

“MÉTODO DE LABORATORIO EN CONSOLIDÓMETRO PARA DETERMINAR LAS DEFORMACIONES VERTICALES EN SUELOS Y CRITERIOS PARA DISEÑO DE PLATAFORMAS”

Julio César Leal Vaca⁽¹⁾, Luis Enrique Mendoza Puga⁽¹⁾, Alma Hortensia Serafin Muñoz⁽¹⁾, Oscar Coreño Alonso⁽¹⁾, Saúl Villalobos Pérez⁽¹⁾, Francisco José Luna Rodríguez⁽¹⁾, Gustavo Gallegos Fonseca⁽²⁾

¹ Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Guanajuato, Gto., 36000

² Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Carretera Rioverde a San Cirio de Acosta Km 4 Puente del Carmen, Rioverde S. L P., 79650

1. RESUMEN

El artículo presenta una propuesta metodológica de laboratorio utilizando como dispositivo principal el consolidómetro para determinar las deformaciones verticales en suelos y algunos criterios para el diseño de plataformas utilizadas en estructuras ligeras. Es necesario indicar que la metodología es aplicable a la mayoría de los diseños de las plataformas, y en este trabajo se tomará como ejemplo el caso de las plataformas que se construyen para viviendas. Desde hace décadas se ha intensificado la construcción de fraccionamientos habitacionales e industriales, y es recurrente la afectación que sufren estas edificaciones por causa de los suelos en que se apoyan sus cimentaciones por no considerar algunas de sus propiedades que describen el comportamiento esfuerzo-deformación por cambios de humedad de los suelos. En este trabajo se describen los aspectos básicos para la toma de muestras representativas de suelo durante los trabajos de exploración, preparación de muestras y aplicación de cargas en el consolidómetro, se indica cómo se interpretan los resultados obtenidos y se concluye con la orientación para determinar los espesores de las plataformas que se utilizan en fraccionamientos para viviendas.

Palabras clave: esfuerzo-deformación, consolidómetro, plataformas.

2. INTRODUCCIÓN

Las estructuras consideradas como ligeras, en términos generales, son aquellas que pueden salvar grandes espacios con construcciones de poco peso, las presiones que transmiten al terreno de apoyo a la cimentación son de baja concentración. Estas estructuras generalmente se resuelven con cimentaciones del tipo superficial, aunque puede haber excepciones para ciertos tipos de suelos, por ejemplo en suelos muy blandos. Bajo esta conceptualización quedan incluidas las viviendas, en particular las del tipo de interés social. Debido en gran parte a las bajas presiones que representan las estructuras ligeras para el suelo de cimentación y cuando se apoyan en suelos susceptibles tener cambios de volumen por cambios en su contenido de humedad, por ejemplo los suelos expansivos, las estructuras tienden a sufrir deformaciones en sentido vertical ascendente, lo cual ocurre cuando el suelo inicialmente tiene una

humedad inferior a su saturación y puede absorber agua adicional debido a que en su interior existe una presión negativa o succión.

El suelo tiene cambios de humedad importantes de hidratación en la estación de lluvias y de deshidratación en la estación seca, estas circunstancias propician el fenómeno de expansión y tiene lugar sitios donde la evapotranspiración media anual es mayor que la precipitación medias anual (Zepeda, 2004). En la figura 1, se representa la variación de los perfiles de humedad para un ciclo estacional de temporadas de lluvia y estiaje. Puede observarse que los perfiles de humedad tienden a ser similares a cierta profundidad, y que la variación del contenido de humedad tiene lugar en un cierto espesor de suelo conocido como capa activa. Los suelos expansivos cuando se deshidratan tienden a reducir su volumen, esto ocurre frecuentemente en el perímetro de un área cubierta, por ejemplo en una losa de cimentación cuyo nivel de desplante es superficial y la exposición a los cambios de humedad es mayor. La hidratación y deshidratación recurrente llega a manifestarse en problemas estructurales en las construcciones. Estas sufren levantamiento en el caso de que presión aplicada por la cimentación en el suelo es menor que la presión de expansión del suelo. En ocasiones resulta suficiente la ocurrencia de un solo movimiento diferencial durante una trayectoria de humedecimiento o secado para que se dañen las estructuras.

Existen otros tipos de suelos que se denominan colapsables debido a que bajo condiciones de cierto nivel de esfuerzo y humedecimiento pierden su capacidad para soportar cargas, sufriendo un cambio repentino de disminución volumen conocido como colapso, comúnmente a estos suelos se le refiere como suelos con estructura metaestable (Barden *et al.*, 1969).

