

LA ACCION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS SOBRE LAS CIMENTACIONES. MÉTODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL

Ings. Julio Patrone y Jose Enrique Prefumo

Docentes de Mecánica de Suelos

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

Tema presentado en las PRIMERAS JORNADAS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES

I. RESUMEN

El presente trabajo, basado en estudios bibliográficos y en la experiencia personal que los autores tienen sobre la temática, pretende responder a las siguientes preguntas en relación a la problemática de la fundación sobre los suelos expansivos:

- ¿Cómo identificar a un suelo expansivo?
- ¿Qué variables intervienen en el fenómeno de la expansión?
- ¿Cómo actuar frente a un suelo expansivo?

Se pone especial énfasis en la respuesta a esta última pregunta, tanto del punto de vista de la cimentación (tipo y adecuación de las mismas a las características del suelo), así como a las diferentes formas de actuación para reducir o eliminar el potencial expansivo del suelo.

Finalmente se exponen los antecedentes, patologías causadas y actuación realizada sobre las cimentaciones en una planta industrial de Montevideo, ubicada en una zona próxima a la costa y atribuida a fenómenos de expansión del suelo.

II. INTRODUCCIÓN

La incidencia del comportamiento de los materiales expansivos en los daños experimentados por las estructuras no fue identificada por los especialistas en el estudio de suelos y fundaciones como una de las causas fundamentales de esos daños, prácticamente hasta fines de 1930.

A partir de allí se comienza a reconocer que muchas de las patologías de las estructuras, que eran atribuidas a asentamientos del suelo u otros problemas, se debían en realidad a un fenómeno de **hinchamiento**.

El tema ha interesado en forma creciente a los especialistas en suelos y construcciones.

Se estima que las pérdidas anuales a nivel mundial por daños en las construcciones sobre los suelos expansivos superan los dos billones de dólares.

El interés en estos suelos ha llevado a la constitución, dentro de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones de un Comité Técnico para suelos expansivos, con la finalidad de impulsar estudios específicos en

esta área, así como a la realización periódica de conferencias internacionales sobre la problemática de los suelos expansivos.

En nuestro país el tema ha merecido permanentemente la preocupación de arquitectos e ingenieros ya que muchos daños causados en obras de arquitectura (sobretudo en viviendas económicas, que son las más afectadas por este fenómeno) y de ingeniería civil (carreteras, canalizaciones, etc.), se sospecha que han sido originadas en problemas de expansión de suelos en los que se apoyan. Desde hace algunos años el tema ha estado siendo investigado por docentes de la facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, habiéndose realizado la publicación de varios trabajos vinculados a este tema.

III. ¿COMO IDENTIFICAR UN SUELO POTENCIALMENTE EXPANSIVO?

Las formas principales de identificación de un suelo potencialmente expansivo son:

1. Identificación Mineralógica
2. Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos
3. Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo
4. Medidas directas de la expansión del suelo

Identificación Mineralógica

- Difracción por rayos X
- Análisis Térmico Diferencial
- Análisis de absorción de colorantes
- Análisis químicos
- Análisis por microscopio electrónico

Los tres grupos más importantes en que se clasifican los minerales arcillosos son: *illita*, *caolinita* y *montmorillonita*, compuestos por hidroaluminosilicatos. Los ensayos mineralógicos tienden a detectar la presencia de **montmorillonita**, que es el mineral preponderantemente expansivo.

La presencia de cargas eléctricas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, así como la capacidad de intercambio catiónico resultan fundamentales para la magnitud de la expansión.

Los ensayos de identificación mineralógica resultan muy usados en trabajos de investigación científica, pero resultan poco prácticos y antieconómicos para la práctica usual en ingeniería, dado que se requiere equipamiento y personal especializado. Es por este motivo que no se extiende en su desarrollo.

Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos

A través de la medida de ciertas propiedades básicas y sencillas de los suelos se puede determinar el grado del potencial expansivo del suelo.

Las propiedades a determinar son:

- Límite líquido y Límite Plástico
- Límite de contracción
- Contenido de coloides
- Expansión libre del suelo

Estos métodos tienen la ventaja de su fácil realización y de equipamiento disponible en todos los laboratorios. La desventaja es que no se cuantifica la expansión, sino que cualitativamente se establecen categorías de grados del potencial expansivo.

Límite Líquido y Límite Plástico

Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usados como un indicador primario de las características expansivas de las arcillas.

Es natural pensar en una relación como la antes mencionada ya que ambas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe.

La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos puede establecerse como:

Grado de Potencial Expansivo	Índice Plástico
Bajo	0 – 15
Medio	10 – 35
Alto	20 – 55
Muy Alto	> 35

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos.

Contenido de Coloides

Dentro de los materiales que tiene un tamaño inferior a 74 micras están los limos y las arcillas. Desde el punto de vista del tamaño se considera arcillas aquellos materiales que tienen un tamaño inferior a 2 micras (0.002 mm), siendo necesario para su determinación la realización de un ensayo hidrométrico.

La magnitud de la expansión que experimenta una arcilla está vinculado con la cantidad de partículas de tamaño arcilla presente en el suelo.

Se ha establecido una relación del tipo: $S = k C^x$

Dónde: S = Hinchamiento potencial, expresado como % del hinchamiento de una muestra compactada a la humedad óptima y al P.U.S.M. según Proctor Estándar.

C = Porcentaje de fracción arcilla (partículas menores a 0.002 mm).

x = exponente que depende del tipo de arcilla

k = Coeficiente que depende del tipo de arcilla.

x y k, que indican el tipo de partículas coloidales presentes se determinan a través de ensayos difracción por rayos X.

Determinación de la expansión Libre

Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la *expansión libre*.

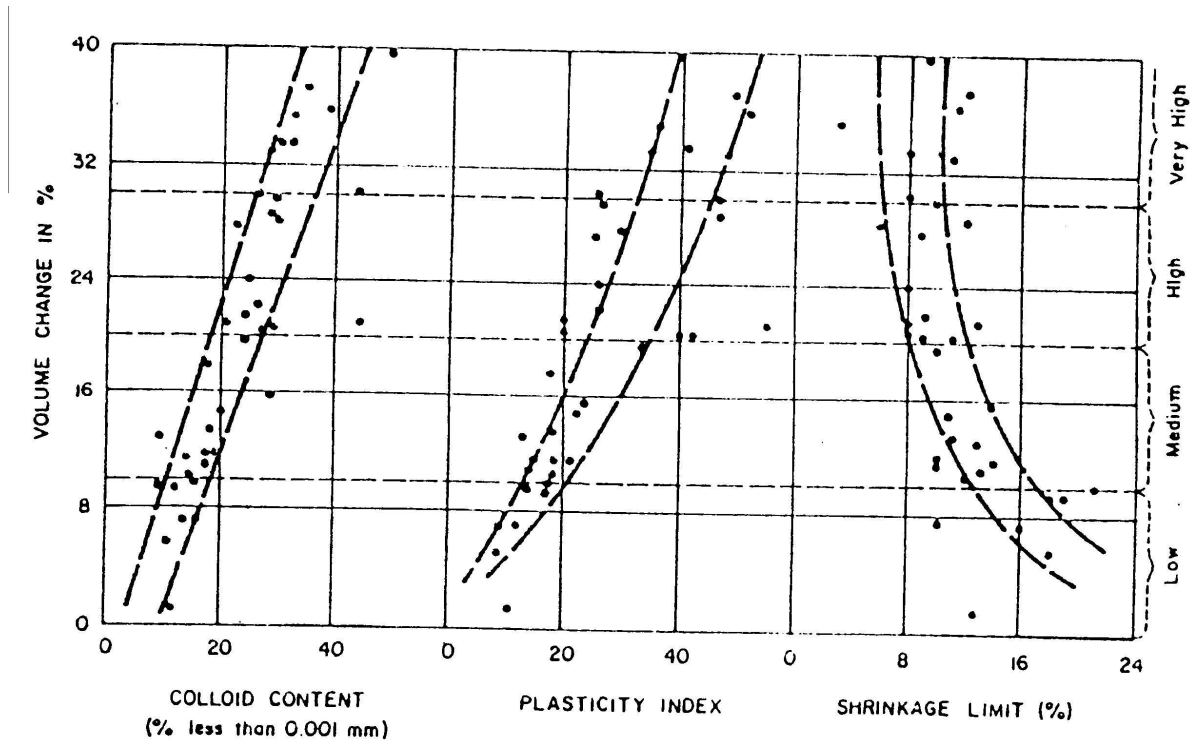
Esta medida de la expansión se realiza en condiciones muy desfavorables, ya que se hace en condiciones de ninguna sobrecarga y hoy en día se utilizan métodos más adecuados a tales efectos. Experimentos realizados por Holtz indican que una arcilla como la bentonita comercial puede tener en este ensayo expansión del orden de 1200 a 2000 %. Holtz sugiere que las expansiones medidas en este ensayo por encima del 100 % pueden causar daños significativos a la estructura, mientras que suelos que alcanzan una expansión por debajo del 50 %, rara vez experimentan cambios de volúmenes apreciable bajo la aplicación de cargas estructurales, aún cuando estas sean provenientes de estructuras livianas.

