado que de alguna forma el agente ha "sensibilizado" al suelo.

En cambio, si el estado tensional en los contactos es superior a la resistencia que tienen éstos durante el proceso, las partículas cambiarán de posición, produciendo un cambio de estructura y pasando a un nuevo estado de equilibrio.

Un ejemplo de ello puede observarse en la Figura 4.4, en la cual se han dibujado dos ensayos edométricos de un mismo estrato. La muestra A, en una primera etapa (trazo

rojo) fue cargada hasta una presión de 200 kPa, a la humedad natural ($w\% = 14,4$). Posteriormente, en una segunda etapa fue inundada a esa presión (saturación a presión constante). Durante este proceso se observa un importante cambio volumétrico.

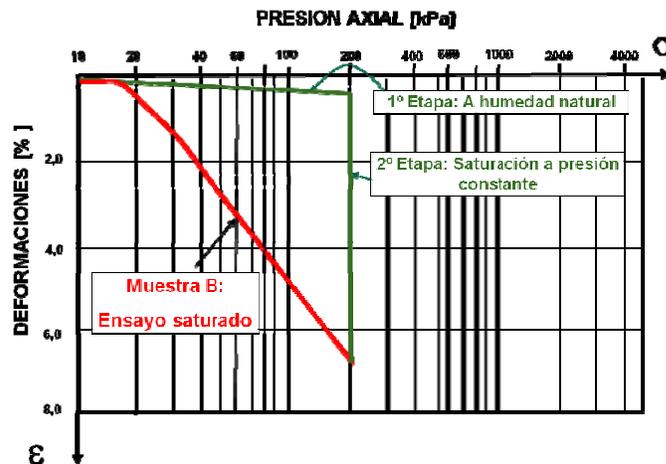


Figura 4.4: Doble ensayo edométrico o doble ensayo a compresión confinada.

La muestra B, fue inundada a una presión de 10 kPa, no observándose ningún cambio volumétrico durante el proceso de saturación. Posteriormente se continuó el ensayo edométrico en forma habitual hasta una presión de 200 kPa.

Al no advertirse cambios volumétricos durante el proceso de saturación, puede inferirse que tampoco se han inducido cambios en la estructura del suelo, pero es indudable que efectivamente se ha generado una notable disminución en la resistencia de los vínculos, dado que al aumentar el estado tensional el comportamiento del suelo varió radicalmente del que se observó durante el proceso de carga a humedad natural en la muestra A.

Esto también queda reflejado en las curvas de deformaciones en función del tiempo (Figura 4.5). La primera de ellas corresponde a la variación de las deformaciones verticales en función del tiempo, cuando la muestra A fue saturada a una presión axial de 200 kPa, en tanto la segunda corresponde al salto de carga de 100-200 kPa del ensayo B (saturada a 10 kPa). En ambas curvas se advierte en primer término una brusca disminución de volumen, señalada como colapso primario.

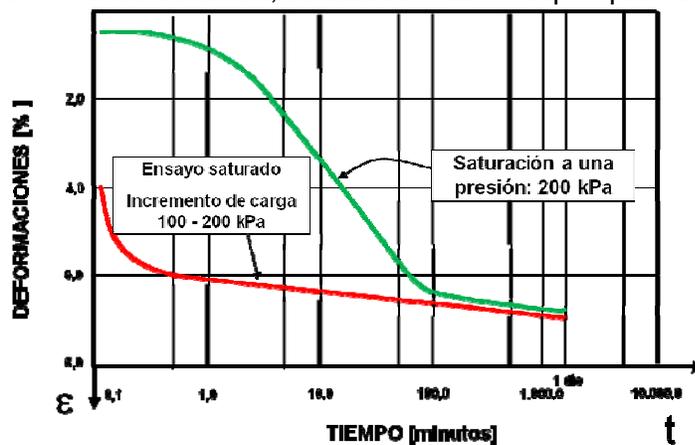


Figura 4.5. Curvas deformaciones unitarias en función del tiempo para dos muestras.

En esta etapa, la resistencia y la estabilidad de la estructura macroporosa y mal acomodada dependen básicamente de la resistencia al corte, a la tracción y a la compresión de los puentes o acumulaciones de arcillas y/o sales en los puntos de contacto entre las partículas. Los esfuerzos que se producen en dichos vínculos y puntos de contactos han superado la resistencia del material, provocando el consecuente desmoronamiento de la estructura del suelo, dando como resultado una totalmente distinta a la anterior. Posterior a esta primera etapa (cambio de pendiente de las curvas), sigue existiendo una importante disminución de volumen, debida posiblemente a un reacomodamiento de las partículas del suelo a esta "nueva estructura" de suelo mejorado o "compactado".

El objetivo de todo este apartado no ha sido explicar el mecanismo último del colapso, sino más bien tratar de comprender a través de ejemplos simples y factibles, cómo la entrada de agua en una estructura metaestable origina una desestabilización o sensibilización en la resistencia existente entre los vínculos.

Tampoco se ha pretendido hacer una revisión exhaustiva de todos los mecanismos que diversos investigadores han propuesto para explicar el fenómeno del colapso, sino tomar en consideración aquellos más documentados y que mejor se adaptan al caso de suelos loésicos con estructura macroporosa que serán objeto de un especial análisis en estas notas.

Si se ensayara una tercera muestra C, en la cual, la primera etapa a humedad natural se hiciera hasta sólo 100 kPa, y a esa presión se la inundase, la magnitud de colapso será menor, tal como se advierte en la Figura 5.6. O sea, queda demostrado que la magnitud de colapso depende de la presión externa actuante.

4.8.4 Colapso Relativo

Se define como Colapso Relativo (δ_{col}) a la diferencia entre la deformación unitaria saturada (ε_{SAT}), y la deformación unitaria para el suelo a humedad natural (ε_{HN}), ambas a una misma tensión σ :

$$\delta_{col} = \varepsilon_{SAT} - \varepsilon_{HN}$$

donde:

$$\varepsilon_{SAT} = \frac{h_0 - h_{SAT}}{h_0} \cdot 100$$

$$\varepsilon_{HN} = \frac{h_0 - h_{HN}}{h_0} \cdot 100$$

Existe una aparente anarquía, tanto en su denominación como en la forma de calcularlo. En la Tabla 2 se señalan algunas de las más conocidas.