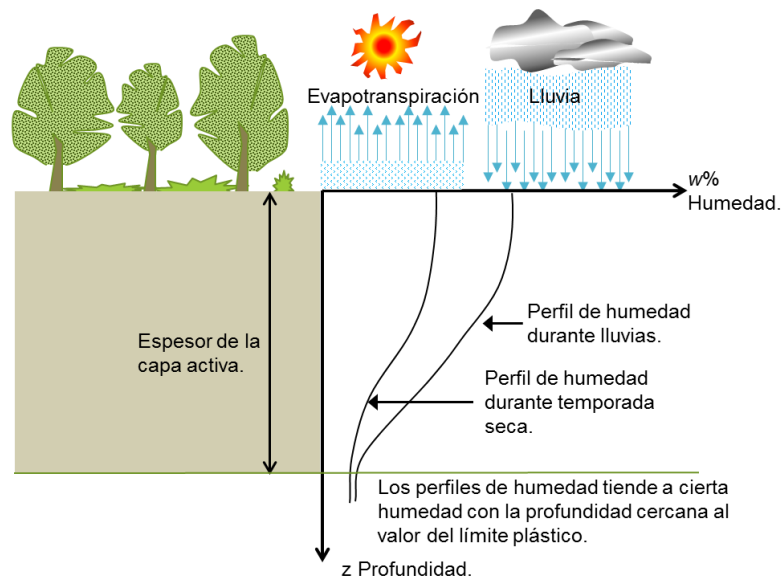


Figura 1. Representación de la variación de los perfiles de humedad durante las temporadas de lluvia y estiaje en la capa activa de suelo.

Algunos de los tipos de daños en las estructura se presentan en los sistemas de pisos, ya que estos frecuentemente se diseñan sin considerar los efectos de los suelos

expansivos o colapsables; las losas de piso adoptan formas curvas y se agrietan. Las deformaciones de la cimentación se transmiten a la superestructura agrietando los materiales frágiles como los de mampostería de muros. Estos presentan grietas diagonales, debido a los esfuerzos cortantes inducidos por los movimientos diferenciales, las grietas se direccionan hacia los vanos de puertas y ventanas. Cuando los muros han sufrido agrietamientos las losas de entrepiso o azotea llegan a presentar daños repercutiendo en los sistemas de impermeabilización. En la figura 2, se presenta de manera esquemática algunos de estos daños y las posibles deformaciones de una de cimentación losa (Mitchell, 1984).

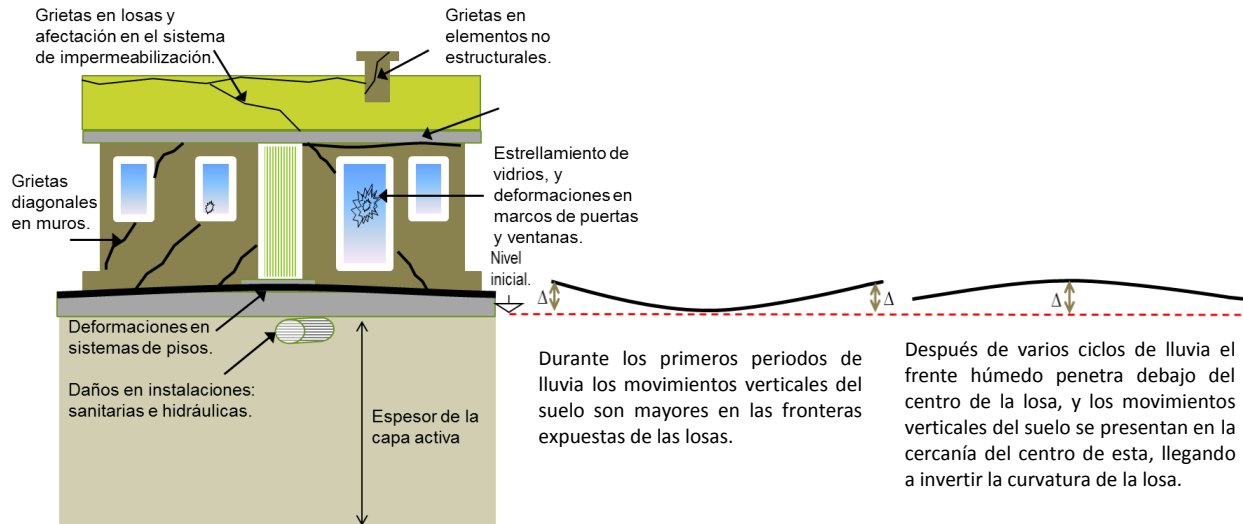


Figura 2. Representación de algunos de los daños causados en las viviendas por cambios de humedad durante las temporadas de lluvia y estiaje en la capa activa de suelo.

