



Comportamiento físico cuantitativo de los suelos finos: eólicos colapsibles y residuales expansivos

L. Zeevaert-Wiechiers
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM

(recibido: diciembre de 1998; aceptado: abril de 1999)

Resumen

En múltiples lugares de la corteza terrestre existen sedimentos eólicos finos de características colapsibles y suelos residuales con propiedades expansivas, los que en general se encuentran con grados muy bajos de saturación. Cuando aumenta el grado de saturación en los sedimentos eólicos finos, éstos sufren un colapso, debido a la leixiviación de los carbonatos de calcio y al reblandecimiento de la poca arcilla, que sostienen la estructura intergranular. En el caso de los suelos residuales de características expansivas, el aumento en el grado de saturación provoca reducción de la adherencia entre los granos e hinchamiento del mineral de arcilla, ocasionándose cambios importantes en el comportamiento mecánico. Lo anterior provoca deformaciones irregulares en la superficie de los suelos y en las construcciones que se apoyan sobre ellos. De ahí la necesidad de conocer los parámetros cuantitativos que rigen el comportamiento estático y dinámico de este tipo de suelos en relación con los cambios ambientales de humedad. La investigación básica es importante y necesaria en mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones, y deberá efectuarse en los diferentes tipos de suelos que se encuentran en la naturaleza.

Descriptores: suelos finos eólicos; suelos residuales; colapsibles; expansivos; comportamiento mecánico; parámetros cuantitativos.

Abstract

In many places of the earth crust there are fine sediments of eolian origin with collapsible characteristics, and residual soils with expansive features. In general, these soils are found with very low degrees of saturation. When the degree of saturation in fine eolian sediments increases, they suffer collapse because of the leaching of the calcium carbonates and the softening of the little clay, holding the intergranular structure. In the case of residual soils of expansive characteristics, the increase in the degree of saturation produces a reduction in the bond between the grains and the swelling of the clay mineral takes place, inducing important changes in the mechanical behavior such as irregular vertical displacements of the ground surface and of the engineering constructions on top of it. It is therefore, necessary to learn the quantitative parameters that govern the static and dynamic behavior of this type of soils with respect to the moisture-related environmental changes. Basic investigation is important and required in soil mechanics and foundation engineering and it shall be performed on the different types of soils found in nature.

Keywords: eolian fine sediments; residual soils; collapsible; expansive; mechanical behavior; quantitative parameters.

Prólogo

En múltiples lugares de la corteza terrestre existen sedimentos eólicos finos de características colapsibles y suelos residuales de características expansivas, que en general, se encuentran con grados muy bajos de saturación.

Cuando aumenta el grado de saturación en los sedimentos eólicos finos, éstos sufren colapso, debido a la lexivación de los carbonatos de calcio y reblandecimiento de la poca arcilla que sostienen la estructura intergranular.

En el caso de los suelos residuales de características expansivas, al aumentar el grado de saturación se provoca reducción de la adherencia entre los granos e hinchamiento del mineral de arcilla, ocasionándose cambios importantes en el comportamiento mecánico.

Esto provoca deformaciones irregulares en la superficie del suelo y en las construcciones que se apoyan sobre ellos.

Por lo anterior, surge la necesidad de conocer los parámetros cuantitativos que rigen el comportamiento estático y dinámico de este tipo de suelos, en relación con los cambios ambientales.

Es importante y necesaria la investigación en mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones, ya que deberá efectuarse en todos y los diferentes tipos de suelos que se encuentran en la naturaleza.

Con la experiencia del autor y el resultado de sus investigaciones, este trabajo tiene como propósito interesar y motivar a los ingenieros estudiosos para que día a día mejoren la tecnología básica racional de los suelos.

Introducción

La primera vez que el autor tuvo que tratar con suelos colapsibles y residuales de características expansivas fue en el año de 1951 en Ciudad Obregón, Sonora, para la cimentación de dos baterías de silos, así como otras instalaciones menores.

Los resultados de los análisis de laboratorio fueron verificados en el campo por el arquitecto Gustavo F. Aguilar, utilizando placas de 1 x 1 m apoyadas en estos suelos para verificar la correspondencia de los resultados de campo con los del laboratorio.

La estratigrafía del lugar mostró sedimentos eólicos del tipo loessial, intercalados con lentes de arcilla café con poco limo y arena fina, con carbonatos de calcio y arcilla con minerales de monmorilonita de calcio. Esta arcilla es conocida en la región como "Barrial" y muestra características expansivas.

Estos suelos tienen un grado muy bajo de saturación, ya que el espejo del agua superficial se encuentra a 23 m de profundidad; sin embargo, cuando se hidratan por falta de evaporación o por impregnación de agua en el subsuelo sufren cambios importantes en sus propiedades físicas.