Evaluación del potencial expansivo en base a los métodos expuestos.

Existen varios métodos que realizando diversas combinaciones de los resultados de las medidas de las propiedades antes mencionadas clasifican en categorías los potenciales expansivos del suelo

Método desarrollado por Holtz y Gibbs

En el gráfico siguiente se muestra una relación típica entre el contenido de coloides, el Índice Plástico y el límite de contracción.



Basado en las curvas presentadas Holtz propone el siguiente criterio para la identificación de suelos expansivos:

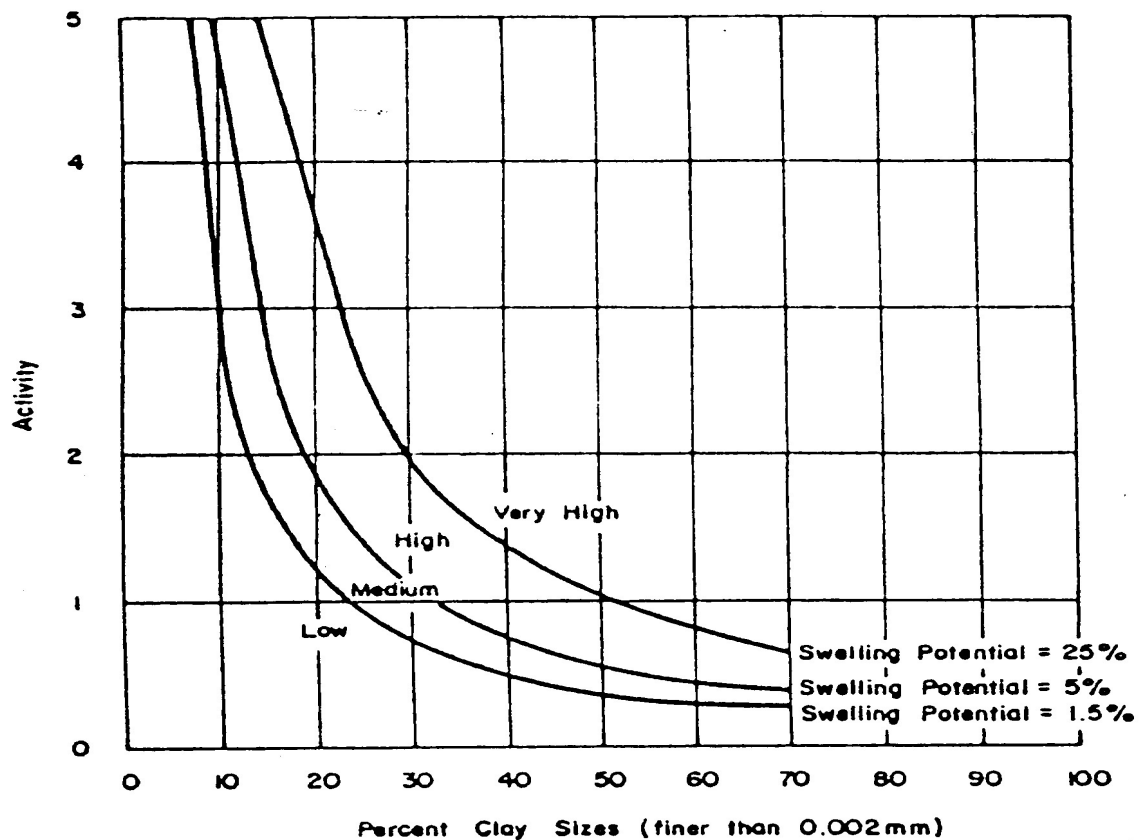
Contenido de coloide (< 0.001 mm) en %	Índice Plástico	Shrinkage Limit	% Expansión bajo carga de 1.0 psi	Grado de Expansión
> 28	>35	<11	>30	Muy alto
20 –13	25 – 41	7 – 12	20 –30	Alto
13-23	15 – 28	10 –16	10 – 30	Medio
>15	<18	>15	<10	Bajo

Método del “Índice de la actividad de la arcilla” propuesto por Seed, Woodward y Lundgren

Está basado en muestras remoldeadas de suelo compuestos por mezcla de arcillas, bentonita, illita, caolinita y arena fina.

La expansión se midió como un % del hinchamiento que experimentan probetas compactadas al 100 % del P.U.S.M. del Proctor Estándar y con el contenido de humedad óptimo y sometidas a una sobrecarga de 1 Psi

La actividad de la arcilla se define como: $A = \frac{PI}{(C-10)}$ IP: Índice Plástico
 C = % < 0.002 mm



Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo

Estos métodos consisten en predecir el potencial expansivo del suelo de una forma cualitativa, en base a medidas directas de la expansión del suelo sobre muestras remoldeadas compactadas en condiciones prefijadas de humedad y densidad.

Los métodos más utilizados son el de “Ladd y Lambe” auspiciado por la Federal Housing Administration y el método de “PVC” o método de la medida del cambio volumétrico.

Medidas directas de la expansión del suelo.

Estos métodos consisten en medir la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de hinchamiento para diferentes presiones aplicadas.

Es universalmente aceptado que los dos parámetros que definen el Potencial de Hinchamiento son:

- **Presión de hinchamiento (P_s)** definida como la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la

probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.

- **Hinchamiento libre (Hc)** definido como el % de la elevación máxima para presión nula en relación a la longitud inicial de la probeta.

Las medidas de estos parámetros se realizan fundamentalmente mediante pruebas edométricas o en técnicas basadas en la succión, tendiendo a simular los factores relevantes que sigue el fenómeno cuando se desarrolla in situ. Para lograr este objetivo se han propuestos innumerables metodologías experimentales que siguen operativas distintas, cuando no opuestas. Las principales divergencias radican en:

- forma de simular las condiciones de campo en el edómetro
- tamaño y forma de la muestra
- valor de la humedad inicial del ensayo
- magnitud de la precarga y secuencias de cargas
- momento de saturación
- mecanismos para medir el hinchamiento
- número de muestras que intervienen en el ensayo.

Es por esto que la abundante bibliografía internacional disponible evidencia marcadas discrepancias en los valores finales obtenidos y que la predicción del comportamiento resulte fuertemente influenciada por aquellas variables, más precisamente, por el camino de tensiones seguido y por el criterio de saturación utilizado.