Una forma sencilla determinar el Colapso Relativo es realizar dos ensayos de compresión confinada: uno a humedad natural y otro saturado. El Colapso Relativo es la diferencia de ordenada entre ambas curvas, tal como se señala en la Figura 4.6.

4.8.5 Suelos autocolapsables y potencialmente colapsables

En el gráfico semilogarítmico que representa el comportamiento de un suelo, un ensayo a compresión confinada realizado a una condición saturada (Figura 4.6), 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 ($\sigma_{F.SAT}$) o Presión Inicial de Colapso ($\sigma_{i.col}$).

Tabla 2: Denominación y ecuaciones para definir el colapso relativo.

AUTORES	DENOMINACIÓN	ECUACION
Código chino	Colapso Unitario	$\delta_S = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_0$
Normas Soviéticas	Colapso Relativo	$\delta_S = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_1$
Bally (1973)	Asentamiento adicional	$img = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_1$
Jenning & Knight (1957)	Potencial de colapso	$CP = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_1$
Feda (1966)	Coefficiente de colapso	$i_C = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_{HN}$
Milovic (1968)	Grado de subsidencia	$I_m = (h_{HN} - h_{SAT}) / h_{HN}$

h_{HN} = Altura de la probeta a humedad natural (antes de la inundación) cargada a una presión cualquiera σ .

h_{SAT} = Altura de la probeta saturada (después de producido el colapso) cargada a la presión σ .

h_0 = Altura inicial de la probeta a humedad natural.

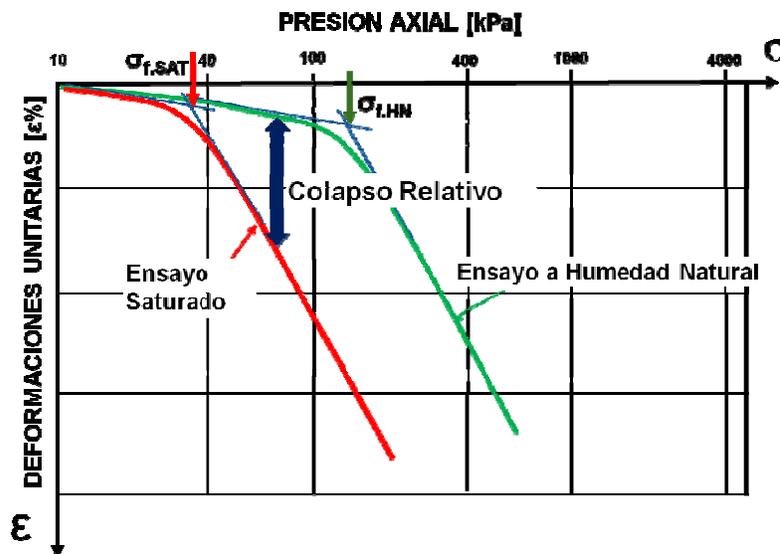
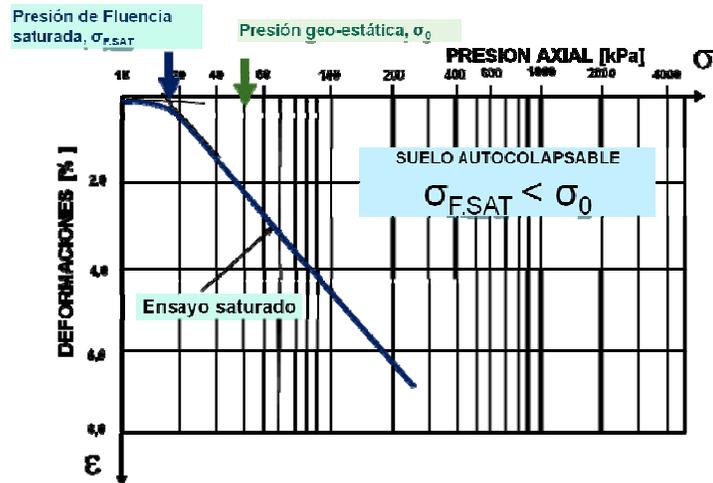


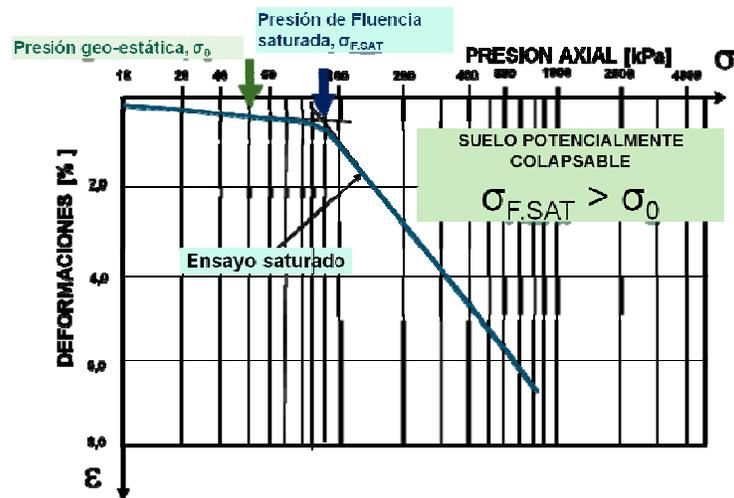
Figura 4.6: Definición de Colapso Relativo

En principio se establece que para presiones menores a esta, el suelo tiene un comportamiento elástico y los asentamientos por colapso son bajos y/o 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.

Se dice que un suelo es **auto colapsable** cuando la presión de tapada o geostática (σ_0) es superior a la Presión Fluencia Saturada ($\sigma_{F.SAT}$). Esto quiere decir que cuando en ese suelo se produzca el humedecimiento, se producirán asentamientos importancia con solamente la acción de su peso propio (Ver Figura 4.7.a).



a) Suelos autocolapsables



b) Suelo potencialmente colapsable

Figura 4.7. Suelos autocolapsables y suelos potencialmente colapsables.