Las arcillas que se originan en las zonas áridas de rocas ígneas y productos piroclásticos, presentan características expansivas debido al contenido de arcilla con minerales de monmorilonita de sodio o de litio, que son las más activas. Este tipo de suelos también se encuentra en los sedimentos lacustres de las arcillas típicas de la cuenca del valle de México, que al ser relevadas o disminuidas del

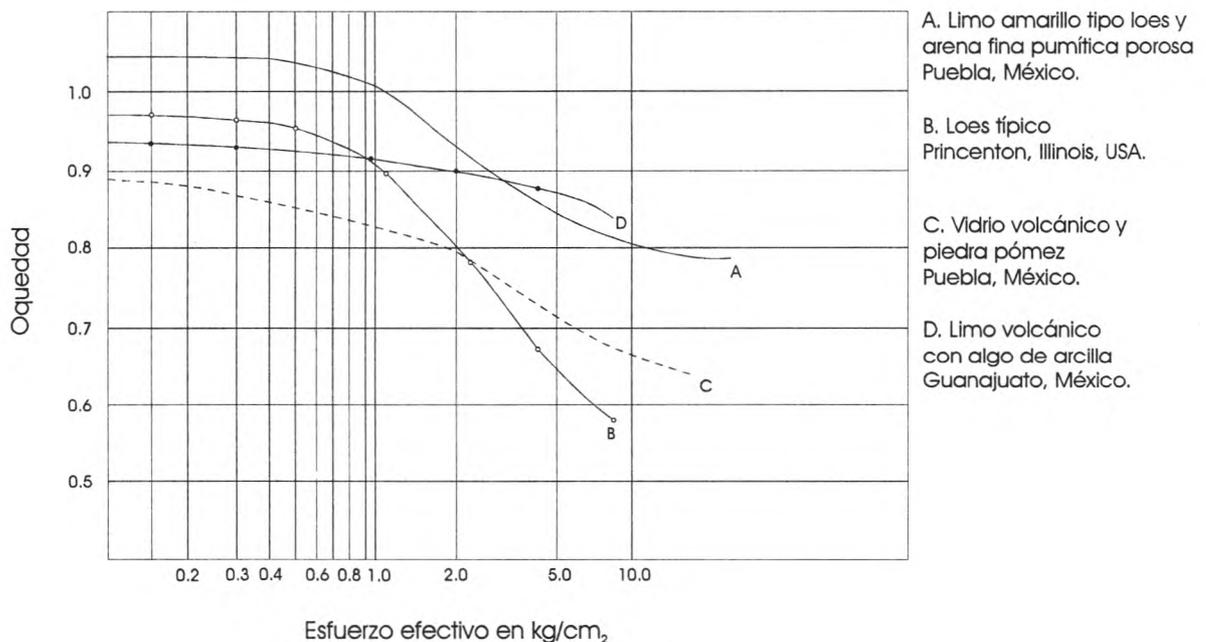


Figura 1. Curvas de compresibilidad de sedimentos eólicos finos

esfuerzo octaédrico que les proporciona la naturaleza, presentan el fenómeno de la “expansión elástica”, y a través del tiempo, se origina el “fenómeno de hinchamiento”. El tipo de mineral de arcilla se puede detectar por medio del índice de plasticidad, análisis químicos y térmicos diferenciales.

Con referencia a esto, se han realizado otras investigaciones en los suelos residuales expansivos de Coro, Colombia (Zeevaert, 1983), que muestran un alto potencial de expansión. Las investigaciones consistieron en pruebas con el odómetro en suelo inalterado tanto a esfuerzo vertical constante, como a volumen constante (Sánchez, 1979).

La interpretación de los resultados de las investigaciones realizadas y otras que se han dirigido en este tipo de suelos, se reportan posteriormente, mostrando los análisis de laboratorio y la metodología utilizada en dichas pruebas.

Por algunas observaciones de campo es comprensible la preocupación de los ingenieros constructores de las obras civiles que se construyen en la región, debido a los múltiples daños que se observan en las calles, banquetas, construcciones en general y rotura de instalaciones subterráneas.

Suelos eólicos colapsibles

Las propiedades de compresibilidad y resistencia al esfuerzo cortante en los sedimentos eólicos es de interés para el ingeniero de cimentaciones. El comportamiento mecánico requiere una interpretación y tratamiento especial (Zeevaert, 1983).

Los sedimentos eólicos finos contienen un alto porcentaje de limo con poca arena fina y se encuentran

cementados principalmente con carbonatos de calcio y algo de arcilla.

Cuentan con un grado bajo de saturación, son muy sensibles a los cambios de humedad o flujo de agua que pasa a través de ellos. La poca arcilla que tienen, pierde su resistencia y los carbonatos de calcio que cementan los granos se disuelve en el agua y son eluviados por los fenómenos que se citan, la estructura del suelo sufre un colapso cambiando en forma importante sus características físicas cuantitativas; por ésta razón es necesario investigar los cambios en sus propiedades naturales de humedad por concepto de la hidratación, cuando estos suelos han sufrido un colapso total toman el nombre de “sedimentos eólicos modificados”.

Los sedimentos eólicos finos se encuentran protegidos en la naturaleza por un estrato meteorizado de suelo impermeable arcilloso que evita la hidratación, preservando únicamente la humedad natural; por ésta razón, en climas áridos y de baja precipitación fluvial, los depósitos eólicos no sufren una modificación importante.