En varios países se han presentado problemas en las construcciones que se hacen sobre suelos susceptibles con cambios volumétricos, incluyendo a México. En parte el problema, se debe a que no es considerado adecuadamente el comportamiento mecánico de este tipo de suelos en los análisis o criterios tomados en la interacción suelo-estructura, o por lo menos algunos procedimientos constructivos de carácter práctico para el tratamiento de este tipo de comportamiento de suelos. El medio físico, particularmente el clima con la presencia de materiales arcillosos o areno-limosos son factores que se reunidos circunstancialmente contribuyen para que se presenten ciertos daños en las estructuras, algunos investigadores al respecto han considerado los efectos del cambio climático (Karunaratne, *et al.*, 2012).

En la ingeniería, para determinar los cambios de volumen que sufrirá un suelo sea expansivo o colapsable, se requiere hacerlo de forma práctica, por lo cual en este trabajo se describe cómo hacerlo utilizando el consolidómetro, desde un punto de vista macromecánico de suelos. El consolidómetro es un equipo común en los laboratorios de mecánica de suelos, y consta de un anillo rígido en el que se introduce la muestra de suelo por ensayar y se pueden aplicar esfuerzos, con la posibilidad de saturar por inundación. Mediante este equipo es posible determinar las deformaciones causadas por los esfuerzos aplicados y efectos de la saturación.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar los aspectos básicos para proponer los espesores de plataformas del sistema de cimentación a base de losas rígidas de concreto reforzado apoyadas en suelos con cambios de volumen debidos al humedecimiento.

3. METODOLOGÍA.

Se describen dos etapas, la de trabajos de campo y la de trabajos de ingeniería de laboratorio de mecánica de suelos. La etapa de campo implica la realización de la exploración en el terreno de estudio, durante esta etapa es conveniente hacer visitas técnicas preliminares para definir un programa de exploración indicando los métodos para la toma de muestras y el número de puntos de investigación. El programa de exploración considerará la extensión del terreno, la variación textural observada, la ubicación de las estructuras de proyecto y cualquier otra fuente de información disponible confiable. Existen algunas propuestas que sirven de orientación para determinar el número de puntos a explorar como la incluida en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en su capítulo 2. Investigación del subsuelo, apartado 2.3 Exploraciones, en su inciso b) que indica que:

“El número mínimo de exploraciones a realizar (pozos a cielo abierto o sondeos según lo especifica la tabla 2.1) será de una por cada 80 m o fracción del perímetro o envolvente de mínima extensión de la superficie cubierta por la construcción en las zonas I y II, y de una por cada 120 m o fracción de dicho perímetro en la zona III”.

Para fraccionamientos de vivienda de hasta 2 niveles es común realizar de 1 a 2 pozos a cielo abierto (PCA) por manzana, su distribución total deberá buscar la mayor cobertura del terreno en estudio considerando los puntos de interés relacionados con la construcción de las viviendas. En los estudios para fraccionamientos generalmente se hacen otros PCA que aportarán información para fines de trabajos de urbanización, estos se pueden ubicar sobre las trazas de las calles y en las muestras extraídas se aplican pruebas para el diseño de pavimentos, por ejemplo. La ubicación de los PCA conviene realizarse con equipos de topografía o dispositivos como navegadores satelitales (GPS), y obtener sus coordenadas.

Los predios en que se desarrollan los fraccionamientos habitacionales en la mayoría de los casos tienen suelos no saturados, es decir, cuentan con un espesor considerable de suelo por arriba del nivel de aguas freáticas (NAF). En estas condiciones y por las presiones relativamente bajas que las viviendas transmiten al terreno de apoyo, la profundidad de estudio en la exploración de suelos resulta suficiente entre los 3.0 m y 5.0 m, generalmente alcanzados con equipo mecánico, por ejemplo con retroexcavadora. Con menor frecuencia es necesario hacer exploraciones a mayor profundidad, por ejemplo cuando se encuentran materiales de rellenos no controlados o evidencia de suelos blandos, y en otros casos pueden presentarse materiales duros o rocosos que limitan la profundidad de exploración innecesaria.

Durante la exploración se obtendrán muestras representativas de suelo inalteradas y alteradas, para posteriormente ser ensayadas en laboratorio. Para la selección de muestras, se deben considerar algunos criterios empíricos de campo, y apegarse al programa de exploración que se haya establecido. Se sugiere realizar una inspección textural de los estratos de suelos expuestos en los PCA, y por el comportamiento mecánico que pueden tener los suelos debido a sus fracciones finas, conviene aplicar el procedimiento de identificación de estos suelos en campo indicado por sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Este procedimiento se refiere a la realización de pruebas índice que proporciona información cualitativa acerca del comportamiento mecánico esperado de los suelos. Estas pruebas son: dilatancia, resistencia en estado seco y tenacidad. Estas pruebas, representan en gran medida el primer acercamiento metodológico por parte del geotecnista. Otros indicadores deben contemplarse como la presencia de grietas, el contenido de agua o grado de saturación, el peso específico y el color de los estratos. Con la información obtenida de estas pruebas de campo se pueden identificar de forma preliminar los estratos de suelos que pueden ser susceptibles a presentar un comportamiento problemático por cambios de volumen, por ejemplo los suelos expansivos pertenecientes a los grupos arcillosos, en particular los de alta compresibilidad.