Se designa con **suelos potencialmente colapsables** a aquellos suelos en los que la presión de tapada o geo-estática (σ_0) es menor a la Presión de Fluencia Saturada ($\sigma_{F.SAT}$) (Ver Figura 4.7.b).

4.8.6 Perfiles de colapsabilidad

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 de Fluencia Saturada ($\sigma_{F.SAT}$) con la Presión total (σ_T) igual: a la suma de la presión debida a la carga aplicada ($\Delta\sigma$) más la presión por peso propio (σ_0).

En la Figura 4.8 se presenta un perfil de suelo en el que se ha dibujado la variación de ambas presiones (la Presión de Fluencia Saturada y la Presión Total) en función de la profundidad, para dos estados de cargas: en la Figura 4.8.a, el correspondiente a las presiones geostáticas y en la Figura 4.8.b el correspondiente a las presiones totales provocadas por una carga en la superficie del terreno más las presiones geostáticas.

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 de Fluencia Saturada 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.

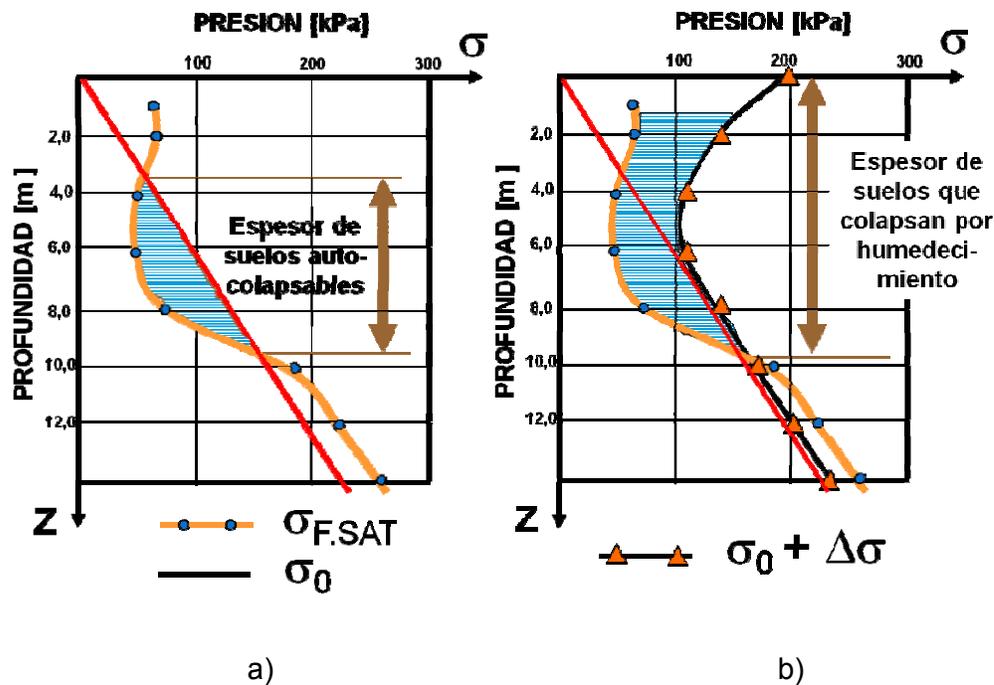


Figura 4.8. Perfiles de colapsabilidad.

Es importante tener estos perfiles, pues puede cometerse errores fatales en el diseño de fundaciones superficiales en suelos colapsables. Así, en la Figura 4.7 en los primeros dos metros los suelos no son autocolapsables. La Presión de Fluencia Saturada es mayor que la presión de geostática, la primera, tiene un valor de 70 kPa, y la segunda, un valor aproximado de 18 kPa. O sea, que podría pensarse en fundación superficial con un incremento de presión aproximado de $70 - 18 = 52$ kPa. Todo estaría bien, si solamente se prevé un humedecimiento del primer metro. Pero si el humedecimiento alcanzara niveles inferiores a los -4,00 metros, a esa profundidad el suelo autocolapsará y se asentará todo lo que este encima de ese nivel (el suelo superior y las fundaciones). También, ocurrirán asentamientos si se utilizaran tensiones de contacto inferiores a 52 kPa, incluso se asentarán zonas sin carga en superficie.

En zonas con suelos colapsables es menester identificar los suelos de esa manera a través de perfiles de colapsabilidad a fin de diseñar fundaciones que no sufrirán asentamientos cuando sucedan los humedecimientos.

En la Figura 4.8.b se presenta el caso de una fundación superficial que transmite una tensión de contacto de 200 kPa. En este caso aumenta el espesor de suelos que colapsarán cuando se produzca un humedecimiento por que la tensión total es mayor

que la Presión de Fluencia Saturada. Si aumenta el espesor del suelo colapsable también aumentan los asentamientos.

4.9 MAGNITUD DEL ASENTAMIENTO POR COLAPSO

4.9.1 Definiciones:

La magnitud del asentamiento por colapso producido por humedecimiento del terreno depende de:

- Factores intrínsecos del suelo (características físico-mecánicas), y de
- Factores externos al suelo (estado tensional y del área inundada)

Se define al **asentamiento adicional por colapso total** ($S_{col.T}$) de un manto de suelos colapsables de espesor H_t , a la sumatoria:

$$S_{col.T} = \sum_{j=1}^n S_{col.j} = \sum_{j=1}^n \delta_{col.j} \times H_j$$

donde:

H_t = $H_1 + H_2 + \dots + H_j + \dots + H_n$

H_j = Espesor del estrato j

$S_{col.j}$ = Asentamiento adicional por colapso del estrato j

$\delta_{col.j}$ = Colapso Relativo del estrato j a la presión σ_{zj}

σ_{zj} = Presión total (peso propio + incremento de presión) en el estrato j.

4.9.2 Características físico-mecánicas:

Un aspecto importante del comportamiento de este tipo de suelos y que por lo tanto influyen en la magnitud de los asentamientos es su marcada **heterogeneidad**. Los suelos loésicos colapsables del centro de la Argentina, suelen considerarse como suelos homogéneos, pero en realidad poseen una apreciable heterogeneidad extendida dentro de la masa. Algunos de estos aspectos pueden ser puestos en evidencia a través de ensayos geotécnicos.