En la figura 1, se muestran varias curvas de compresibilidad obtenidas en el odómetro para suelos inalterados con la humedad natural, la curva **A** representa un material del estado de Puebla, México; con una oquedad inicial del orden de uno, se clasifica como de tipo loessial, contiene limo y algo de arena fina de pomez, su color es limonítico con huecos delgados verticales dejados por raíces.

La curva **B** muestra un suelo típico loessial de color limonítico del estado de Illinois, USA.

Las curvas **C** y **D** corresponden a suelos eólicos finos de origen volcánico de color limonítico.

Los sedimentos eólicos finos, tienen una oquedad natural del orden de 0.9 a 1.0, la compresibilidad volumétrica es función del estado octaédrico con que el suelo fue

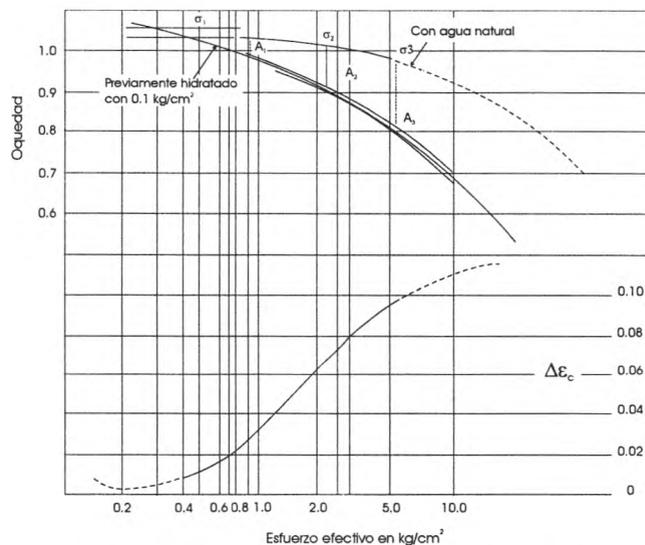


Figura 2. Curva de colapsos por hidratación de suelo tipo loessial

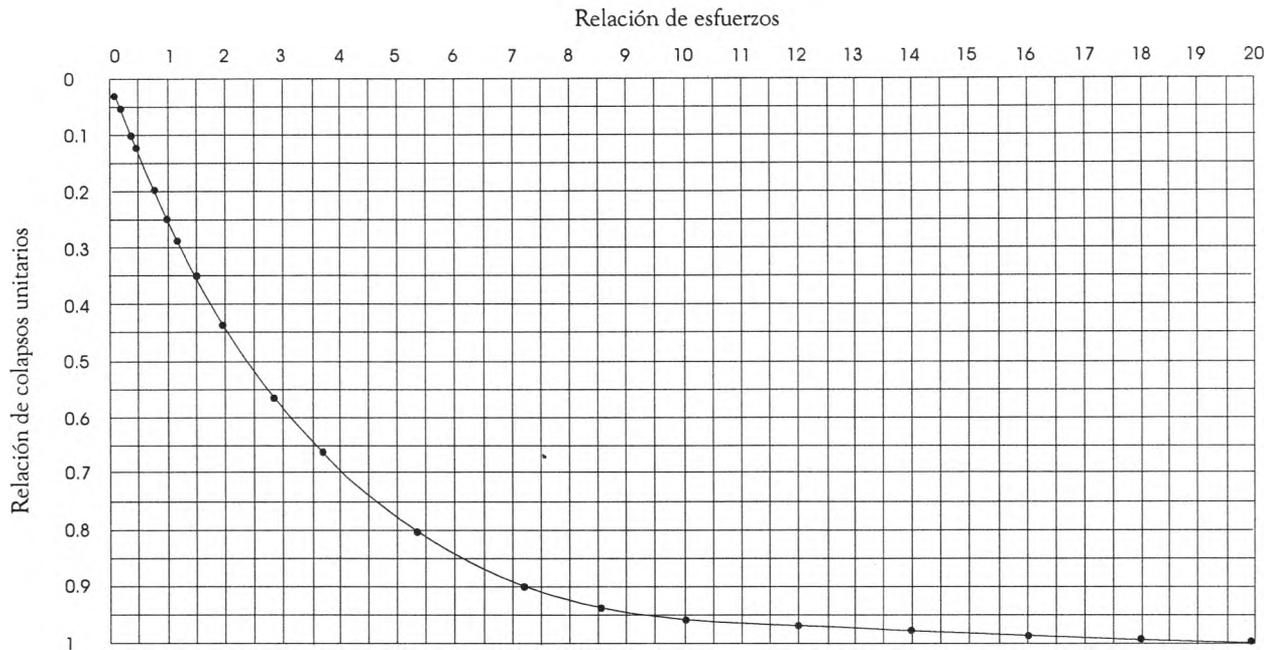


Figura 3. Relación de colapsos vs. esfuerzos

sometido en el campo; cuando se colapsan pierden la consistencia natural y se comportan como suelos friccionantes con una reducción importante de la oquedad.