En cuanto a la identificación de suelos colapsables el geotecnista en campo debe tener en cuenta algunas características comunes, estos suelos presentan una estructura abierta o porosa con grades relaciones de vacíos, bajo peso específico, granulometría predominantemente fina, y pertenecen en la mayoría de los casos a los grupos de los suelos limosos o arenosos con materiales solubles como el yeso, se hayan en condiciones no saturadas y gran parte de estos suelos son residuales o eólicos. La estructura abierta de los suelos colapsables está ligada por partículas algo cohesivas o sales que cuando se saturan se pierden por reblandecimiento o disolución (Reginatto y Ferrero, 1973).

En la etapa de laboratorio se obtendrán los resultados definitivos del estudio mediante las pruebas que son más rigurosas y estandarizadas. Generalmente en los informes de mecánica de suelos se indican los alcances y objetivos del estudio, se hace una descripción del marco físico de sitio y de los trabajos realizados en campo, se elaboran los perfiles stratigráficos y de humedad. Con los perfiles de humedad se puede tener una aproximación del espesor de la capa activa, esto a falta de pruebas más complejas para determinar la succión, y elaborar perfiles con esta. Los perfiles de succión del suelo son más adecuados para determinar la profundidad de la capa activa. Se deben determinar las propiedades mecánicas para calcular la capacidad de carga y hacer los ensayos que permitan describir las relaciones esfuerzo-deformación-tiempo para el análisis de cambios de volumen o movimientos verticales del suelo; para obtener estas relaciones se hacen pruebas de consolidación y pruebas de expansión-colapso utilizando el consolidómetro. Las pruebas de expansión-colapso representan condiciones de humedecimiento súbito, en lapsos de tiempo relativamente cortos. Los resultados de estas pruebas son parte fundamental para establecer los criterios de diseño de las plataformas en este trabajo. Los siguientes párrafos se enfocarán a la determinación de los movimientos verticales de expansión o colapso, y se tomará como referencia la norma ASTM-D4546-14.

En el consolidómetro se pueden ensayar tanto muestras inalteradas como remoldeadas, según las necesidades del proyecto. Para el caso de plataformas de viviendas serán muestras inalteradas, ya que estas se apoyarán sobre el suelo tal y como se encuentra en el sitio, con la posibilidad de aplicarles cierto tratamiento a nivel superficial. Se sugiere ensayar a los suelos que se hayan identificado como susceptibles a cambios de volumen, teniendo en cuenta los criterios señalados en la etapa de campo y confirmados con la obtención de sus propiedades índice de laboratorio. Los resultados rigurosos serán los obtenidos con la metodología que se propone.

Se deberán conocer las presiones que la estructura ejerce sobre los suelos bajo condiciones de cargas permanentes de servicio, sin factores. De la muestra inalterada extraída de un estrato y representativa de un espesor ΔH , se proponen montar en consolidómetros 4 probetas cuyos esfuerzos finales son los indicados en seguida:

1. Primera probeta con carga de 1.0 kPa.
2. Segunda probeta bajo esfuerzo de carga de servicio menos un porcentaje por variaciones propias de la dispersión natural del suelo y estimación de cargas del proyecto ($\sigma_p - \Delta \sigma_p$).
3. Tercera probeta bajo esfuerzo de carga de servicio estimada del proyecto en diseño (σ_p).
4. Cuarta probeta bajo esfuerzo de carga de servicio más un porcentaje por variaciones propias de la dispersión natural del suelo y estimación de cargas del proyecto ($\sigma_p + \Delta \sigma_p$).

La primer probeta tiene objeto obtener el porcentaje de expansión libre del suelo o su porcentaje de colapso, como una medida de referencia de un suelo sin cargas. La tercera probeta tiene como objeto determinar el porcentaje de expansión o porcentaje de colapso de una estructura que se construye por etapas y apoyada sobre una plataforma. La segunda y cuarta probeta tienen como objetivo observar la dispersión o tendencia de los resultados y ser consideradas para establecer de manera más sólida el criterio de diseño, en un rango de esfuerzos.