La determinación de los parámetros tenso-deformacionales como el colapso relativo (δ_{col}) puede diferir de 1,5 a 2 veces, incluso si se lo hace a partir de probetas gemelas talladas de un único bloque de suelo.

Esto sólo se explica a través de la gran heterogeneidad local que presentan estos suelos, en los cuales existen macroporos dejados por raíces o insectos, y de concreciones aisladas de carbonatos, etc., que pueden hacer variar las características deformacionales en órdenes de magnitud de los arriba señalados.

Otro aspecto que puede señalarse, es la heterogeneidad en la variación local de las características químicas y mineralógicas, las cuales son difíciles de ser advertidas por métodos usuales de investigación. Para corroborar todo este tipo de heterogeneidades, en la Figura 4.9 se muestran, líneas de igual asentamiento para un estanque experimental de 30 metros de lado, al cabo de 3 meses de continua inundación. Pueden observarse asentamientos diferenciales de hasta 60 cm entre dos esquinas opuestas. Esto induce a pensar que aunque las propiedades tenso-deformacionales pudieran ser aproximadamente constantes, vías preferenciales de humedecimiento (canalículos

verticales dejados por raíces de hierbas) pueden saturar mayores espesores o presentar curvas de iso-saturación apartadas del modelo teórico.

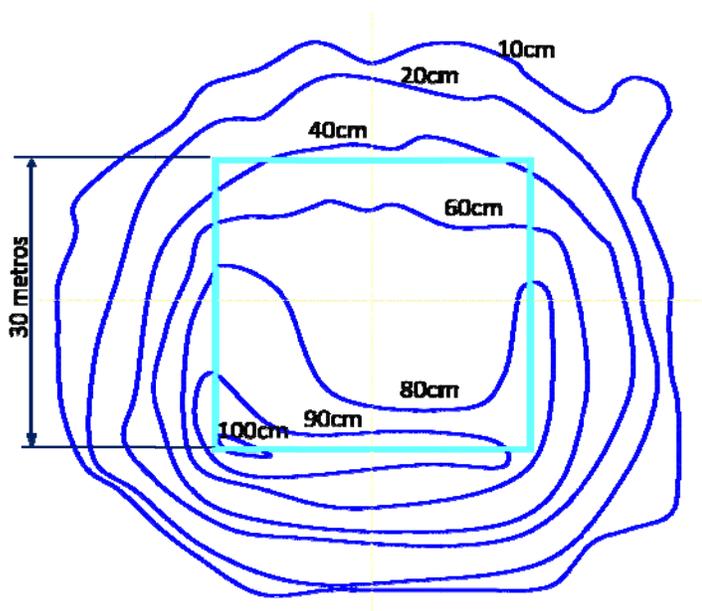


Figura 4.9: Curvas iguales asentamientos por colapso, en un estanque de 30 x 30 metros, al cabo de tres meses de continua inundación.

En resumen, una de las características principales que deben tenerse siempre en cuenta en el cálculo de la magnitud de los asentamientos por colapso es que estos frecuentemente no serán uniformes, ya sea por las causas antes expuestas como por otros factores como por ejemplo la dimensión del área inundada.

4.9.3 Área inundada:

Otro de los aspectos que influyen considerablemente en la magnitud de los asentamientos por colapso son: el tipo de humedecimiento que se realice dentro de la masa del suelo y las dimensiones del área humedecida. Se pueden distinguir cuatro tipos de humedecimientos:

1. Humedecimiento localizado del suelo debido generalmente a la rotura de conducciones hidráulicas de las construcciones. En estos casos es casi imposible predecir a priori la forma en planta y en corte de estos humedecimientos y por lo tanto hacer una estimación de la magnitud de los asentamientos y su distribución en planta.
2. Humedecimiento extenso de todo el perfil del suelo causado por una importante infiltración de agua (rotura de canales o efluentes industriales). Los asentamientos en estos casos pueden ser importantes y dañinos para las construcciones, especialmente cuando los asentamientos son desiguales.
3. Una elevación uniforme del nivel freático debido generalmente a una recarga del freático causado por una fuente lejana.
4. Un aumento gradual y lento del contenido de agua debido, por ejemplo a, la condensación del vapor y una acumulación de humedad causada por cambios en las condiciones ambientales (pavimentación de la superficie del terreno).

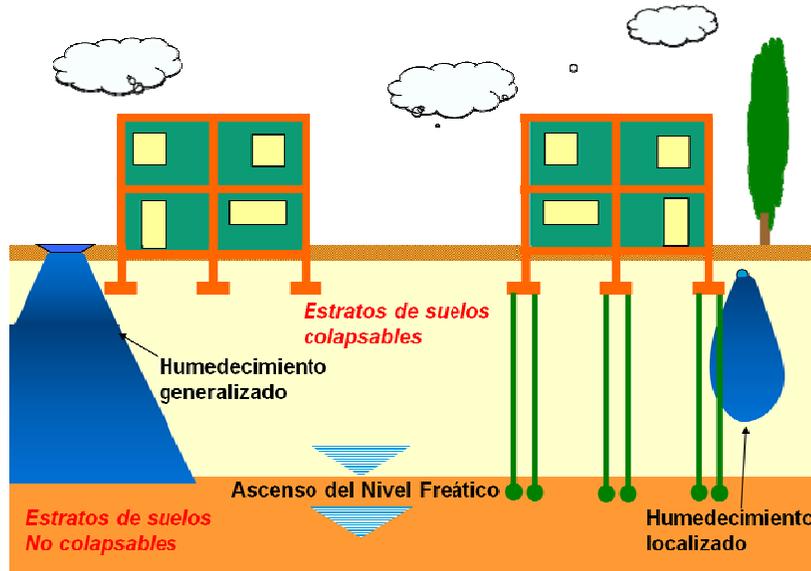


Figura 4.10: Distintos tipos de humedecimientos en suelos colapsables.

Un aspecto importante a señalar en los dos primeros tipos de humedecimientos que una construcción puede estar afectada parcialmente por los mismos. Así, como se esquematiza en la Figura 4.10 algunas zapatas está afectadas por el humedecimiento y otras no lo está. Esto genera asentamientos diferenciales al producirse el humedecimiento, o sea con la construcción en servicio.