Por lo expuesto la definición de hinchamiento no es tan simple como la definida con anterioridad, ya que está supeditada al procedimiento experimental utilizado para su cuantificación.

Si bien estos métodos constituyen el procedimiento más adecuado para predecir la expansión del suelo, además de las dificultades señaladas, tienen el inconveniente de requerir un equipamiento bastante completo (celdas de cargas, pesas, etc.), no disponibles en los laboratorios de uso común en ingeniería.

IV. ¿QUE FACTORES INTERVIENEN EN EL FENÓMENO DE LA EXPANSIÓN?

El potencial expansivo de un suelo (presión de hinchamiento y elevación) dependen, como mínimo, de las siguientes variables:

a) Naturaleza y tipo de arcilla.

La composición mineralógica de la arcilla (porcentajes de illita, caolinita y montmorillonita) que está compuesto la arcilla resultan fundamentales en cuanto al potencial expansivo del suelo.

Los suelos expansivos por excelencia son aquellos que tienen altos porcentajes de montmorillonita.

b) Humedad inicial

El elemento “catalizador” del fenómeno de la expansión, es precisamente, la variación en el contenido de humedad del suelo. Por más montmorillonita que esté compuesta una arcilla, si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, no habrá cambios volumétricos.

No es necesario que el suelo se sature completamente para que produzca expansión del mismo.

Por el contrario, en determinados casos, es suficiente variaciones en el contenido de humedad del suelo de sólo 1 o 2 puntos porcentuales, para causar hinchamientos y producir daños estructurales.

El contenido de humedad inicial del suelo controla la magnitud del asentamiento.

Arcilla “secas”, con contenido de humedad por debajo del 15 % indican un riesgo de expansión alto, pues fácilmente pueden llegar absorber contenidos de humedad de 35 % con las consecuentes daños estructurales.

Por el contrario, arcillas cuyo contenido de humedad está por encima del 30 % indica que la mayoría de la expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente.

c) Peso específico seco del suelo

Muy relacionada con la humedad inicial, el peso específico seco del suelo es otra variable fundamental en el proceso expansivo del suelo.

La densidad seca de una arcilla se ve reflejada en valores altos en los resultados en el ensayo de penetración estándar. Valores de "N" inferiores a 15 indican densidades secas bajas y riesgo expansivo bajo, aumentando significativamente estos a medida que aumenta el valor de “N”.

d) Características plásticas del suelo

Como ya fue explicado anteriormente las propiedades plásticas del suelo juegan un importante papel en el fenómeno expansivo

e) Potencia del estrato activo

A través de ensayos de laboratorio sobre muestras de un mismo suelo, compactadas al mismo grado densidad y humedad inicial, se ha estudiado el efecto del espesor del estrato en la magnitud total del hinchamiento.

Los resultados mostraron que la magnitud del cambio volumétrico experimentado es proporcional al espesor del estrato, mientras que la presión de expansión se mantiene constante.

Esto nos estaría indicando que si una estructura es capaz de transmitir una presión uniforme y constante a profundidades importantes debajo de la fundación se podría contrarrestar el fenómeno de cambio volumétrico. Pero como sabemos esto no es posible, ya que, a medida que aumentamos la profundidad, la presión transmitida por la zapata de fundación disminuye y por lo tanto no constituye un método efectivo para el control de la expansión.

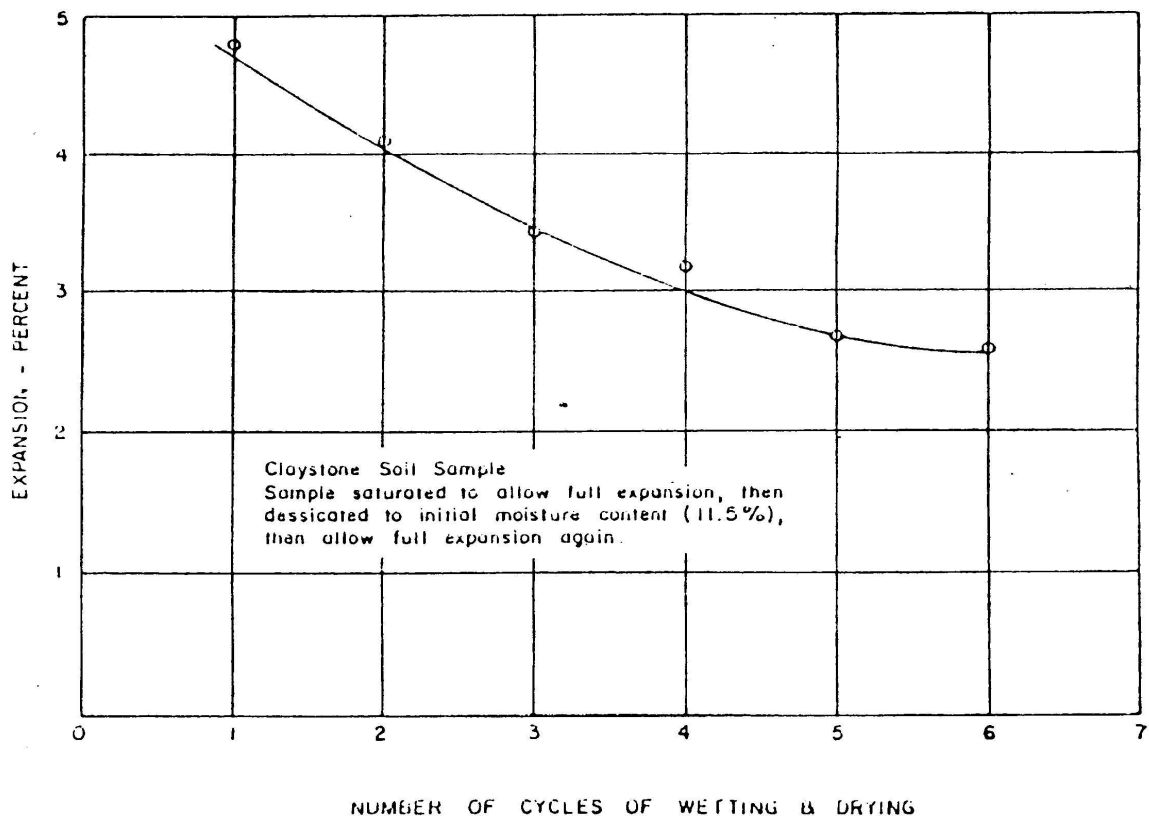
f) Fatiga de la expansión

En muestras sometidas en laboratorio a ciclos de saturación y disecado mostraron señales de fatiga después de varios ciclos.

Este fenómeno no ha sido todavía suficientemente investigado.

Se ha notado en pavimentos sometidos a variaciones estacionales en el contenido de humedad del mismo que tienden a un cierto punto de estabilización luego de un cierto número de años.

En el gráfico adjunto se puede ver una curva de fatiga típica de las obtenidas en ensayos de laboratorio.



V. ¿COMO ACTUAR FRENTE A UN SUELO EXPANSIVO?

Ante la presencia de un suelo potencialmente expansivo, las dos grandes líneas de acción serían:

- **Actuar en el sentido de reducir o eliminar la expansión del suelo.**

Las diferentes formas de acción sobre el suelo se pueden agrupar en:

- * Inundar el suelo en el sitio de manera que se produzca una expansión antes de la construcción
- * Reducir la densidad del suelo mediante un adecuado control de la compactación.
- * Reemplazar el suelo expansivo por uno que no lo sea.
- * Modificar las propiedades expansivas del suelo mediante diversos procedimientos: estabilización mediante cal, cemento, inyecciones, etc.
- * Aislar el suelo de manera que no sufra modificaciones en su contenido de humedad.