Para ilustrar el comportamiento de estos suelos cuando se hidratan, en la figura 2 se muestra uno de los estudios efectuados en tres probetas de mismo horizonte que fueron hidratadas totalmente esperando el colapso máximo y comparando los resultados de una prueba de compresibilidad de una probeta igual, pero previamente hidratada (curva **B**, figura 2). Las curvas **A**₁, **A**₂ y **A**₃ muestran el comportamiento de la oquedad motivada por el colapso estructural al hidratar lentamente al suelo por capilaridad en el odómetro bajo la acción de los esfuerzos verticales σ_1 , σ_2 y σ_3 , respectivamente.

Nótese que si se continúa la curva de compresibilidad después de que el suelo fue hidratado y sufrió el colapso máximo, la configuración de la compresibilidad queda representada por la curva marcada con **B** (figura 2).

Se concluye de estas investigaciones que el colapso del suelo al ser hidratado, está comprendido entre las curvas **A** y **B**, por consiguiente, para un determinado esfuerzo vertical σ_c en el odómetro, la deformación unitaria para el colapso es

$$\Delta \varepsilon_c = \Delta e_c / (1 + e_c) \quad (1)$$

en donde e_c es la oquedad inicial en estado natural para el esfuerzo vertical σ_c y Δe_c el colapso para el mismo esfuerzo.

La ley fenomenológica para $\Delta \varepsilon_c$ vs σ_c que se muestra en la figura 3 es la siguiente

$$\Delta \varepsilon_c / \Delta \varepsilon_m = 1 - e^{-\alpha \sigma_c} \quad (2)$$

en donde $\Delta \varepsilon_m$ representa el colapso máximo que se presenta para el esfuerzo σ_m . El valor de (α) se determina para $\Delta \varepsilon_c / \Delta \varepsilon_m = 0.5$ correspondiente al valor de σ_{c5} . Así se obtiene

$$\alpha = \text{Ln} (1 - \Delta \varepsilon_c / \Delta \varepsilon_m) / \sigma_{c5}$$

El modulo de compresibilidad volumétrica para el colapso con el esfuerzo vertical σ_c se calcula con $m_c = \Delta \varepsilon_c / \sigma_c$. La figura 3 muestra la ley fenomenológica de pruebas del colapso de suelos tipo loessial de probetas inalteradas de Ciudad Obregón, Sonora.

El colapso máximo se determinó hidratando lentamente la probeta en el odómetro con varios esfuerzos confinantes.

El colapso máximo que se observó en estos suelos eólicos finos al quedar la probeta totalmente hidratada fue del orden de $\Delta \varepsilon_m = 12.5\%$. Lo que se originó para un esfuerzo vertical del orden de 15 kg/cm^2 , además, se concluye que estos suelos al ser totalmente hidratados, se comportan como suelos eólicos modificados, puramente friccionantes.

Suelo residual expansivo

Los materiales que caen en esta categoría con grados de saturación bajos se encuentran en suelos residuales de zonas volcánicas y rocas ígneas con poca precipitación pluvial, contienen alto contenido de arcilla con minerales de monmorilonita de calcio o sodio, los cuales son muy sensibles a los cambios de humedad o al contacto con el agua, aún no siendo descomprimido el suelo, se expande y