Estos asentamientos son los que producen las agrietamientos o de los muros o de las



diferenciales típicas fisuramientos estructuras.

Figura 4.11. Agrietamiento de muro de una vivienda por humedecimiento localizado

En cuanto a la forma y las dimensiones del área humedecida, se ha demostrado experimentalmente que los asentamientos por colapso calculados con la ecuación indicada arriba, son sólo aplicables cuando la superficie de saturación o fuente de humedecimiento es del orden de $\frac{2}{3}$ a 1 vez el espesor de los sedimentos colapsables. En cambio, cuando esta relación es menor y la zona humedecida se aparta de la

supuesta unidimensional, los asentamientos reales son sustancialmente menores a los calculados.

Por tal motivo algunos investigadores coinciden en afirmar que dicha ecuación debe estar afectada de un coeficiente (m) que tenga en cuenta el tipo, la forma y las dimensiones del área humedecida:

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

donde B y L son el ancho y largo de la fuente de inundación, y Z el espesor de la zona humedecida.

4.9.4 Estado tensional:

La magnitud del asentamiento adicional por colapso, es función de la tensión actuante en el manto de suelo considerado. Si se analiza el caso particular de una zapata apoyada sobre la superficie del terreno, el asentamiento adicional por colapso será función de la forma y las dimensiones de área cargada, del espesor del manto susceptible al colapso, y del tipo y la forma de la zona humedecida. Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que si el espesor de los mantos de suelos colapsables que se encuentran por debajo de la zona comprimida es suficientemente importante como para que pueda colapsar por peso propio, la amplitud del asentamiento no depende prácticamente de la forma y de las dimensiones de las fundaciones..

En las numerosas experiencias realizadas sobre zapatas a escala real, se ha comprobado que los asentamientos adicionales por colapso medidos pueden llegar a ser entre 1,5 a 2 veces mayores que los calculados, sobre todo en zapatas con anchos inferiores a los 2,0 m de ancho.

4.10 METODOS DE IDENTIFICACIÓN

4.10.1 Aspectos generales:

A partir de la década de los años 50, se generó una preocupación manifiesta por parte de diferentes investigadores, en identificar y clasificar la potencialidad al colapso en los distintos suelos.

Estos intentos a escala mundial se han enfrentado fundamentalmente con dos inconvenientes o limitaciones, como son:

1. **La gran variedad de tipos de suelos que colapsan por humedecimiento:** Así, por ejemplo, métodos probados en ciertos países o regiones en determinados tipos de suelos no han podido hacerse extensivos a suelos de otras zonas, cuyo origen geológico y genético es francamente diferente.
2. **La frecuente heterogeneidad de los suelos colapsables por humedecimiento:** En este sentido hay coincidencia entre los investigadores, que han estudiado suelos colapsables de distinto origen geológico. Es frecuente encontrar una variación en el grado de cementación (por ejemplo, debido a carbonatos) en sólo algunos centímetros. En otros casos esta heterogeneidad es debida a la presencia de grandes macroporos dejados por raíces o insectos.

Esto ha llevado a una gran variedad de metodologías para establecer la susceptibilidad al colapso de los suelos y una anarquía en la terminología empleada en los diferentes países para su clasificación. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los diferentes investigadores o códigos han tendido a discretizar el comportamiento del suelo frente al

colapso en dos grupos: suelos que colapsan bajo peso propio y suelos que colapsan bajo una carga mayor.

Rocca (1985) ha confeccionado una tabla de equivalencias, con la denominación que reciben en los distintos países.

4.10.2 Clasificación de los métodos de identificación de suelos colapsables:

En cuanto a los tipos de métodos de identificación propiamente dichos, varios han sido los enfoques que se han propuesto. Estos podrían clasificarse en tres grupos:

PAIS	COLAPSO BAJO PESO PROPIO AUTOCOLAPSO	COLAPSO BAJO CARGA
Argentina	<i>Autocolapsable</i>	<i>Potencialmente colapsables</i>
China	<i>Tipo 1</i>	<i>Tipo 2</i>
Estados Unidos	<i>Colapsables</i>	<i>No colapsables</i>
Ex Unión Soviética	<i>Tipo II</i>	<i>Tipo I</i>

Tabla 3: Equivalencia en la denominación de los suelos colapsables (Rocca, 1985).

- ❑ Métodos basados en parámetros físicos de identificación de suelos, tales como Peso Unitario, Límites de Consistencia, Granulometría, etc.
- ❑ Métodos basados en ensayos mecánicos, principalmente en ensayos edométricos.

Existe una abundante bibliografía sobre los diferentes métodos de clasificación a identificación, en las cuales se ha realizado un análisis crítico sobre los diferentes métodos. Por lo tanto, en este apartado no se insistirá en ello, sino más bien se hará un enfoque general del problema y se presentarán aquellos conceptos v métodos que posteriormente serán utilizados en el desarrollo de estas notas.

Métodos basados en parámetros físicos de suelos

En general, la mayoría de estos métodos de identificación tienen más bien un carácter cualitativo que cuantitativo, pretendiendo ubicar el suelo analizado en algunos de los grupos mencionados en la Tabla 3.

En estas notas solamente se analizarán tres de ellos, que tienen en común que relacionan el límite líquido y el peso unitario seco.

a) **Denison** (1951) establece el Coeficiente de Colapso (k) igual a (39 y 40):

$$k = \frac{e_L}{e}$$

y el colapso ocurrirá cuando la relación de vacíos del suelo en estado natural (e) es mayor que la relación de vacíos correspondiente al Límite Líquido (e_L).

b) **Gibbs** (1961) establece una Relación de Colapso (R) igual a (41 y 42):

$$R = \frac{w_{SAT}}{w_L}$$

y el colapso ocurrirá cuando la humedad de saturación del suelo (w_{SAT}) es mayor que el Límite Líquido (w_L).

c) **Código de edificación de la U.R.S.S** (1962) establece un Índice de Colapso (R) igual a (43 y 44):

$$R = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0}$$

y el colapso ocurrirá cuando R es mayor de -0,10.