- **Actuar sobre la estructura y a través de la selección de un diseño de cimentación apropiado.**

En líneas generales se actúa en el sentido de rigidizar o flexibilizar de tal forma la estructura que sea capaz de absorber o adaptarse a las deformaciones resultantes. En el diseño del cimiento se tiende a una concentración de cargas de manera que la presión transmitida al suelo sea capaz de controlar la deformación. Este punto es ampliado más adelante.

ACTUACIÓN SOBRE EL SUELO

- **“PreHumectación” del Suelo:** la teoría de “prehumectar “ el suelo antes de la construcción está basada en el hecho de que si al suelo se le permite que se expanda antes de la construcción y si luego la humedad del suelo es mantenida, no es de esperar cambios volumétricos y por lo tanto no es esperable daños sobre la estructura.

La experiencia indica que en las áreas cubiertas por una losa, contrapiso, pavimento, etc., el contenido de humedad del suelo rara vez decrece. Si uno “inunda el suelo”, una vez que el suelo se hinche hasta su máximo potencial, la migración del contenido de humedad hacia la parte de suelo subyacente que se encuentra menos húmeda induce nuevas expansiones del suelo diferidas en el tiempo. Este proceso puede continuar durante cerca de 10 años.

El tiempo requerido para lograr una adecuada humectación del suelo, aunque no sea necesario llegar a la saturación, es de al menos uno o dos meses, lo que puede ser considerado como demasiado largo.

Además es muy cuestionable el hecho de que se obtenga una variación uniforme en el contenido de humedad del suelo en las áreas “prehumectadas”.

Los suelos arcillosos, que son los potencialmente expansivos, son muy difíciles de “prehumectar” siendo lo más factible que el agua penetre a través de fisuras, etc., no lográndose una humectación pareja del suelo.

Este método de “inundación previa” puede resultar útil para la cimentación mediante losas, construcción de pavimentos, canales, etc., pero no es adecuado para cimentaciones aisladas (tipo patín)

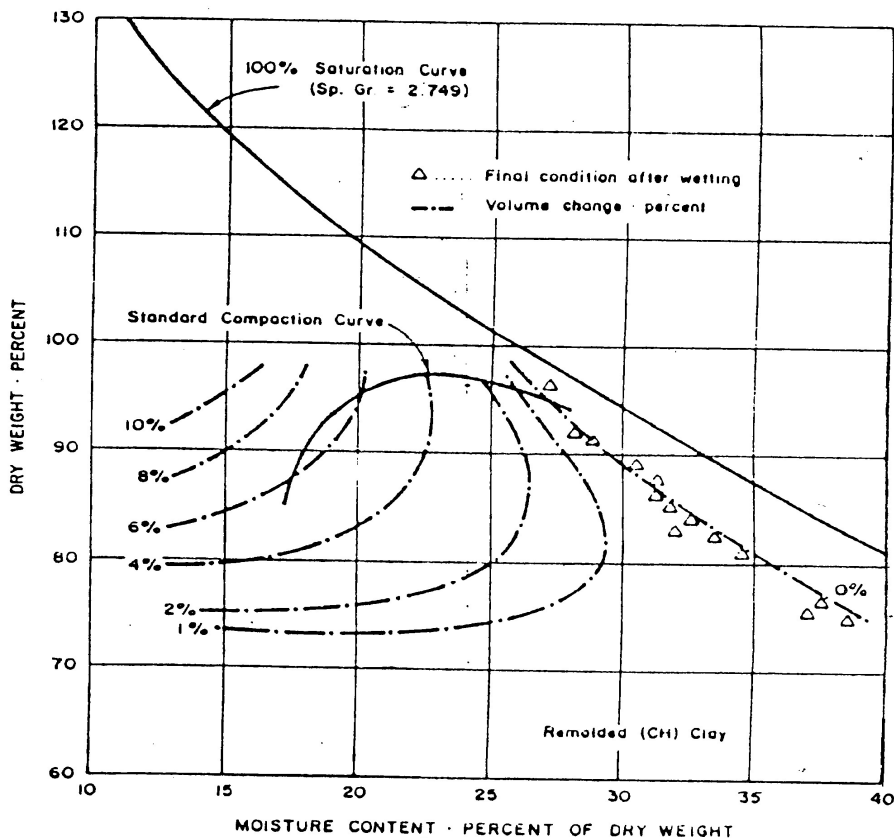
La razón es que el prehumectar el suelo conlleva a reducir en una forma muy significativa los parámetros resistentes del suelo, lo que lo hace inadecuado para el apoyo de cimientos aislados.

- **Reducción de la Densidad del Suelo:** este método es naturalmente válido cuando la cimentación se debe hacer sobre un material a terraplenar, o en aquellos casos en que se procede a la sustitución del suelo.

La magnitud del asentamiento en un relleno depende de la densidad alcanzada en la compactación, el contenido de humedad de la compactación, el método de compactación y la carga que se aplique sobre el relleno

Estos dos últimos están impuestos por el equipo usualmente disponible en la obra durante la compactación y la sobrecarga impuesta por la obra, de manera que sobre lo que podemos actuar es fundamentalmente sobre los dos primeros.

En el gráfico siguiente Holtz and Gibbs muestran la influencia de la densidad y la humedad en la compactación de una arcilla expansiva.



Se puede apreciar el hecho de que las arcillas expansivas expanden poco cuando son compactadas a densidades bajas y alto contenido de humedad, pero expanden mucho cuando son compactadas a densidades altas y bajos contenidos de humedad.

La principal razón de que el contenido de humedad es importante durante la compactación es que el contenido de humedad es un controlador del grado de densidad alcanzado, y no tanto por el hecho de que un alto contenido de humedad haga reducir sensiblemente la expansión. El elemento fundamental para controlar la expansión es el grado de densidad alcanzado.

Ya en el año 1959 Dawson aconsejaba que en suelos expansivos se debía controlar no sólo el alcanzar un grado de compactación mínimo, sino también un valor máximo.

Como se muestran en la tabla siguiente, un decremento de la densidad seca de una arcilla expansiva desde 109 a 100 pcf, la presión de hinchamiento decrece de 13 a 5 psf y el potencial de hinchamiento desde 6.7 a 4.2 %. Esto sin variar el contenido de humedad del suelo.

Efecto de la variación de la densidad en el cambio volumétrico y en la presión de hinchamiento para muestras de contenido de humedad constante:

Densidad Inicial (pcf)	Contenido Inicial de Humedad (%)	Contenido Final de Humedad (%)	Porcentaje de saturación inicial	Incremento de Volumen en (%)	Presión de Hinchamiento (psf)
94.3	12.93	21.27	45.0	2.7	2,600
99.4	12.20	24.92	48.1	3.8	4,600
100.2	12.93	19.93	52.1	4.2	5,000
103.3	12.93	20.51	56.3	5.1	7,000
109.1	12.93	20.56	65.4	6.7	13,000
110.8	12.20	19.03	64.7	7.3	14,000
114.5	12.20	19.17	71.6	8.2	21,000
118.9	12.20	17.08	81.2	8.6	35,000
Promedio	12.55	21.08			

La principal ventaja de controlar la densidad de compactación es que se puede reducir el potencial expansivo del suelo, sin necesidad de agregar agua por encima de la óptima, con las desventajas económicas que esto trae aparejado y los problemas analizados en el método anterior.

- **Sustitución del Suelo Expansivo:** una alternativa simple de cimentar una losa o un patín en un material expansivo es remplazar el material expansivo por otro que no lo sea.

La experiencia indica que si el suelo natural sobre el que estamos apoyando nuestro cimiento consiste en más de 5 pies (aprox. 1.50 mts) de suelo granular del tipo (SC-

SP), que a su vez se apoya en un suelo altamente expansivo no existe riesgo de movimiento en la fundación cuando apoyamos la misma sobre este material granular.

