

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA INGENIERÍA CIVIL**

**DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA POR
HIDRATACIÓN EN UN SUELO EXPANSIVO Y SU INFLUENCIA
EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

P R E S E N T A

OSCAR CABRERA ARVIZU

DIRIGIDO POR:

M. I. MARIA DE LA LUZ PEREZ REA

QUERETARO, QRO. NOVIEMBRE DE 2001

No Adq. H65994
No. Título TS
Clas. 624.15136
C117d

**DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA POR
HIDRATACIÓN EN UN SUELO EXPANSIVO Y SU INFLUENCIA
EN EL ANÁLISIS Y DISEÑO DE CIMENTACIONES.**

**A DIOS
A MIS PADRES**

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a Dios por la oportunidad de vivir, por haberme dado una familia, por permitirme conocer más del mundo que me rodea y por darme un arma más para enfrentarme a la vida, que son los estudios que hasta el momento he conseguido.

A mis padres J. Carmen Cabrera Rubio y Martha Arvizu Arvizu por haber hecho posible esto ya que sin su apoyo no lo habría conseguido.

A la Universidad Autónoma de Qro. en especial a la Facultad de Ingeniería que me cobijó y fue mi segunda casa durante los estudios.

A todos mis maestros, quienes compartieron conmigo sus conocimientos profesionales y me formaron durante los cinco años de la carrera.

A Fundación ICA, por su apoyo económico durante los últimos semestres de la carrera.

A la Maestra Ma de la Luz Pérez Rea quien además de ser mi asesor de tesis fue un guía y un apoyo muy importante en este trabajo.

Al laboratorio de Materiales división de estudios de posgrado por haberme apoyado con sus instalaciones para la realización de esta investigación.

Al Seminario Conciliar Diocesano de Ntra. Sra. De Guadalupe por haberme permitido seguir con este trabajo durante el año de estudios que realice con ellos.

Agradezco a todos los Padres formadores en especial al P. Luis, P. Efraín, P. Domingo y a mí párroco el P. Alfonso; a Fredy y a mis compañeros del seminario de quienes he tenido todo el apoyo de su parte.

Por último quiero agradecer el apoyo de todos mis compañeros y amigos de Ingeniería Civil con quienes he compartido momentos inolvidables, que me han apoyado y que el día de hoy están aquí presentes.

INDICE

	Pág.
1. Introducción.....	1
1.1 Importancia del conocimiento de los suelos expansivos.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Factores que influyen en la expansión y contracción del suelo.....	3
1.4.1 Mineralogía y química del agua.....	6
1.4.2 Plasticidad y densidad.....	7
1.5 Identificación y clasificación de los suelos expansivos.....	7
2. Caracterización del sitio de construcción.	12
2.1 Condiciones ambientales.....	12
2.2 Estado de esfuerzos.....	13
2.3 Zona activa.....	13
2.4 Exploración y muestreo.....	15
2.5 Ensayes de laboratorio.....	16
2.5.1 Pruebas de succión.....	16
2.5.2 Pruebas en el oedómetro.....	18
3. Comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos expansivos.....	21
3.1 Generalidades del comportamiento esfuerzo-deformación.....	21
3.2 Deformación volumétrica del suelo por alivio de esfuerzos.....	25
3.3 Deformación volumétrica del suelo por hidratación.....	29
4. Determinación de los parámetros para evaluar la deformación volumétrica por hidratación de un suelo expansivo.	34
5. Análisis y aplicación de resultados.....	41
5.1 Comparación con otros métodos de análisis.....	50
5.1.2 Método por pruebas en el oedómetro.....	50
5.1.3 Método por pruebas de succión.....	52
6. Conclusiones y recomendaciones.	54
Bibliografía.....	56
ANEXO A	
Registro de pruebas en laboratorio.....	57

CAPITULO 1

1. Introducción.

El origen de los suelos expansivos comenzó hace millones de años, cuando la tierra apenas estaba en proceso de formación y en plena actividad volcánica. La ceniza expulsada fue depositada en aguas poco profundas y formó una solidificación de arcilla rica en montmorilonita inestable. Estos sedimentos fueron subsecuentemente deformados por plegamientos y fallamientos, resultando depósitos estratificados que crearon el terreno montañoso bajo la superficie la cual es usualmente una superficie plana residual de debilidad marcada por la resistencia, el espesor o petrificación de la roca.