En la Figura 4.12 se han superpuesto los puntos correspondientes a pares de valores del Peso Unitario Seco y el Límite Líquido de suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. De ella se desprende que los valores de los parámetros obtenidos son valores típicos de la formación loésica de Córdoba, y que para todas las metodologías aquí presentadas la gran mayoría de los suelos son colapsables, puesto que están incluidos dentro de las zonas que los clasifican colapsables. Y como puede verse hay suelos no colapsables que están mezclados con ellos. Por lo tanto se concluye que estas metodologías no pueden utilizarse al menos en los suelos loésicos de Argentina.

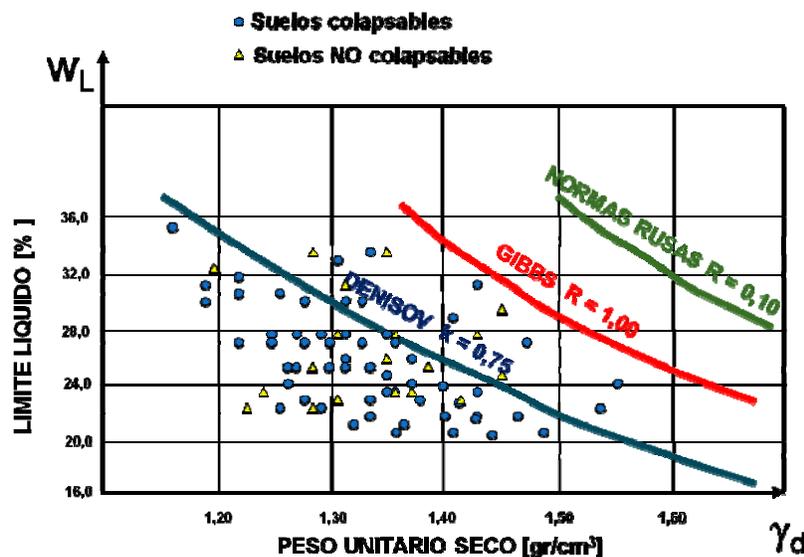


Figura 4.12: Métodos basados en parámetros físicos de los suelos comparados con suelos colapsables de la ciudad de Córdoba.

Métodos basados en ensayos edométricos o de compresión confinada.

Estos métodos están basados en la Presión Inicial de Colapso o Presión de Fluencia Saturada. La determinación del grupo al cual pertenece el suelo estudiado (auto colapsable o colapsable bajo carga), se realiza comparando la presión de tapada o geostática con la presión a la cual se produce el colapso. Asumiendo como hipótesis que el colapso por humedecimiento ocurre sólo a partir de una cierta presión por encima de la cual, la resistencia estructural del suelo es superada.

La magnitud de esta presión, para la cual se produce el desmoronamiento de la estructura del suelo, ha sido designada por algunos autores como:

- Presión Inicial de Colapso ($\sigma_{i.col}$)
- Presión de Fluencia Saturada (σ_{F-SAT}).

Experimentalmente se ha demostrado que cuando la presión total en el suelo (σ_T), ya sea por cargas externas y/o peso propio, es menor que esta magnitud, no se producen asentamientos de colapso por humedecimiento. Desde un punto de vista teórico la Presión Inicial de Colapso o Presión de Fluencia debería ser aquella para la cual el Colapso Relativo es igual a cero, pero desde un punto de vista práctico una pequeña magnitud de colapso puede asumirse como permisible. Siguiendo este concepto, por ejemplo, las Normas Soviéticas SNIP, definen a la Presión Inicial de Colapso como aquella presión para la cual en una probeta instalada en un edómetro, se produce un Colapso Relativo del 1,00 %, en tanto el Código Chino lo establece en 1,50%.

En la Figura 4.13.a se han representado las curvas presión-deformaciones unitarias de dos ensayos edométricos del mismo suelo, uno a humedad natural y el otro en estado saturado, ambas en escala natural, también se ha graficado la curva de Colapso Relativo en función de la presión axial. La Presión Inicial de Colapso se obtiene entrando con el 1,0% o 1,5%, hasta encontrar la curva, y de esa manera la Presión Inicial de Colapso.

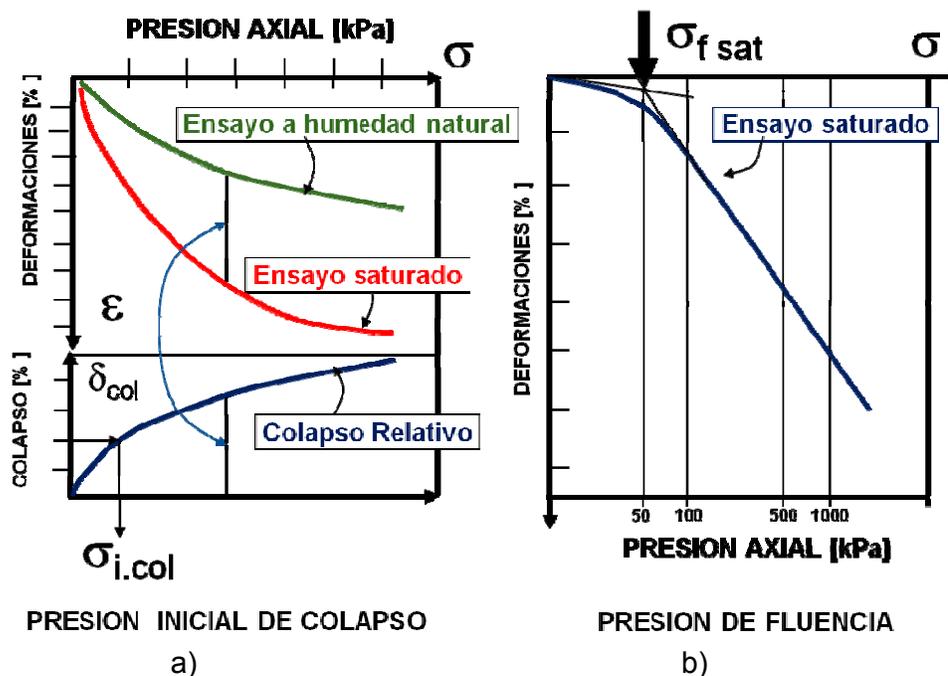


Figura 4.13: Métodos para determinar la Presión Inicial de Colapso o la Presión de Fluencia Saturada.