¿Por qué motivo se afirma esto?

No está claro si es debido a que el agua superficial no llegará al material expansivo, o si existe un acomodamiento del material granular que hace que los eventuales movimientos sean prácticamente inexistentes, o se debe a una combinación de ambos efectos...

La afirmación anterior no es necesariamente cierto cuando el material sobre el que se apoya se trata de un relleno especialmente seleccionado a nuestros efectos.

¿Qué requerimientos le haríamos a ese relleno granular?

Nos podemos hacer aquí tres preguntas:

- 1º. ¿Que tipo de material debemos colocar?
- 2º. ¿Que espesor tendría ese relleno (o sea que profundidad de sustitución)?
- 3º. ¿En que área debajo de la fundación extenderíamos la sustitución?

El primer requerimiento es, obviamente, *que el material no sea expansivo*, eso lo cumplen los suelos cuya clasificación varía desde los materiales del tipo GW a los del tipo SC.

Los materiales granulares que podemos considerarlos “limpios”, es decir con escasa cantidad de finos, aquellos cuya clasificación de acuerdo al S.U.C.S. varía del tipo GW a SP, tiene una permeabilidad tal que el agua podría llegar hasta los materiales subyacentes arcillosos y expansibles.

Desde el punto de vista antes señalado sería preferible que los materiales del relleno sean menos permeables, con cierto contenido de finos (del tipo SM o SC), aunque esto tiene la contra de que los finos de estos materiales pueden a su vez presentar cierto grado de expansión.

Uno de los criterios usuales es el planteo de la siguiente condición:

Limite líquido	% de Material que pasa el 200
Mayor a 50	15 – 30
Entre 30 a 50	10 – 40
Menor 30	5 - 50

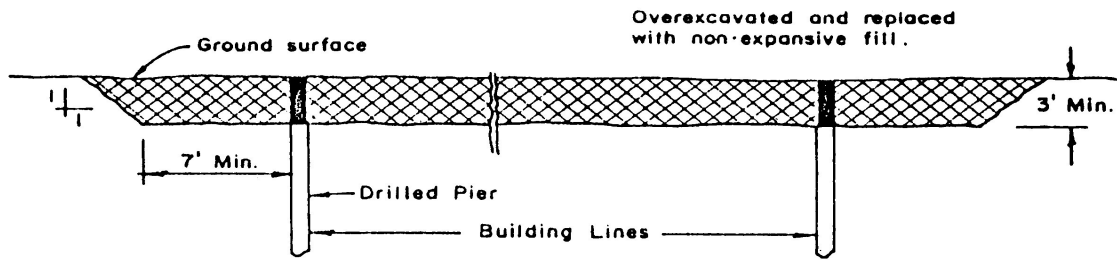
No es tan fácil que un suelo cumple con las condiciones antes planteadas. En caso de dudas razonables, para poder determinar realmente el potencial expansivo del suelo hay que proceder a las metodologías habituales a tales efectos.

Una alternativa para mejorar el potencial expansivo del suelo sería el poder mezclar el material granular con el suelo emplazado en sitio. Si bien dicho método es teóricamente razonable, en la práctica se hace muy dificultoso la mezcla de material granular con arcillas de bajo contenido de humedad. Se necesita maquinaria especial, sobretodo por la dificultad de disgregar los “terrones” de arcilla a tamaños adecuados, lo que lleva a

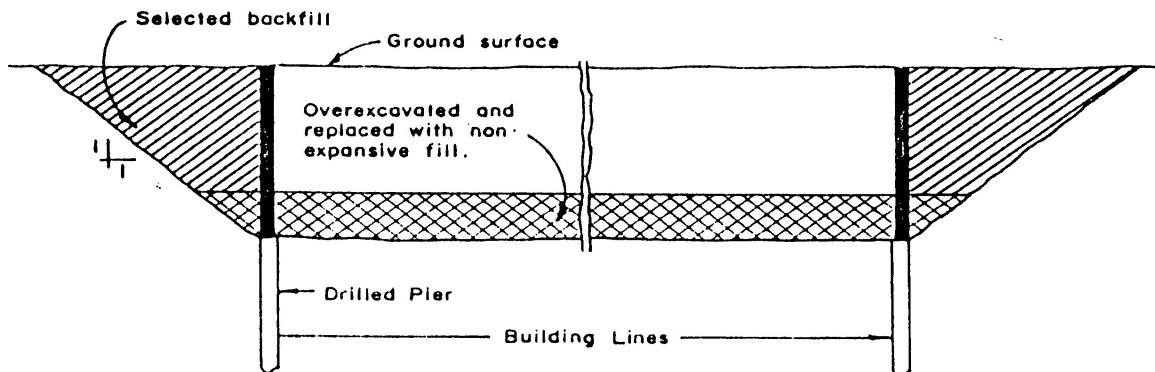
costos tan caros como otros procedimientos en los que se obtienen mejores resultados como la estabilización con suelo cal o suelo cemento.

La principal razón por la cual un relleno artificial de un material seleccionado no es tan efectiva como el apoyar sobre una masa de suelo granular en estado natural, es por la extensión del mismo debajo de la fundación en uno y otro caso. Cuánto mayor sea el área en que efectuamos el reemplazo, más efectivo resulta el relleno

En las figuras siguientes se muestran consejos de extensiones de material a sustituir en caso de diferentes condiciones de cimentación.



NON-BASEMENT CONDITION



DEEP BASEMENT CONDITION

Con la tecnología disponible en la actualidad para la acción sobre los suelos expansivos, la sustitución de suelos puede ser considerada como una de las mejores opciones para la estabilización de estos suelos.

Dentro de las ventajas de este método está el hecho de que se pueda compactar el material sustituido a elevados porcentajes de manera de poder soportar cargas importantes. Con el método de "prehumectado" o de "control del grado de la compactación", la capacidad resistente del suelo se ve disminuida.

El costo de esta alternativa no es caro si la comparamos con la de cualquier otra forma de tratamiento químico, etc.

Con la excepción de la cimentación del tipo “losas flotantes” el método de reemplazo del material expansivo constituye el método más seguro para una fundación directa sobre este tipo de materiales.

Cuando se procede a la sustitución de suelo, es conveniente tener la precaución adicional de realizar los drenajes superficiales en forma adecuada alrededor de la construcción de manera de evitar la infiltración de agua por debajo de los niveles del relleno.

Algunas de las recomendaciones para la construcción de caminos propuesta por la Federal Highway Administration son las siguientes:

- . Profundidad mínima de reemplazo de material de 2 pies (60 cm).
- . Material de reemplazo que no sea granular, sino materiales limosos, o arcillas limosas, que no sean expansivas.
- . El material de relleno a ser utilizado debe ser compactado a una densidad entre 92 a 95 % de la densidad máxima y a una humedad no menor a la óptima de la correspondiente al Proctor AASHTO T99.

Recomienda profundidades mínimas de reemplazo según se trate de rutas principales o secundarias:

Índice de Plasticidad	Profundidad del Tratamiento en Pies	
	Rutas Principales	Rutas Secundarias
10 – 20	2	2
20 – 30	3	3
30 – 40	4	4
40 - 50	5	

- **Modificación de propiedades expansivas del suelo por diversos procedimientos:** dentro de estas técnicas podemos citar a la estabilización del suelo mediante el agregado de cal, cemento, inyecciones.

El agregado de cal, y de cemento al suelo como elementos controladores de la expansión se utilizan desde hace muchos años, preferentemente dentro del campo de la ingeniería vial, como estabilización de subrasantes de carreteras, etc., teniendo un uso casi nulo en la construcción de edificios.

La acción, tanto de la cal, como la del cemento consisten en modificar las características plásticas del suelo, reduciendo el límite líquido, el Índice de Plasticidad e incrementado el límite de contracción.