1.1 Importancia del conocimiento de los suelos expansivos.

Un alto porcentaje de la superficie de suelo se encuentra formado por suelos finos no saturados, como son principalmente depósitos de suelos residuales y sedimentarios eólicos y aluviales, constituidos por arcillas, limos y arenas finas.

Dentro de los suelos, calificados como problemáticos se encuentran las arcillas expansivas, que bajo condiciones ambientales que provocan variaciones en el contenido de humedad, dan origen a cambios volumétricos del suelo, lo que induce movimientos a las estructuras construidas sobre éstos, modificando el estado de esfuerzos en las mismas.

Este fenómeno afecta a estructuras ligeras como son edificios pequeños, casas, canchas deportivas, banquetas, andadores, pavimentos, etc.

Las repercusiones como consecuencia de este fenómeno son de índole social, técnico y económico.

En el Aspecto Social, en varios países del mundo y en particular México, varias ciudades importantes, como Querétaro, manifiestan un aumento poblacional acelerado, ante este hecho el problema prioritario es la dotación de espacios habitacionales.

Técnicamente, la severidad de los daños dependerá del tipo de material de construcción y del diseño de la estructura, apareciendo agrietamientos en banquetas y pavimentos de carreteras. En el caso de una casa habitación o un edificio pequeño, agrietamientos en bardas colindantes, en los muros y en los pisos de las habitaciones.

El conocimiento del comportamiento mecánico de los suelos expansivos ante variaciones de humedad y cambios de succión es una variable más a considerar en el diseño de las estructuras. El fenómeno de la succión puede relacionarse con la expansión del suelo: así, una succión alta indica gran potencial de expansión del suelo en materiales arcillosos.

En lo económico, en la actualidad en varios países del mundo y en especial en el nuestro, se tienen pérdidas millonarias anuales por daños y destrucción de construcciones, ocasionados por efectos de los suelos expansivos.

Según Hamilton(1977), "El cambio de volumen en los suelos constituye el riesgo natural más costoso en la construcción de edificios y cimentaciones en Canadá y Estados Unidos"

1.2 Justificación.

El espesor y ubicación de capas potencialmente expansivas de suelo, influyen considerablemente en el movimiento potencial. Un gran movimiento en perfiles que tienen arcillas expansivas extendiéndose desde la superficie a profundidades bajo la zona activa. En Ingeniería Civil el análisis del potencial de expansión juega un papel muy importante para el diseño y buen funcionamiento de las estructuras.

Antes de tomar alguna determinación y emitir cualquier recomendación sobre el tipo de cimentación, es necesario, la plena identificación del tipo de material con el que se está tratando. La identificación de suelos expansivos comprende dos etapas importantes. La primera es el reconocimiento y la segunda es el muestreo y medición de las propiedades de los materiales que son usadas en la designación de las predicciones.

Los trabajos de campo son una parte importante y fundamental de un estudio de mecánica de suelos, ya que es en este período donde se identifican los diferentes factores que pueden contribuir al cambio de humedad del suelo arcilloso generando posibles daños a la estructura.

El conocimiento del suelo y como el comportamiento de éste influye en el comportamiento de la propia estructura es una parte fundamental del diseño de la cimentación. Las estructuras ligeras son las construcciones más afectadas con el desarrollo del potencial expansivo del suelo y deben ser diseñadas para soportar éste, permitiendo deformaciones tolerables pero asegurando la continuidad del funcionamiento del inmueble. En un país como el nuestro, donde una vivienda, aunque de interés social, representa la mayoría de las veces todo el patrimonio de una familia; la vida útil de las estructuras debería exceder en tiempo al crédito otorgado para su adquisición.

Quizás el fenómeno de la expansión del suelo no pueda ser inhibido o evitado, pero el conocimiento del mismo nos permitirá tomarlo en cuenta para prevenir daños en las construcciones.

1.3 Objetivo

En este proyecto de tesis se pretende hacer un análisis del comportamiento esfuerzo-deformación del suelo expansivo en pruebas realizadas en el oedómetro y establecer relaciones entre los cambios de humedad, cambios de succión y cambios de volumen.