Para llegar a los esfuerzos indicados anteriormente en cada probeta, con excepción de la primera, se considera aplicar una primera carga para estabilizar el equipo de 1.0 kPa. Después es necesario se determinar el esfuerzo geostático inicial *in-situ*, $\sigma_o = \Sigma \gamma_m \Delta H$, y se aplica este esfuerzo. Durante esta etapa se logra la recarga del suelo con el esfuerzo que tenía antes de la extracción. Enseguida se puede evaluar el efecto de recuperación del suelo cuando se ha extraído, por medio de la descarga, llegando nuevamente a la carga de 1.0 kPa y volviendo a aplicar la carga correspondiente al σ_o . Se puede observar que como el suelo no es un medio elástico se obtiene una deformación ligeramente mayor a la primera aplicación de σ_o . Esta diferencia Δh_{oc} , que corresponde a un ciclo de descarga-carga, puede considerarse para fines prácticos como una medida aproximada de la afectación que sufre la muestra de suelo por extracción en un ciclo anterior. Este valor se considera para los cálculos de las deformaciones finales en campo. El siguiente esfuerzo corresponde a la colocación de

la carga debida al peso de la plataforma, es necesario conocer los pesos específicos de los materiales de banco con que se construirá relacionado con el grado de compactación. Para esto se propone un espesor inicial de la plataforma y se aplica el esfuerzo, llegando a un valor de $\Delta\sigma_{1\text{plataforma}}$. Durante la secuencia constructiva y aplicación de cargas, ahora corresponde considerar el esfuerzo debido al peso de la losa de cimentación y entonces se agrega la carga necesaria para llegar al esfuerzo acumulado $\Delta\sigma_{2\text{losa}}$. Finalmente, se aplica el esfuerzo acumulado hasta llegar a considerar el peso de la superestructura, $\Delta\sigma_{3\text{vivienda}}$ esta se puede dividir en esfuerzos por niveles, según el proyecto. Frecuentemente las viviendas se proyectan para posibles ampliaciones futuras, pasando de un nivel a dos.

La representación de la trayectoria de esfuerzos y movimientos verticales se indica en la figura 3, para una de las probetas ensayadas. Los valores que en esta aparecen tienen el objetivo de ejemplificar la secuencia de aplicación de los esfuerzos debido a las etapas constructivas mencionadas, para un caso supuesto. En este se han considerado ciertas cargas correspondientes para un diseño de viviendas de 2 niveles, con saturación al final de la construcción, resultando expansión, indicado en el segmento del punto 3 al 4. La expansión es el movimiento vertical ascendente bajo cargas permanentes de servicio cuando el suelo se satura. Por el contrario, en caso de colapso sería un movimiento vertical descendente bajo carga cuando el suelo se satura.

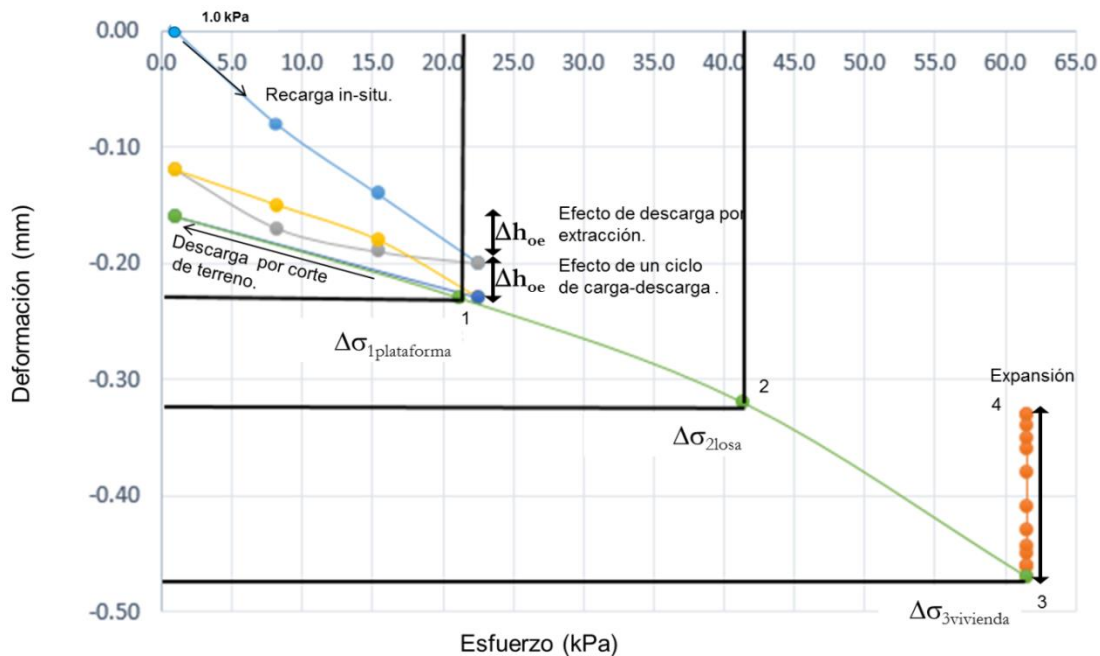


Figura 3. Representación de las trayectorias de esfuerzos considerando las etapas de descarga que ocurren en el suelo y las etapas de cargas durante el proceso constructivo. La trayectoria que se muestra en la figura indica un caso de expansión en el segmento del punto 3 al 4.