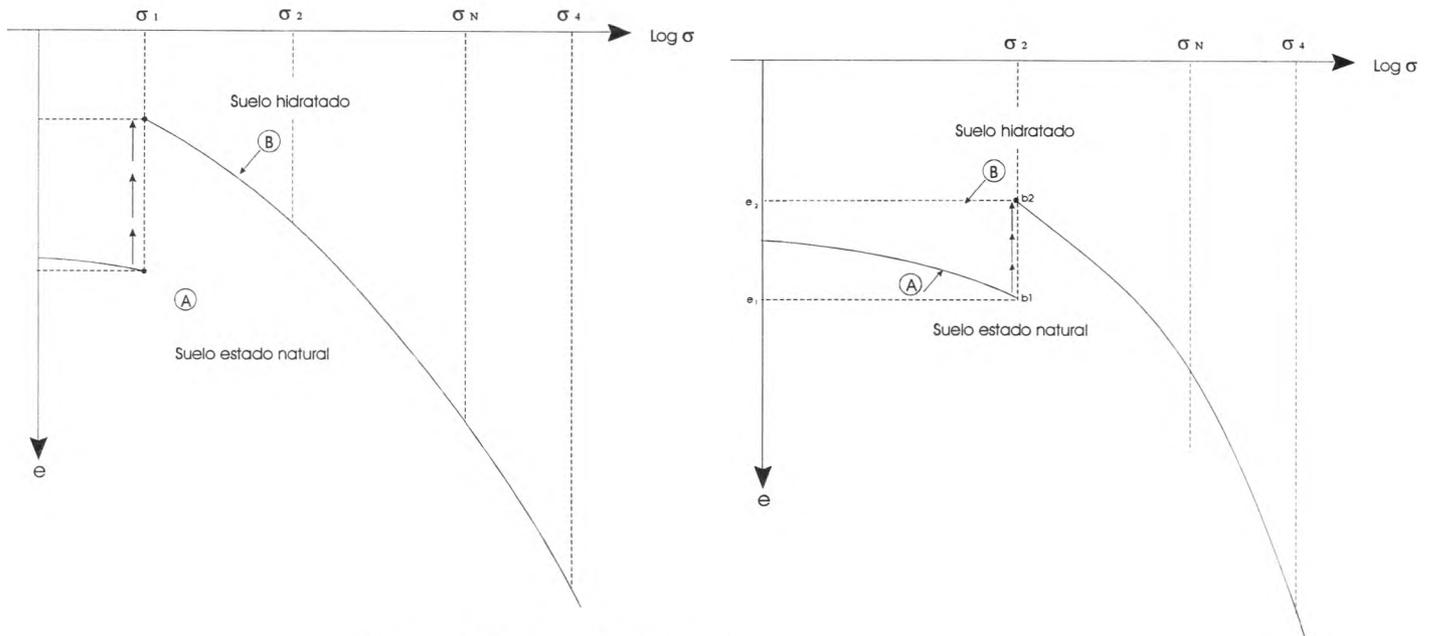


Figura 4. Expansión para un determinado confinamiento

se contrae fuertemente cuando se deshidrata (Zeevaert, 1983).

Para estimar la magnitud de las propiedades de expansión de estos suelos en el estado de confinamiento en el que se encuentran en la naturaleza se utiliza la prueba del odómetro.

El odómetro es un símil adecuado para representar las condiciones de confinamiento en el campo –para los análisis se requieren probetas de suelo inalterado, es decir, que el suelo no haya sido alterado en su microestructura y haya conservado el grado de saturación–, el anillo del odómetro debe tener una relación de diámetro a una altura no menor de ocho para confinar la probeta, con objeto de reducir el efecto de la fricción del suelo contra el anillo; las piedras porosas que se utilicen, deben contener únicamente la humedad que les proporcione el ambiente.

Para detectar el fenómeno natural del hinchamiento, se le aplican al suelo en estado natural incrementos iguales de esfuerzos verticales hasta un valor determinado que puede ser el equivalente al esfuerzo octaédrico de campo, y también para esfuerzos mayores o menores, para los cuales se requiere conocer la expansión o hinchamiento del suelo.

El esfuerzo octaédrico σ_{oct} o volumétrico equivalente es función del esfuerzo vertical σ_c y se calcula en el sitio $\sigma_{oct} = (1 + \nu) \sigma_c / 3(1 - \nu)$, en donde ν es la “relación de Poisson”.

Se permite que la probeta se hidrate lentamente por capilaridad, colocándole agua gradualmente desde la base del odómetro y haciendo que ésta suba menos rápido que el efecto capilar en el suelo hasta llegar a la piedra porosa superior, permitiendo así la hidratación completa del suelo, que será aproximadamente $G\% > 95\%$.

El hinchamiento que se ocasiona en la probeta se registra con el tiempo y cuando ya no se observa el fenómeno se procede a continuar la prueba, aplicando nuevamente incrementos de esfuerzo ilegales hasta obtener una curva que defina con claridad la compresibilidad del suelo ocasionada por el fenómeno de la expansión.

En la figura 4 se muestra en las dos gráficas la configuración que toma la compresibilidad del suelo por la hidratación durante un esfuerzo vertical constante en el odómetro.

A partir de múltiples pruebas efectuadas en el laboratorio y por tesis dirigidas por el autor en la DEPF, UNAM, acerca de suelos con características expansivas, se concluye que la magnitud del hinchamiento queda