Se han reportado numerosos métodos para el análisis de interacción suelo estructura de cimentación en los cuales, dependiendo de los autores, se utilizan diferentes coeficientes para introducir solicitaciones como sismo, viento, expansión por descarga, recompresión por carga, consolidación, etc.

En un esfuerzo por integrar el fenómeno que representan los suelos expansivos en el análisis y diseño de cimentaciones, se inicia este proyecto con el objetivo de plantear un coeficiente que tome en cuenta las deformaciones del suelo debidas a los cambios de humedad, en el análisis de interacción suelo-estructura de cimentación. Este

coeficiente será determinado en el laboratorio, a partir de pruebas de deformación por hidratación realizadas en el oedómetro. Para el análisis, se utilizará el método de interacción suelo-estructura propuesto por Zeevaert (1980), con la variante del suelo antes mencionado.

1.4 Factores que influyen en la expansión y contracción del suelo.

Los cambios de humedad originan las expansiones y contracciones en un suelo expansivo, éstos pueden ser inducidos por cambios climáticos, por la influencia de la temperatura y la vegetación, por la topografía, el tipo de estructuras, la cimentación y por la infraestructura actual de la zona, o por fugas en tuberías de agua y drenaje que son una fuente de humedad para la masa de suelo; de forma que si la humedad permanece constante, el suelo no presentará cambios volumétricos en su estructura.

Dentro de los factores que influyen en el mecanismo de expansión y contracción del suelo se han considerado:

1.-Las características del suelo como tal; incluyendo las propiedades mineralógicas y químicas del suelo, que determinan la capacidad de contener agua adsorbida en su estructura; así como las propiedades de plasticidad y densidad que son un reflejo de los factores a microescala que afectan su comportamiento.

2.-Las condiciones ambientales que traen como consecuencia un incremento o decremento en la humedad del suelo y por ende una variación en su volumen. Las cuales son correlativas a la variación de la tensión capilar y a los esfuerzos efectivos del suelo.

Así, en tiempo de estiaje los suelos expansivos experimentan una contracción en su estructura y el espaciamiento entre sus partículas es más cerrado. Considerándose a este tipo de suelos de alto potencial expansivo.

El fenómeno de la succión que se presenta en los suelos es causa de aumento en los esfuerzos intergranulares de las partículas; cuando en un suelo como las arcillas se pierde el agua por un proceso de desecación, se genera la tensión capilar, incrementando la succión y provocando la contracción del mismo.

Por el contrario, en época de lluvias, el suelo tiene un incremento en la humedad de su estructura, el espaciamiento entre sus partículas es mayor y se dan incrementos en su volumen. En estas condiciones el potencial de expansión disminuye, baja la capacidad de absorción de agua y disminuye la succión hasta llegar a ser prácticamente nula.

La succión del suelo es un factor importante en el control de las propiedades mecánicas de los suelos parcialmente saturados. Los métodos más recientes y con mayor rango de aproximación en la estimación del potencial y magnitud de la expansión están basados en el parámetro de succión del suelo. Ya que el cambio volumétrico del suelo está relacionado con el cambio de succión del mismo. Este parámetro es una propiedad intrínseca del suelo.(O. Erol; 1992)

3.-El tipo de vegetación del terreno, que da cierta protección a éste para conservar la humedad, y que al modificarla, se ven también afectadas las condiciones del suelo.

4.-La topografía del terreno es un punto importante a considerar en estructuras cimentadas sobre suelos parcialmente saturados con altos contenidos de material montmorilonítico. Es importante proporcionar un buen drenaje al terreno para impedir encharcamientos y acumulaciones de agua que den origen a expansiones volumétricas.

5.-El estado de esfuerzos es un factor decisivo en la expansión o contracción del suelo (asentamiento). La historia geológica de esfuerzos a que el suelo ha estado sometido representa un factor más en la magnitud del cambio de volumen que ocurrirá para una humedad y densidad dados.

El suelo deberá estar en equilibrio con los esfuerzos externos a los que está sometido, de lo contrario se da lugar a una modificación del espaciamiento entre las partículas que lo forman, manifestándose en una contracción o expansión, en busca del equilibrio.