En cada etapa de aplicación de esfuerzos se deberá observar el comportamiento deformación-tiempo, graficando los valores y cuidando que el tiempo sea el suficiente hasta que las deformaciones sean poco significativas, de manera que la curva

deformación-tiempo sea asintótica a medida que el tiempo aumenta. En esta metodología se tiene la opción de saturar en la cualquier etapa de carga. Con lo anterior, se puede determinar qué tipo de deformaciones podrían ocurrir, expansión o colapso y hacer evaluaciones parciales de sus efectos.

Se pueden graficar los resultados de las 4 probetas, representando en un eje el esfuerzo final aplicado sobre la probeta de suelo y en el otro eje el resultado de expansión o colapso, utilizando la deformación posterior a la saturación expresada en porcentaje. En este tipo de gráficos se observa la tendencia de los movimientos verticales o su dispersión a medida que se aumenta el esfuerzo sobre diferentes probetas de suelo obtenidas de una misma muestra extraída de un PCA. En la figura 4, se ejemplifica este tipo de gráfica. Es necesario indicar que el primer punto, de la trayectoria esfuerzo-deformación, representa un comportamiento hipotético de expansión por saturación, en que se haya realizado corte de suelo hasta el nivel de extracción de la muestra y sin aplicación de carga.

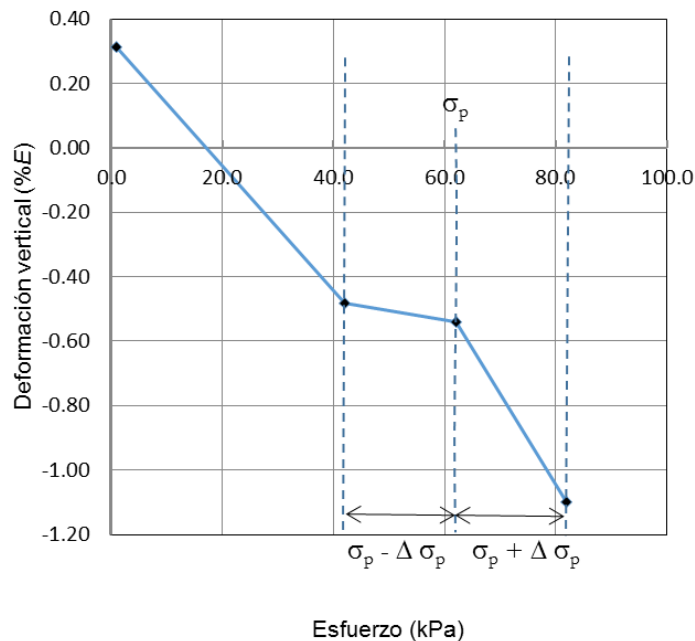


Figura 4. Representación de los movimientos verticales en porcentaje de un conjunto de probetas obtenidas de una misma muestra de suelo para el rango de esfuerzos considerados, $\sigma_p \pm \Delta \sigma_p$, siendo σ_p la presión ejercida por una estructura al suelo. Las deformaciones indicadas, expansión o colapso, son las correspondientes únicamente a la etapa de saturación. En el primer punto se observa expansión bajo un esfuerzo de 1.0 kPa y en los puntos siguientes se presenta colapso bajo esfuerzos de 42.0, 62.0 y 81.9 kPa.

4. RESULTADOS.

Los resultados de los movimientos podrán ser de expansión o colapso, según el tipo de movimiento que se determine en los ensayos del consolidómetro, ascendente o descendente respectivamente. La magnitud del movimiento resultante será la suma de los movimientos individuales (Δh) de los estratos susceptibles o particiones ΔH que presenten cambios de volumen por humedecimiento, y estarán limitados por espesor

H_{act} de la capa activa. A cada partición ΔH le corresponde una deformación E , dada en porcentaje. De acuerdo con lo anterior se tienen las expresiones (1) y (2). En la figura 5, se representan la partición de los estratos, ΔH , de acuerdo con la representatividad de las muestras de suelo extraídas de la mitad de cada partición.