En tanto, la Presión de Fluencia Saturada se obtiene trazando dos líneas tangentes a los tramos rectos de la curva de compresibilidad dibujada en escala semi logarítmica en un ensayo edométrico.

En la Figura 4.14 se presenta la correlación que realizaron Lin y Wang (1988) entre los valores de la Presión de Fluencia Saturada y la Presión Inicial de Colapso (el Código Chino la establece para un valor de $\delta_{i.col} = 1,50\%$). Se puede observar que

aproximadamente se establece una relación directa entre ellas. Esto no es de extrañar, puesto que conceptualmente ambas definiciones tratan de fijar la presión a la cual la estructura del suelo saturado comienza a colapsar.

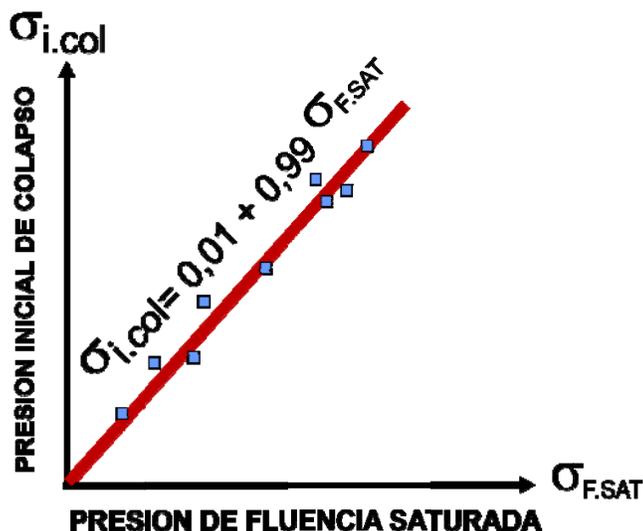


Figura 4.14. Comparación entre ambos métodos para establecer la Presión inicio del colapso (Lin y Wang, 1988).

Los numerosos intentos realizados en ensayos in situ para comprobar la validez de esta hipótesis parecen indicar, a primera vista, que las predicciones tienen buen acuerdo con la realidad en muchos casos, pero en cambio en otros la diferencia entre lo predicho y lo sucedido es importante, sobre todo en aquellos casos referidos al colapso por peso propio.

4.11 SOLUCIONES INGENIERILES EN SUELOS COLAPSABLES

4.11.1 *Consideraciones generales*

La primera cuestión que debe analizarse cuando se diseñan construcciones 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.

Hecha esta aclaración, a continuación, se tratará de ofrecer un panorama de las distintas soluciones ingenieriles que se adoptan en suelos susceptibles al colapso por humedecimiento, cuando las probabilidades de que se produzca el fenómeno son altas.

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.

Estas soluciones se pueden dividir en:

Tratamiento del suelo colapsable con vista a eliminar la tendencia al colapso a lo largo de todo el estrato de suelos desmoronables.

Diseño de elementos constructivos que eliminen o disminuyan a límites razonables la posibilidad que se inicie el colapso.

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.

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.

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.

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.

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.

Los mejores resultados han sido alcanzados con una óptima combinación de las ventajas que individualmente tiene cada uno de los tres grupos. La experiencia ha probado que las medidas constructivas y las medidas de aislación del agua por sí solas no pueden resolver todos los problemas de inestabilidad que provoca el colapso del suelo. Así, la adopción de soluciones exclusivamente para la superestructura (por ejemplo: fundaciones profundas), sin un adecuado diseño que eviten daños en los otros elementos de la construcción, como pisos, desagües, etc., han provocado serios daños en estas partes de la construcción, que podrían haber sido evitados aplicando medidas tendientes a evitar el ingreso del agua en el terreno.

La eficacia del diseño adoptado en cada caso depende en gran medida de la calidad de las investigaciones geotécnicas realizadas. La información básica que éstas deben suministrar son: el espesor del manto de suelos colapsables y la magnitud del colapso bajo peso propio o bajo carga de todos los estratos del perfil.

Una incorrecta estimación de estos parámetros puede llevar a proponer y construir soluciones ingenieriles totalmente opuestas a las correctas. La confección de perfiles de colapsabilidad como los presentados permite establecer la existencia o no de suelos autocolapsables, sus espesores aproximados y la profundidad a la que se encuentran. Esta metodología de análisis es de gran ayuda, por ejemplo en la elección del procedimiento idóneo para estabilizar el terreno.

A continuación se presenta una descripción de las distintas soluciones ingenieriles más utilizadas en este tipo de suelos. En primer lugar se analizan el primer grupo de soluciones que se ha englobado bajo el nombre de: Mejoramiento de suelos; continuando luego con los otros dos grupos: Medidas para evitar la iniciación del colapso y fundaciones y/o estructuras insensibles a los fenómenos del colapso.

4.11.2 Mejoramiento de suelos colapsables

El objetivo principal de estas soluciones es eliminar o disminuir apreciablemente la susceptibilidad al colapso del suelo, bien disminuyendo la porosidad del suelo (compactación) o bien aumentando la resistencia estructural entre las partículas del suelo (métodos físico-químicos). Una de las formas de clasificar los métodos de mejoramiento o estabilización, ha sido precisamente ésta, o sea teniendo en cuenta la acción resultante sobre el suelo.

Evstatiev (1988) propone la siguiente clasificación de los métodos de estabilización de suelos loésicos, la cual puede hacerse extensiva a suelos colapsables:

- a) Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por compactación.
- b) Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por modificación de su granulometría.
- c) Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por la creación de nuevos contactos cohesivos.
- d) 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.
- f) Geomembranas.
- g) Métodos de mejoramiento de las propiedades del suelo por drenaje.
- h) Corrección de taludes y terraplenes.

Dado que el objetivo de estas notas es hacer una introducción a los suelos colapsables en una carrera de grado, no se van a hacer una explicación de cada uno de ellos. Además, en otras asignaturas de la carrera se podrán estudiar algunos de estos métodos con mayor detalle.