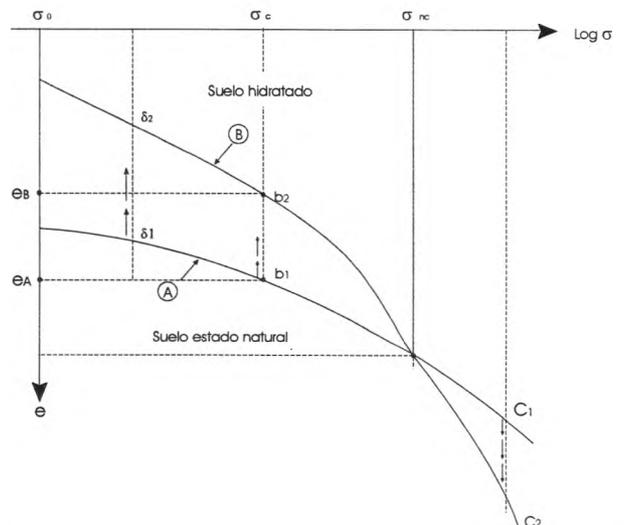


Figura 5. Compresibilidades para suelo en estado natural y previamente hidratado

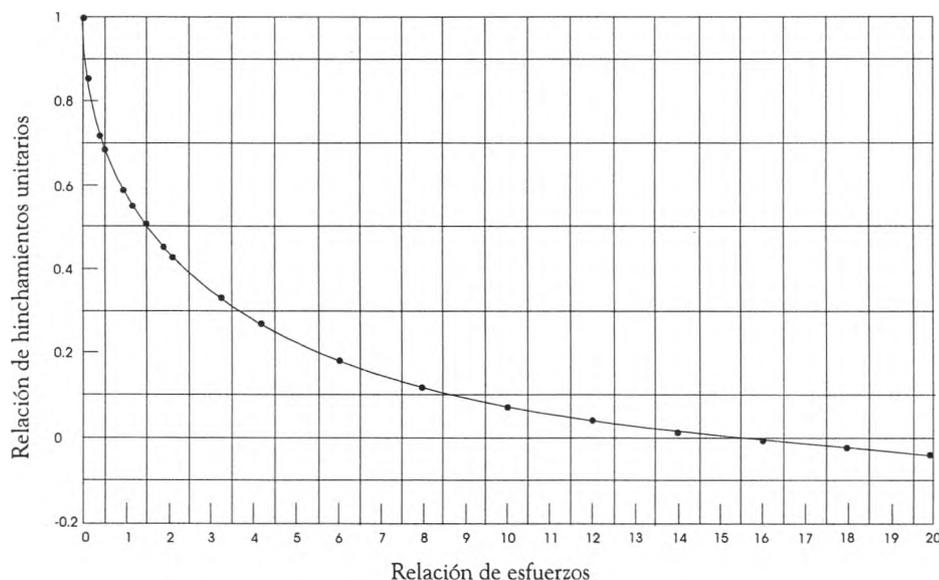


Figura 6. Relación de hinchamientos vs. esfuerzos

comprendido entre las dos curvas de compresibilidad que muestra la figura 5.

La curva **A** representa la compresibilidad del suelo expansivo en su estado natural y la curva **B** representa el suelo expansivo previamente hidratado por capilaridad en el odómetro con un esfuerzo vertical inicial o del orden de 0.20 kG/cm^2 , antes de empezar la prueba.

De lo antes expuesto, cuando se trata de un suelo con un alto contenido de minerales de arcilla de fuerte actividad físico-química, se encuentra que al hidratarlo completamente para varios valores del confinamiento en el odómetro el hinchamiento alcanza la curva **B** del suelo pre-hidratado (figura 5), en el caso de hidratación incompleta, se obtienen valores que se sitúan entre las dos curvas antes mencionadas.

La deformación unitaria máxima de la expansión para determinado esfuerzo vertical en el odómetro es

$$\Delta \varepsilon_e = -\Delta \varepsilon_e / (1 + e_e) \quad (3)$$

El valor lineal de la expansión en la prueba del odómetro para un esfuerzo vertical constante se calcula multiplicando por el espesor **D** de la probeta

$$\delta_e = -\Delta \varepsilon_e (D) \quad (4)$$

De ello, se obtiene también el coeficiente de expansión volumétrica unitaria por medio de la ecuación

$$m_{ze} = \Delta \varepsilon_e / \sigma_c \quad (5)$$

Nótese en la figura 5, que las curvas **A** y **B** se cortan en un punto que define un esfuerzo neutro σ_{cn} para el cual no se presentan cambios volumétricos.

Llamemos al hinchamiento máximo $\Delta \varepsilon_o$, para el esfuerzo inicial σ_o . Si se registra la relación $\Delta \varepsilon_e / \Delta \varepsilon_o$ contra el esfuerzo σ_c , se obtiene la ley fenomenológica adimensional que rige la expansión como muestra la figura 6, la cual queda interpretada por la siguiente ecuación

$$\Delta \varepsilon_e / \Delta \varepsilon_o = 1 - C_e \text{Log} (\sigma_c / \sigma_o) \quad (6)$$

La constante C_e se obtiene considerando que para σ_{cn} el hinchamiento es nulo $\Delta \varepsilon_e = 0$, por consiguiente

$$c_e = 1 / \text{log} (\sigma_{nc} / \sigma_o) \quad (7)$$

Conociendo la ley fenomenológica dada por la ecuación 6 podrá conocerse el hinchamiento para las condiciones del esfuerzo volumétrico a que esté sometido el suelo en el campo, para obras previamente construidas en suelos que pueden ser afectados por la hidratación, los cuales pierden en forma importante el término de cohesión y se comportan exclusivamente como friccionantes.

La figura 6 se presenta como un ejemplo de la ley de expansión para un suelo expansivo de Coro, Colombia, el cual, con humedad natural tiene una alta consistencia natural, pero la pierde al hidratarse.

Las pruebas fueron realizadas en el odómetro con probetas de suelo inalterado, todas ellas del mismo horizonte. Se hidrataron en el odómetro con varios esfuerzos octaédricos, función del esfuerzo vertical aplicado, y se registró la expansión máxima por el hinchamiento.

El hinchamiento máximo fue de $\Delta \varepsilon_o = 13.3\%$ cuando el esfuerzo neutro adquirió el valor de $\sigma_{nc} = 15.0 \text{ KG/cm}^2$. La prueba se inició con un esfuerzo vertical de 0.10 KG/cm^2 , como se indica en la figura 6 (Sánchez, 1979).