Las cantidades a agregar de cal y de cemento varían de 2 a 6 % en peso de la mezcla, dependiendo de los objetivos de la estabilización, la cual tiene la ventaja adicional (sobretudo en el caso de uso de cemento) de que mejoran el poder soporte del suelo (CBR).

Una forma de modificación de las propiedades expansivas del suelo utilizadas en fundaciones de estructuras la constituye la realización de inyecciones químicas en el suelo, de manera de modificar las características plásticas del suelo, a la vez que disminuyen la permeabilidad del mismo. Estas técnicas resultan en general de alto costo, tanto por el costo del elemento químico a utilizar, así como de la técnica empleada para su aplicación.

- **Aislación del suelo de variaciones importantes en el contenido de humedad:** si se pudiera lograr que el suelo no sufriera variaciones importantes en su contenido de humedad, entonces, por mayor que sea el potencial expansivo de la arcilla no habrá cambios volumétricos.

La variación de contenido de humedad puede provenir de dos fuentes básicamente:

- a) la infiltración al terreno de aguas superficiales ó,
- b) la variación de niveles de agua subterránea.

Si bien es relativamente sencillo sacar el agua libre que se ha introducido en la obra para la construcción de una fundación, realizando los drenajes adecuados ya sean superficiales o subterráneos ha tales efectos, pero sin embargo no es tan sencillo el impedir la migración de la humedad desde el exterior de un local hacia el interior de un área cubierta.

Para impedir la infiltración de aguas superficiales se puede disponer de:

- Barreras horizontales contra la humectación del suelo alrededor de la construcción a través de: membranas, construcción de veredas perimetrales, pavimentos asfálticos, drenaje adecuado.
- Barreras verticales alrededor de la construcción para impedir las variaciones estacionales en el contenido de humedad del suelo también mediante el uso de membranas, hormigón, etc.

Las “barreras verticales” usualmente están unidas a una horizontal para prevenir la humectación del suelo entre la barrera vertical y la construcción, ya que las barreras verticales deben construirse al menos 70 a 100 cm alejadas del perímetro de la construcción.

Si bien las barreras verticales son más efectivas que las horizontales, las mismas resultan mucho más costosas.

Para evitar la variación del contenido de humedad por variación del nivel de agua subterránea la alternativa más adecuada la constituye la construcción de drenajes subterráneos.

El proyecto de drenes deberá tener presente el tipo de acuífero de que se trate, si es confinado o no, el caudal de agua que escurre por el mismo, profundidad a la que se instala el dren, capacidad del sistema de drenaje , etc

ACTUACIÓN SOBRE LA ESTRUCTURA Y EL SISTEMA DE CIMENTACIÓN

1. Fundaciones Superficiales En Suelos Expansivos.

Esta clase de fundaciones, más comúnmente denominadas como zapatas o patines, pueden ser implementadas con éxito sobre subsuelos conformados por materiales expansivos, siempre que se cumpla al menos uno de los siguientes requisitos:

- La presión aplicada, debido a las cargas permanentes, resulte suficiente como para contrarrestar la presión de expansión.
- La superestructura tenga el grado de rigidez necesario como para que una expansión diferencial no cause fisuras o grietas en los elementos resistentes.
- El efecto expansivo pueda ser eliminado o al menos reducido de manera de evitar o mitigar los desórdenes (ya sean éstos de carácter resistente, funcional o ambos).

2. El Caso De Las Zapatas Corridas.

Como se sabe, es la tipología más común de fundación superficial para estructuras livianas. Es claro, en consecuencia, que para prevenir el efecto de la expansión se vuelve necesario concentrar la presión aplicada, lo que deriva en minimizar el ancho de la zapata.

Por lo tanto el uso de zapatas corridas debería limitarse a suelos de bajo grado de expansión, por ejemplo en general inferior al 1%, medido en el ensayo de expansión libre.

Sin embargo, el uso de fundaciones alternativas, al caso pilotes, puede ser antieconómico y por ello en muchas situaciones se aceptan daños menores (como fisuras en paredes y techos), cuyos costos de reparación resultan inferiores a los de un sistema de fundación diferente.

Una variante, cuando no es factible cambiar el sistema de fundación, es implantar las zapatas a profundidades mayores, esto es a salvo de la capa de suelo donde las variaciones en el contenido de humedad son mayores (al menos 1,50 a 2,00 m por debajo del nivel del terreno natural). Esta ubicación reduce y limita además los desplazamientos diferenciales.

En general, se sugiere a las zapatas corridas como una alternativa en principio válida cuando:

- El subsuelo no es altamente expansivo (básicamente illita en vez de montmorillonita)
- Es poco probable que se verifique un ascenso del nivel freático.
- No hay disponibilidad de fundar con pilotes.

- La superestructura está conformada por madera.

Una variante a veces empleada es la fundación en “cajón”, esto es una estructura de hormigón fuertemente armada, cuya altura media es del orden de 2,00 m. Es notorio que este tipo de fundación protege a la estructura de eventuales fisuraciones derivadas de expansiones diferenciales. En estos casos, no deben existir discontinuidades a nivel de la superestructura, que introduzcan puntos débiles. En especial, en estructuras complejas, se sugiere agregar juntas para separarlas en dos o más módulos. Cada módulo actuará entonces en forma independiente y los desplazamientos diferenciales podrán absorberse en las juntas.

3. El Caso De Las Zapatas Aisladas.

Como es sabido, este sistema consiste en una serie de zapatas apoyadas sobre las capas superiores del subsuelo, conectadas entre sí por vigas de fundación. Como en el caso de las fundaciones indirectas o profundas, la carga de la estructura es transmitida al suelo en forma concentrada en diferentes puntos; la diferencia es que naturalmente en este caso la descarga se realiza en las capas superiores del terreno y no se involucra la resistencia lateral por fricción.

El uso de este sistema puede ser ventajoso cuando:

- El techo de roca o el estrato resistente es profundo y no puede ser económicamente alcanzado por pilotes.
- Las capas superiores del suelo poseen un potencial expansivo moderado.
- La capacidad portante de las capas superiores es relativamente alta.
- Existe napa freática o capas blandas que impiden el uso de pilotes trabajando por fricción.

En el caso de un suelo expansivo, si la presión aplicada es mayor que la presión de expansión (para cambio de volumen nulo) no deberían observarse desplazamientos debidos a esta causa.

En general puede decirse que la magnitud de la presión aplicada está limitada por la capacidad portante del suelo de fundación y es función del coeficiente de seguridad adoptado (usualmente entre 2 y 3). Por lo tanto, considerando los valores habituales de tensiones admisibles para suelos arcillosos de Formación Libertad (1,0 a 2.0 kg/cm²), este sistema de fundación sólo podrá aplicarse en suelos con potenciales expansivos medios (1 a 5% de expansión libre y presión de expansión en el rango de 1 a 2 kg/cm²).

Para permitir en estos casos la concentración de tensiones aplicadas en las zapatas individuales se requiere descalzar las vigas de fundación, esto es dejar un espacio vacío bajo éstas.

De todas formas, algunos investigadores como Peck entre otros, han señalado además que la expansión del suelo sólo se puede impedir en una zona localizada bajo la zapata donde se concentran las tensiones inducidas por la fundación.

4. El Caso De Las Losas De Fundación.

El comportamiento de las losas de fundación (o plateas) construidas sobre suelos expansivos, puede considerarse un problema de difícil control y aún no resuelto para todos los casos.

En esta categoría están comprendidas las losas de piso interiores, las exteriores, los pavimentos, etc.

En general estas losas no soportan una carga aplicada importante y los pesos propios son también bajos. En consecuencia, es esperable que se produzcan movimientos cuando aumenta el contenido de humedad en el subsuelo bajo la losa y por lo tanto, esta consideración debiera ser un requisito de diseño.