4.11.3 Medidas conducentes a evitar la iniciación del colapso:

Arriba, se señalaron 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. En cambio 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. 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 desagües de techos y patios hacia el exterior de la construcción.
- c) Instalación de membranas impermeables o pavimentación de la superase 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 riesgos a que está expuesta la misma, de modo que su actividad y/o descuidos no inicie procesos de humedecimiento del terreno.

Las medidas de protección, en otros tipos de obras civiles (canales o caminos), tienen la misma filosofía, es decir, elementos de protección que impidan o dificulten la entrada del agua en el terreno de fundación. Así por ejemplo, en las obras lineales se debe prestar una especial atención al diseño del sistema de alcantarillado y de desagües. En algunos casos, estas obras suelen seguir parcialmente las curvas de nivel del terreno, convirtiéndose en verdaderas presas que impiden el natural escurrimiento de las aguas, provocando la acumulación de agua en su entorno, lo que genera un humedecimiento generalizado del terreno de fundación con los consecuentes daños en la obra.

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 e 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.

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

El análisis de este apartado se centrará principalmente en el estudio de las fundaciones superficiales en suelos potencialmente colapsables, ya que el otro gran grupo de soluciones: fundaciones profundas mediante pilotes, será objeto de un examen detallado en los apartados siguientes.

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, y el diseño de elementos constructivos que eviten la introducción del agua en el terreno, señalados anteriormente.

4.12 RECAPITULACIÓN

Definido el concepto de colapso, el estudio se ha enfocado al análisis de los suelos colapsables por humedecimiento. En esta clase particular de suelos metaestables, el agente externo que desencadena el fenómeno de colapso, es el agua. En estos suelos un incremento de humedad puede provocar una disminución o anulación de las fuerzas que vinculan unas partículas con otras, y por lo tanto cambiar el estado de equilibrio en la estructura del suelo.

El colapso de la estructura del suelo depende fundamentalmente de dos causas: a) de la importancia de los cambios provoca dos por el agua en los vínculos existentes entre las partículas, y b) del estado tensional en los vínculos. O sea, para que se produzca el colapso es necesario un agente "sensibilizante", y un estado tensional capaz de provocar la des-estabilización de la estructura del suelo.

Por este motivo, los métodos que mejor reflejan la susceptibilidad al colapso de un suelo, son aquellos basados en ensayos mecánicos, donde ambos factores están presentes.

La gran subdivisión que se hace a los suelos colapsables, parte precisamente de verificar, cómo es el comportamiento del suelo en su estado tensional "original" o bajo su propio peso. Si se produce el colapso bajo este estado, se indica que el suelo es verdaderamente colapsable o autocolapsable, en cambio si el fenómeno no se produce, se señala que el suelo es condicionalmente colapsable o colapsable bajo carga.

En este contexto, diversos investigadores introducen el concepto (también tensional), de Presión Inicial de Colapso" ($\sigma_{i.col}$) o Presión de Fluencia Saturada" ($\sigma_{F.SAT}$), como aquella presión a la cual se produce el colapso. Desde un punto de vista teórico esta presión debería ser aquella para la cual el colapso es igual a cero, pero desde un punto de vista práctico se asume que una pequeña magnitud del colapso es permisible. Por ejemplo, las normas Soviéticas lo toman igual al 1,0%, las Chinas igual al 1,5%. En cambio en Argentina, se utiliza más la Presión de Fluencia Saturada, que se obtiene de

forma similar a la Presión de preconsolidación. No obstante esta diferencia metodológica, en ambos casos el concepto es el mismo.

Con respecto a las metodologías usadas para establecer la susceptibilidad al colapso de un suelo o de un perfil de suelo, han sido analizadas las que utilizan el concepto de Presión Inicial de Colapso y la magnitud del colapso. Esta selección se realizó fundamentalmente por las siguientes causas: primero, porque se hacen en base a ensayos mecánicos, donde intervienen el agente externo (el agua) y el estado tensional del suelo, y segundo porque permiten establecer, ya sea a través de un perfil de colapsabilidad o la magnitud del colapso, cómo será realmente el comportamiento del terreno ante las sollicitaciones producidas por la obra de ingeniería.

Los perfiles de colapsabilidad relacionan, en profundidad, el peso propio de las tierras con la Presión Fluencia Saturada, esto permite determinar el espesor de suelos autocolapsables, o el espesor de los suelos que colapsarán si además del humedecimiento se aumenta el estado tensional. Estos perfiles son de gran ayuda al proyectista de fundaciones en suelos colapsables, dado que le permiten conocer en forma global la magnitud del problema al que está enfrentado. No obstante, su utilidad no termina allí sino que por el contrario, estos perfiles le permiten tomar decisiones sobre cuáles son las soluciones ingenieriles más convenientes del proyecto. Pues con su ayuda, se podrá seleccionar el método de mejoramiento del terreno, la cota de fundación de una fundación profunda, la magnitud de la carga por rozamiento negativo, etc.

En un abundante número de proyectos, no es suficiente haber realizado una caracterización o clasificación del terreno, sino que es necesario determinar la magnitud de los asentamientos que pueden producirse en las obras. Los asentamientos por colapso depende básicamente de dos tipos de factores: intrínsecos y extrínsecos.

Se señalan como intrínsecos aquellos factores propios del suelo, como son sus propiedades físicas y mecánicas. El comportamiento del suelo dependerá: del tipo de estructura o la forma en que están ordenadas las partículas, del grado de compacidad, del tipo de vínculos que unen grano con grano, etc. Estos factores, en general, no se encuentran homogéneamente distribuidos, por lo cual los parámetros que definen sus propiedades tenso-deformacionales pueden sufrir variaciones locales importantes.

Los factores externos que influyen en la magnitud de los asentamientos son dos: el área inundada y el estado tensional. Estos dos factores influyen considerablemente en la magnitud de los asentamientos por colapso, y por tal motivo deben ser analizados específicamente en los cálculos. Respecto al primero de los factores, a pesar que se han realizado importantes trabajos teóricos, la información experimental indica que todavía existe cierta indeterminación en su estimación. Por tal motivo, la influencia del área inundada en la magnitud de los asentamientos, se limita a realizar correcciones de tipo empírico. En cuanto a la influencia que el estado tensional tiene en los asentamientos, las investigaciones se han centrado especialmente en el estudio de cargas externas (zapatas) en la superficie del terreno.