$$h_t = \sum_{i=1}^n \Delta h_i = \sum_{i=1}^n \Delta H_i E_i / 100 \quad (1)$$

$$H_{act} = \sum_{i=1}^n \Delta H_i \quad (2)$$

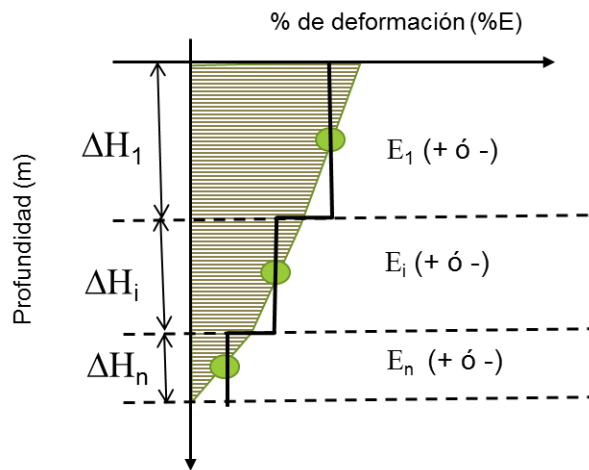


Figura 5. Se representa la partición de los estratos, ΔH , de acuerdo con la representatividad de las muestras de suelo extraídas de la mitad de cada partición, a cada una de estas le corresponde un porcentaje de deformación E .

En (1) E podrá ser (+) o negativa (-) según corresponda a expansión o colapso. Debe considerarse que el humedecimiento causado en el suelo por otras fuentes de agua puede dar espesores diferentes al correspondiente de la capa activa, por ejemplo, el caso de fugas de agua provenientes de instalaciones.

El espesor de la plataforma inicialmente propuesto, será satisfactorio si se tienen movimientos verticales admisibles desde el punto de vista estructural. Si los resultados de los movimientos verticales del suelo no son satisfactorios, se buscará hacer un ajuste al corte del suelo y al espesor de la plataforma, considerando en caso necesario realizar posibles trabajos de mejoramiento de suelos. El propósito en todo caso es disminuir el efecto de los movimientos verticales del suelo. Los criterios sugeridos para tal propósito serán los siguientes en términos generales:

Se podrá proponer un nuevo espesor mayor de corte de suelo que el inicial, con esto se logra tener un espesor menor de suelo susceptible a cambios de volumen por humedecimiento bajo cargas. En este corte se incluye el despalle o retiro de la capa vegetal. Con el nuevo espesor de corte, y en caso de mantener los niveles de proyecto, se requiere un espesor mayor de plataforma. Si el diseño estructural no se modifica, el

peso de la superestructura será el mismo. Como resultado de estos cambios la nueva presión alcanzada en $\Delta\sigma_{\text{vivienda}}$, correspondiente al punto 3 de la gráfica de la figura 3, se desplazará a la derecha. Con una presión mayor aplicada sobre el suelo expansivo en el caso mostrado, el porcentaje de expansión tenderá a disminuir por compensación de esfuerzos; sin embargo, el cambio de presión por este ajuste resulta de baja magnitud, por lo que, el mayor beneficio estará en lograr el mayor corte posible, reduciendo el espesor de la capa activa. En caso de no existir un cambio favorable mediante el corte de suelo, o no existe un estrato con mejor comportamiento mecánico, sin viabilidad de mayor corte, se podrá recurrir al mejoramiento de suelos, a partir del nivel de corte máximo posible. Si el retiro del primer estrato de suelo es viable para el proyecto, se deberá contemplar esta alternativa, y apoyar la plataforma en el siguiente estrato de suelo. Apoyar la plataforma en este nuevo estrato de suelo, implicaría que se presenten dos posibles circunstancias: este estrato bajo los esfuerzos de análisis presenta deformaciones admisibles o aún siguen siendo inadmisibles, cuya estimación también será obtenida bajo la misma metodología propuesta con el consolidómetro. Si se presenta la primera circunstancia se ha resuelto el problema, y el espesor de la plataforma corresponderá a otros fines de construcción y no a la problemática por cambios de volumen del suelo terreno. En el caso de la segunda circunstancia, y no es viable realizar mayor corte de suelo, entonces se pensará en disminuir los efectos mediante estabilización de suelos, por ejemplo mediante la adición de cal y proceso de compactación.

Cuando se aplica mejoramiento a un cierto espesor de suelo se favorece su comportamiento mecánico relativo a los objetivos de diseño. En este caso se reducen los efectos desfavorables de cambios de volumen, y a su vez se inducen otras circunstancias sobre el suelo no mejorado a mayor profundidad. Se reducen los posibles cambios de humedad estacional que podrían ocurrir en el suelo no mejorado. En este trabajo se sugiere aplicar el mejoramiento de suelo escarificando cierto espesor a nivel del corte, adicionando cal y aplicando compactación. Con lo anterior se busca la estabilidad volumétrica del suelo tratado y se logra otra reducción al espesor activo de suelo, además se reduce la permeabilidad en el espesor mejorado. Esto implica tener una nueva frontera de baja permeabilidad disminuyendo la posibilidad de que el espesor restante de suelo susceptible a cambios volumétricos se humedezca.