Además los movimientos de estas losas no sólo pueden traducirse en fisuras sino que en muchos casos pueden afectar la estabilidad general de la estructura.

En general, las losas van directamente apoyadas sobre el subsuelo y se construyen incorporando algún tipo de armadura, dependiendo de las cargas aplicadas.

Más que nada la disposición de estas armaduras tiende a prevenir las fisuraciones de origen térmico, pero no así las causadas por la expansión del suelo.

De allí las dificultades que se presentan cuando son implantadas sobre subsuelos con potencial expansivo entre moderado y alto.

El desarrollo de sistemas de pisos económicos capaces de revertir el problema de la expansión ha sido desde siempre un objetivo común de ingenieros estructurales y de suelos.

Lamentablemente no es aún posible dar una respuesta totalmente eficaz a este tema.

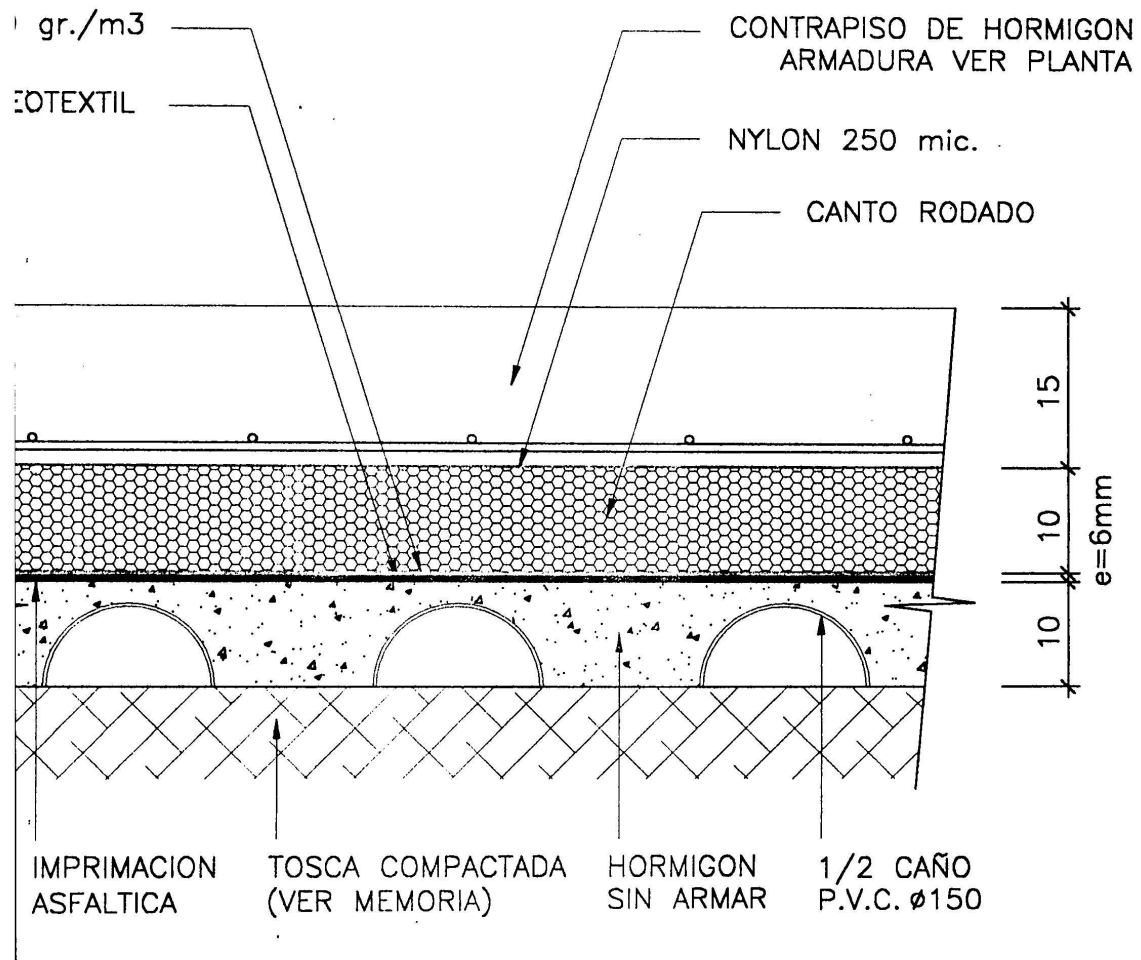
Algunos de las alternativas actuales incluyen los sistemas de pisos nervados y los pisos con cavidades.

Comentaremos brevemente a continuación sus principales características.

El primero, propuesto originalmente por la Asociación de Cemento Portland de California, consiste en construir un piso elevado a partir de una losa “nervada”, cuyos nervios apoyan sobre el subsuelo expansivo. El espaciamiento entre nervios y el espesor de la losa dependen del potencial expansivo de los suelos superficiales y de la carga aplicada previsible. Los huecos proveen el medio de alivio de la presión de expansión. El sistema también permite incorporar tubos y conductos en el piso. Entre sus desventajas, está el hecho que no siempre es posible ejercer la presión suficiente sobre los nervios como para contrarrestar la expansión. Aparte del costo en sí mismo de la solución, es necesario agregar el que corresponde a la nivelación del suelo de manera de garantizar un espesor uniforme para los nervios y los huecos.

El sistema de pisos con cavidades, como se aprecia en la figura siguiente, consiste en aligerar la sección mediante una serie de tubos plásticos (“media caña”) que se ubican sobre el suelo y el espacio entre ellos se rellena con arena o a veces con hormigón sin armar (solución aplicada en algunas obras en nuestro país). Se considera que cuando la

arcilla se hincha, se expande en los espacios huecos y así se reduce la presión de expansión.



Otra forma de mitigar la expansión a nivel de pisos, es a través de las losas estructurales. Éstas se construyen apoyadas en cada uno de sus lados por vigas y se deja un espacio vacío bajo la losa para evitar el contacto con el suelo. El espacio, puede aprovecharse para alojar tuberías y conductos. La solución presenta inconvenientes constructivos y un costo elevado.

Asimismo es recomendable la introducción de juntas de expansión, de manera de separar las losas de las vigas de apoyo, como forma de permitir el libre movimiento de estas losas. En caso contrario, la presión de expansión puede provocar elevaciones en la zona central de las losas, mientras que la zona perimetral queda esencialmente en su posición original, lo que provoca la aparición de fisuras en las losas, paralelas a las vigas.

5. Un Ejemplo de Distribuidos Funcionales.

Haremos referencia aquí a las consecuencias de la expansión del suelo observadas sobre una edificación de planta industrial, situada en Montevideo, próximo a la costa. La planta consta de equipamientos electromecánicos con márgenes de tolerancia exigentes

para su estado de servicio en acuerdo con el diseño de las piezas mecánicas involucradas.

Las máquinas apoyan sobre una plataforma que trasmite a través de pilares la descarga del conjunto a una fundación de tipo “cajón” sobre un subsuelo que en términos generales puede resumirse en la siguiente secuencia estratigráfica: relleno, arena, arcilla limosa, granito (basamento cristalino).

La capa de arcilla limosa, de entre 25 a 30 metros de potencia, fue consolidada previo a la construcción de la obra mediante inyecciones de cemento y bentonita.

Sobre esta capa apoya la fundación y se tenía la experiencia previa que otras obras próximas habían registrado levantamientos en el pasado. Las inyecciones practicadas procuraron entonces limitar el fenómeno a la vez que impermeabilizar el subsuelo, debido a la presencia permanente de nivel freático y por ende subpresión en la fundación.