Tabla 1. Elementos para cálculo de los desplazamientos verticales. Superficie de la cimentación dividida en ocho dovelas. (Zeevaert, 1996)

Depl. vertical	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_4	δ_3	δ_2	δ_1	α_n
estrato	q_1	q_2	q_3	q_4	q_4	q_3	q_2	q_1	
A, arcilla	σ_1A	σ_2A	σ_3A	σ_4A	σ_4A	σ_3A	σ_2A	σ_1A	α_A
B, limo	σ_1B	σ_2B	σ_3B	σ_4B	σ_4B	σ_3B	σ_2B	σ_1B	α_B
C, arcilla	σ_1C	σ_2C	σ_3C	σ_4C	σ_4C	σ_3C	σ_2C	σ_1C	α_C
D, imo	σ_1D	σ_2D	σ_3D	σ_4D	σ_4D	σ_3D	σ_2D	σ_1D	α_D

q_i Esfuerzo unitario sobre el suelo en cada dovela

σ_i^N Representa el estado de esfuerzos verticales en la masa del suelo que origina la cimentación

En general, los suelos residuales de características expansivas con bajo grado de saturación, contienen minerales de arcilla activos, que al hidratarse, reducen la cohesión en forma notable y en casos extremos cuando contienen óxidos de hierro pierden totalmente la cohesión y se comportan exclusivamente como suelos friccionantes.

Aplicación en campo

Para la aplicación de los conceptos antes expuestos es necesario contar con la siguiente información:

1. Estudiar la estratigrafía del sitio hasta la profundidad que indique el diagnóstico preliminar de la obra de que se trate.
2. Conocer el tipo de cimentación, su geometría, el esfuerzo que arroja ésta sobre el suelo al nivel de desplante y su distribución con la profundidad.
3. Los esfuerzos efectivos de sobre carga, adicionados de los que origine la construcción en el subsuelo.
4. La oquedad y el grado de saturación del suelo con la profundidad.
5. Investigar las condiciones ambientales presentes y estimar las que puedan presentarse en el futuro.
6. Conocer los módulos de información unitaria m_v , v_s , σ_c , de los diferentes estratos del subsuelo, para los suelos colapsibles y expansivos, respectivamente.

Utilizando los resultados de la información de campo y laboratorio que se mencionan, se podrán conocer con mayor certidumbre las características cuantitativas de estos suelos en su comportamiento físico-químico, de acuerdo con las condiciones ambientales del sitio y de la obra en cuestión.

La relación que existe entre el módulo lineal de compresión M_z y el de la deformación volumétrica unitaria m_z determinado en el odómetro, se puede calcular por medio

de la siguiente ecuación para el mismo confinamiento de ambos:

$$M_z = m_z / v_c \quad (8)$$

En donde v_c representa la relación de los módulos (Zeevaert, 1983), dicho valor se estima por medio de la expresión $v_c = (1 + v) (1 - 2v) / (1 - v)$, en donde v es la "relación de Poisson" que puede tomar los siguientes valores límites: para arenas 0.25 y para arcillas del orden de 0.35 a 0.40.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo organizar el cálculo en forma tabular de los desplazamientos verticales originados en una obra ya construida, afectada por el efecto de la hidratación.

Para ilustrar el método de cálculo se muestra una cimentación rectangular de losa corrida flexible que carga al suelo con un esfuerzo q_i uniforme en cada dovela considerada, primero se calcula el estado de esfuerzos en la masa del suelo, bajo la cimentación, así como al centro de cada uno de los estratos del subsuelo para el suelo en el sitio, y se adicionan los esfuerzos que provocan las cargas que arroja la losa de cimentación (tabla 1).

El desplazamiento vertical, ya sea para suelo colapsible o bien expansivo al centro de cada estrato de espesor D , se calcula con $\Delta\delta = (M_z * D) (\sigma_c)$, en donde $(M_z * D) = \alpha$, representa la deformación unitaria de un estrato. Este valor se determina para cada uno de los estratos del subsuelo, así el cálculo de los desplazamientos verticales se efectúa así (Zeevaert, 1980):

$$\delta_i = \Sigma (\alpha_c \sigma_c) n \quad \text{o bien} \quad |\delta_i| = [\sigma_{cn}]^T \alpha_{cn} \quad (9)$$

Dependiendo del orden de magnitud de los desplazamientos verticales diferenciales que se originen por la hidratación, se puede seleccionar el tipo de cimentación más idóneo para contrarestarlos y lograr el mejor comportamiento posible de la cimentación, se proponen las siguientes soluciones (Zeevaert, 1983):

1. Zanjas perimetrales a la construcción que eviten el aumento de la humedad bajo la cimentación o construir muros pantalla y pavimentos impermeables para evitar la penetración del agua en el subsuelo bajo la cimentación.

2. Ejercer la hidratación previa del subsuelo.

3. Zapatas aisladas cuando los desplazamientos diferenciales entre columnas o muros sean tolerables y que no excedan de 1/500 de los claros de la estructura del edificio.

4. Zapatas continuas con traveses de rigidez.

5. Losa corrida rigidizada.

Cuando los desplazamientos diferenciales exceden la relación 1/500, se pueden elegir las siguientes cimentaciones:

6. Cimentaciones de tipo cajón rígido.

7. Pilotes de fricción apoyados en la zona del suelo estable.

8. Pilotes de punta apoyados en un estrato resistente, en el caso de pilotes, se deberá colocar una funda para aislar al pilote de la zona de los suelos colapsibles o expansivos.