La estabilización del suelo con cal no siempre será necesaria, tampoco es la única alternativa para el tratamiento de los problemas citados en este trabajo. En caso de aplicar cal, deberá utilizarse la cantidad óptima, esta generalmente se expresa como un porcentaje respecto al peso específico seco máximo del suelo por mejorar, además se deberán indicar los detalles del proceso acompañado del diseño de la estabilización hecho en laboratorio y realizar las pruebas de verificación. Cabe indicar que existen ciertos tipos de arcillas que no modifican favorablemente su comportamiento con la adición de cal.

Se podrá hacer una nueva estimación de los movimientos verticales del suelo, considerando las modificaciones aplicadas al caso de diseño. Para esto se hará uso de las trayectorias esfuerzo-deformación, por ejemplo la trayectoria de la figura 4. En estas se entra con los nuevos valores de esfuerzos, se determinan los porcentajes de

deformación vertical (E) y se aplica la expresión (1). Una vez que se modifiquen las condiciones en la frontera superior del suelo la ecuación (2) no se podrá interpretar tal como se hace en un suelo sin modificación, debido a los procesos de diseño y construcción implicados.

Para el caso de una cimentación de losa rígida se sugiere utilizar el $0.50E$ para determinar los movimientos diferenciales que se inducirán a la estructura.

5. CONCLUSIONES.

Con la metodología descrita se puede determinar la magnitud de los movimientos verticales del suelo, pudiendo ser de expansión o colapso, aplicando las cargas por etapas constructivas de una vivienda. Con el montaje en el consolidómetro de probetas independientes extraídas de una misma muestra de suelo, en cualquier etapa de cargas del procedimiento de laboratorio es posible saturar el suelo por inundación o bien con oedómetros modificados es posible controlar el grado de saturación.

Con la metodología propuesta de laboratorio se pueden hacer estimaciones de la magnitud de los movimientos verticales del suelo tanto en condiciones de humedad natural de las muestras y en condiciones críticas de saturación. La condición más desfavorable de deformación se puede determinar en las trayectorias de esfuerzo-deformación e identificar a que etapa constructiva corresponde. En términos de posibles daños a la estructura la condición más desfavorable es cuando el suelo se satura y la vivienda cuenta con materiales frágiles como es el caso de muros de mampostería, entre otros. Esta condición es necesaria representarla en laboratorio durante el desarrollo de las pruebas. Para esto, se debe inducir la saturación por inundación con la carga total o por niveles terminados de la vivienda, como se ha descrito en este trabajo. Para el caso determinar los movimientos verticales del suelo por cada nivel de construcción en condiciones de saturación por inundación, se incrementará el número de probetas montadas en consolidómetro.

El procedimiento descrito para determinar el espesor de las plataformas depende del espesor de la capa activa, la magnitud de los movimientos verticales, las cargas estructurales, y de los espesores de corte y mejoramiento. A mayor corte del suelo se tendrá un espesor mayor de plataforma si se mantienen los niveles de proyecto por encima del nivel de terreno natural.

El mejoramiento de suelos, con cal y compactación, reduce la posibilidad de infiltración vertical de agua al suelo proveniente de lluvia o de fuentes localizadas por arriba del mejoramiento. Se puede combinar proceso de corte y mejoramiento de suelos para el diseño de plataformas.

Esta metodología no predice el nuevo perfil de humedad que se establecerá por las nuevas condiciones superficiales sobre el suelo en el área construida. Es necesario realizar investigación posterior a la aplicación del mejoramiento de suelos para evaluar las nuevas condiciones de humedad por debajo del mejoramiento.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] ASTM (2008) D4546-08, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils, Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Soli and Rock Building Stones.
- [2] Barden, L., Madedor, A. O., and Sides, G. R. (1969). "Volume change calculations of unsaturated clay". J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 95, pp. 33–51
- [3] Karunarathne A.M.A.N., Gad E.F., Sivanerupan S. and Wilson J. L. (2012). "Review of Residential Footing Design on Expansive Soil in Australia". In book: From Materials to Structures: Advancement through Innovation (pp.575-580). DOI: [10.1201/b15320-101](https://doi.org/10.1201/b15320-101).
- [4] López, L. T. y Zepeda, G. J.A. (2004). "Mejoramiento de Suelos" Mecánica de Suelos No Saturados". México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 251-291.
- [5] Mitchell, P. W. (1984). "A Simple Method of Design of Shallow Footings on Expansive Soil". Fifth International Conference on Expansive, Australia, pp. 159-164.
- [6] "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2017)", México: Gaceta Oficial de La Ciudad de México pp. 15-18.
- [7] Reginatto, A.R. and Ferrero, J.C. (1973). "Collapse Potential of Soils and Soil Water Chemistry." Proc.of the 8^o International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscu, URSS. Vol 2, 2, pp. 177 - 183.
- [8] Zepeda, G. J.A. (2004). "Mecánica de Suelos No Saturados". México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 19-44.