Sin embargo los controles geodésicos efectuados desde el inicio de la entrada en servicio del equipamiento mostraron que los ascensos de la base de apoyo, lejos de mitigarse, se producían a un ritmo sensiblemente uniforme, esto es a una velocidad media de aproximadamente 0,6 mm por año, sin exhibir signos de amortiguamiento.

En tales condiciones, para evaluar la hipótesis de expansión, se extrajeron muestras inalteradas de las capas de arena y arcilla, con el objeto de ejecutar ensayos de expansión y estudios de composición mineralógica.

De estas últimas resultó que el componente principal es montmorillonita, mineral arcilloso no cristalino, susceptible de hincharse. También es probable la existencia de minerales arcillosos de capas alternadas con alto potencial expansivo. Asimismo se comprobó la presencia de illita y feldespato.

Los ensayos geotécnicos comprobaron que se estaba frente a una arcilla no orgánica de elevada plasticidad (tipo CH), asociada a características de Formación Fray Bentos, con índices de plasticidad variables según la profundidad considerada en el rango de 25 a 40%, valores indicativos de un potencial expansivo entre moderado y alto.

El ensayo de expansión libre mostró un aumento de volumen del 21% tras 50 horas, para muestras de arcilla saturada. Las expansiones ulteriores tienen lugar luego a una velocidad reducida.

En cuanto al ensayo de presión de expansión se determinó que es necesario aplicar a la muestra una presión de 1100 kPa (aprox. 11 kg/cm²) para contrarrestar completamente el hinchamiento, confirmando así las características altamente expansivas de la arcilla que adelantaban los ensayos de identificación y la mineralogía.

La presión vertical en la superficie superior de la capa de arcilla, debido a las cargas aplicadas es de 200 kPa y la misma presión pero evaluada en el contacto arcilla-granito es de 600 kPa¹. En consecuencia, incluso la presión vertical en el límite inferior de la capa arcillosa es insuficiente para suprimir completamente los hinchamientos.

¹ Presión originada por el peso propio de la masa de suelo

Estas razones condujeron a establecer que la capa completa de arcilla limosa de Formación Fray Bentos es de un hinchamiento potencial activo.

La tipología de la fundación no pudo ser identificada como causa de problemas; tampoco la operación de los equipos y asimismo hubo que descartar la influencia de las variaciones de nivel freático (básicamente por medidas piezométricas).

En resumen la única causa probable de las elevaciones de la fundación es el potencial de hinchamiento del subsuelo arcilloso.

La expansión se produce cuando el agua entra en contacto con la arcilla. Esta penetración ocurre en la superficie de la capa arcillosa, difundiéndose dentro de ella muy lentamente debido a la baja permeabilidad de la arcilla. Al entrar en contacto con el agua, se produce un aumento de volumen máximo de un 21%, valor que representa un límite superior para la magnitud absoluta de la expansión, el cual se alcanza únicamente bajo condiciones totalmente favorables para su desarrollo y a intervalos de tiempo geológico.

En este caso particular, dos hechos pusieron de manifiesto el hinchamiento y permitieron que se desarrollara en forma diferida.

Por un lado, durante la excavación de la fosa de la obra, se lesionó la superficie superior de la capa de arcilla, permitiendo así la penetración del agua. De este modo se activó el potencial de expansión de la capa superior.

Por otro, durante los trabajos preparatorios, previos a la edificación, se inyectó cemento en el subsuelo, en el supuesto de evitar la expansión. Sin embargo, las inyecciones de cemento no pueden atravesar los espacios huecos microscópicos que se encuentran entre los minerales arcillosos. Para este tipo de suelos, una intervención de esta naturaleza resulta inapropiada ya que la penetración a presión causa fisuras en el esqueleto mineral, facilitando así aún más la penetración del agua en la superficie de la capa arcillosa y por otro la infiltración de agua en las zonas más profundas a través de fisuras secundarias producidas por la inyección de cemento.

Debido a que se trata de un proceso mineralógico-geológico, las intervenciones de remediación son efectivas sólo en forma restringida y requieren gastos importantes.

Para minimizar la expansión es posible ejercer una contrapresión o bien actuar sobre el origen del problema a fin de detenerlo, evitando el ingreso de agua hacia el retículo cristalino. Ambas medidas no resultaban aplicables en este caso. En efecto, un aumento de la carga directa es prácticamente imposible en virtud de los valores tensionales resistentes en juego. Asimismo, evitar el acceso de agua a la capa arcillosa (por ejemplo mediante una suave inyección de cemento en superficie) también es problemático ya que sólo se podría tratar una profundidad limitada bajo la fundación y aún cuando resultase exitosa, habría igualmente suficiente agua en la masa de suelo con lo cual la expansión se detendría recién después de años o incluso decenas de años.

Otra alternativa analizada fue el anclaje de la fundación en el granito profundo, utilizando pilotes verticales que permitirían aumentar la resistencia a la tracción de forma tal que fuese posible compensar la presión resultante del hinchamiento.

Suponiendo entonces que fuera posible generar una presión adicional de 1100-200 = 900 kPa, serían necesarios 200 pilotes de anclaje atravesando la base de fundación, con una longitud entre 35 y 40 m en la arcilla limosa y al menos 6,00 m de empotramiento en el granito. Además de inconvenientes técnicos durante la etapa constructiva que podrían comprometer la eficacia de la solución, de por sí compleja, el costo de la misma ascendería a unos U\$S 2:000.000.

Luego, al no ser posible suprimir o compensar completamente la expansión, debió pensarse en eliminar sus efectos negativos, lo que se tradujo en la adopción de soluciones de tipo mecánico, sobre el equipamiento, capaces de regular desplazamientos del orden de centésimas y décimas de milímetro.

Si bien no es objeto de este trabajo ingresar en el detalle de la solución adoptada, puede decirse que la misma no implicó modificaciones constructivas y se basó en reajustes de los apoyos de máquinas, con éstas fuera de servicio.

Asimismo para el caso de nuevos proyectos en la zona, se deberá evitar desde el principio la movilización de la expansión mediante adecuadas medidas constructivas. Se debe evitar excavar y desfondar grandes superficies de la capa arcillosa, ya que de ese modo se da acceso al agua. Si a pesar de todo fuera necesario llevar adelante una medida de ese tipo, se debe cubrir de inmediato la superficie arcillosa con una capa de cemento.

Pero en todo caso, será mejor incorporar las fundaciones de nuevas plantas o edificios en la capa de arcilla, en base a métodos de construcción y perforación en seco. Podrían utilizarse grande pilotes perforados de fabricación en seco que atravesarían completamente la capa arcillosa, quedando anclados en el granito. La parte superior de estos pilotes debe ser ejecutada mediante doble tubería con el fin de evitar la penetración de aguas subterráneas hacia la perforación.

BIBLIOGRAFÍA:

- Foundations on Expansive Soils; F. H. Chen, 1988
La problemática de los materiales expansivos como fundación de construcciones livianas en las formaciones Libertad – Dolores, B Nahoum, J.E. Prefumo, C. Goso, Otros, 1999
Engineering Properties of Expansive Clays; Holtz W.G. , Gibbs H.J. 1954
Remedial Procedures Used in the Reduction of Detrimental Effect of Swelling Soils; Mc. Dowell, C., 1986
Observation of Expansive Clays in Roadways, Stevens, J.B., Matlock, H., 1986
Recommended Practices for Construction of Residential Concrete Floors on Expansive Soil, Portland Cement Association Vol II Los Angeles, 1970
Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica; Terzaghi , K., 1978
Reunión del Comité Técnico para suelos expansivos de la I.S.S.M.F.E, Coincidencias Técnicas Logradas, Trevisán Jorge, 1987
Swelling Solis and Damage to Structures, Foundation Handbook, Chinese Construction Industry Publication Society, 1978