Consideraciones sísmicas

El suelo hidratado con alto grado de saturación es más susceptible a fallar por la acción de las ondas sísmicas. Se mencionó que estos suelos pierden su resistencia y actúan generalmente como suelos friccionantes. Para analizar la estabilidad sísmica de una cimentación hidratada es necesario conocer el módulo dinámico de rigidez (μ) del suelo ocasionado por el fenómeno de la hidratación, así como los módulos dinámicos unitarios de compresión M_c y de respuesta M_e , tanto en sentido vertical como horizontal para cada uno de los estratos involucrados en el problema sismo-geodinámico y hasta una profundidad a la cual los efectos sísmicos sean de pequeña magnitud, de acuerdo con la aceleración asignada (A_s) a la superficie del suelo, así como el efecto que por esta aceleración originen las ondas sísmicas (Zeevaert, 1988).

La determinación de dichos parámetros se logra por medio del "Péndulo de torsión libre" y con la "Cámara holandesa" diseñados con este objeto por el autor hace varias décadas (Zeevaert, 1988).

Se hace necesario analizar las siguientes ondas sísmicas básicas:

1. Ondas de cuerpo irrotacionales de compresión y dilatación.

2. Ondas de cuerpo equivolúmetricas o de cortante.

3. La componente horizontal de las ondas de superficie de compresión y dilatación.

El objetivo es conocer primero si el suelo en las condiciones mencionadas es capaz de resistir los esfuerzos que

ocasionan dichas ondas en el subsuelo, con un factor adecuado de seguridad >1.5 . En el caso de que el suelo resista lo primero, entonces se procede a determinar si los momentos del volteo del edificio, que originan esfuerzos en el apoyo de la cimentación, pueden ser soportados por el suelo con seguridad aceptable (Zeevaert, 1997).

El análisis del problema sismo-geodinámico queda fuera de este contexto; sin embargo, la forma de atacarlo se puede consultar en varias publicaciones del autor en las referencias (Zeevaert, 1988, 1997, 1995, 1987, 1996, 1995 y 1996).

Conclusiones

Por lo presentado en este trabajo se concluye que el ingeniero de mecánica de suelos y cimentaciones puede contar con una herramienta racional para estimar y seguir desarrollando la tecnología de los suelos eólicos finos colapsibles y los residuales de características expansivas, que por una u otra razón pueden sufrir cambios ambientales por hidratación o desecación de su estado natural en el sitio.

Referencias

- Zeevaert-Wiechiers L. (1983). *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*. Second edition, New York.
- Sánchez N.F. (1979). Estudio de un suelo expansivo de Coro, Venezuela. Tesis de maestría en Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1980). *Interacción suelo-estructura de cimentaciones*. Limusa, México.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1988). *Seismo-geodynamics of the ground surface and building foundations in Mexico City*. Edición especial SMMS, México.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1997). *Riesgo de mal comportamiento de la superficie del suelo y cimentaciones debido a las ondas sísmicas*. Edición especial SMMS, México.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1995). Estabilidad sismo-geodinámica de las cimentaciones. Simposio Internacional de Ingeniería Civil a 10 años del sismo de septiembre de 1985. Sociedades de Ingeniería Sísmica, Estructural y Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1987). Seismo-geodynamics response of the ground surface and building foundations in Mexico City, Earthquake, sept. 1995. Terzaghi Lecture. American Society of Civil Engineers, Anaheim, California, Octubre.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1996). The Seismo-geodynamics in the design of foundations in difficult subsoil

- conditions. 3rd International Symposium on Environmental Geo-Technology, San Diego, California, Junio.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1995). *Diseño sismo-geodinámico de cimentación*. Publicación de la DEPEFI, UNAM, D-106.
- Zeevaert-Wiechiers L. (1996). Módulos de deformación unitaria en arenas y limos en la interacción suelo-estructura de cimentaciones. Conferencia "Universidad Veracruzana", Facultad de Ingeniería, UNAM, México, abril.

Semblanza del autor

Leonardo Zeevaert-Wiechers. Obtuvo el título como ingeniero civil en 1939 en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Estudió el posgrado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts donde recibió el grado de maestro en ingeniería en 1940. En 1943 inició una estrecha colaboración con el Dr. Karl Terzaghi en una investigación acerca de la estabilidad de las cortinas de corazón hidráulico construidas en México a principios de siglo, esto lo llevó en 1947 a trabajar en problemas especiales de mecánica de suelos en la universidad de Illinois, donde obtuvo el grado de doctor (Ph. D) en 1949. Ha recibido numerosos reconocimientos, entre ellos: la medalla de oro profesional otorgada por el Instituto Americano de Arquitectos, diploma a la innovación tecnológica, la elección de profesor emérito y miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EUA, entre otros. El buen comportamiento de obras de ingeniería que ha diseñado, así como la cimentación y estructura de la Torre Latinoamericana, en donde introdujo el concepto de flexibilidad controlada en edificios altos, le ha valido para su reconocimiento a nivel internacional. Ha escrito 160 artículos, una gran cantidad de libros; y ha presentado ponencias relacionadas con mecánica de suelos, ingeniería de cimentaciones y sísmica de cimentaciones.