La expansión en cualquier tipo de suelo también puede ser ocasionada por un alivio de esfuerzos como el provocado por una excavación, que en el caso de las arcillas con baja cohesión y alto contenido de humedad, presentan expansiones que deben tomarse en consideración; además de los cambios de humedad que sufre el suelo al estar expuesto al medio ambiente.

Tabla no. 1.1 Factores que afectan el comportamiento de un suelo expansivo.

FACTOR	DESCRIPCIÓN	REFERENCIAS
Mineralogía	Los minerales que típicamente causan cambios en el volumen del suelo son las montmorilonitas y algunas capas de otros minerales mezcladas. Las ilitas y caolinitas no son con frecuencia expansivas, pero pueden causar cambios de volumen cuando el tamaño de las partículas es extremadamente fino (menos que un décimo de micra)	
Química del agua del suelo	La expansión es representada por incrementos en la concentración de catión y un incremento en la valencia del catión.	
Succión del suelo	La succión del suelo es un esfuerzo efectivo variable independiente, representado por la presión de poro negativa en suelos insaturados. La succión está relacionada con la saturación, gravedad, tamaño, y forma de los poros, tensión superficial, y características eléctricas y químicas de las partículas del suelo y el agua.	
Plasticidad	La plasticidad es un indicador del potencial de expansión. En general los suelos que tienen un comportamiento plástico en rangos amplios de humedad, con altos límites líquidos, tienen un gran potencial de expansión y contracción.	
Estructura del suelo	Las arcillas floculadas tienden a ser más expansivas que las arcillas dispersas. Las partículas cementadas reducen la expansión. La estructura es alterada por la compactación con alto contenido de agua o remoldeo. Se ha demostrado que la compactación por amasado crea estructuras dispersas con un potencial de expansión mayor que suelos estáticamente compactados con bajos contenidos de agua.	
Densidad seca	Las densidades altas indican espacios de las partículas más cerrados los cuales pueden significar una gran fuerza de repulsión entre partículas y un mayor potencial de expansión.	
Condición inicial de humedad	Un suelo expansivo desecado tiene gran afinidad por el agua, se encuentra a un alto nivel de succión y es de alto potencial expansivo. Recíprocamente, un suelo húmedo perderá agua más rápidamente si se expone a agentes desecantes y se contrae más que un suelo inicial relativamente seco.	
Variación de humedad	Los cambios de humedad en la zona activa cerca de la parte superficial de un suelo, definen primeramente los levantamientos. Son en estos estratos en los que puede ocurrir una amplia variación en la humedad y el volumen.	Lawrence (1980)
Clima	La cantidad y variación de la precipitación y la evapotranspiración influyen fuertemente la disponibilidad y profundidad de la humedad. Un levantamiento estacional grande ocurre en climas semiáridos que tienen períodos de humedad corto y muy pronunciado.	Holland y Lawrence (1980)
Agua del subsuelo	Un nivel freático somero proporciona una fuente de humedad y los niveles freáticos fluctuantes, contribuyen a la variación de la humedad.	
Drenaje y fuentes de agua hechos por el hombre.	Las características del drenaje superficial, tales como el estancamiento de agua alrededor de la cimentación de una casa con pendiente pobre, proporciona fuentes de agua en la superficie. La fuga de una tubería puede permitir el acceso de agua a grandes profundidades en el subsuelo.	Krazynski (1980); Donaldson (1965)
Vegetación	Los árboles matorrales y pasto desprenden humedad del suelo a través de la transpiración, y causan que el suelo esté húmedo diferencialmente en áreas de vegetación variada.	Buckley (1974)
Permeabilidad	Los suelos con grandes permeabilidades particularmente debido a fisuras y grietas en la masa de suelo del campo, permiten la migración más rápida del agua, promoviendo así más rápidamente la expansión.	Wise y Hudson (1971); De Bruijin (1965)
Temperatura	Los incrementos en temperatura causan la propagación de humedad a áreas más frescas debajo de pavimentos y edificios	Jhonson and Stroman (1976); Hamilton(1969)
Condición de esfuerzos (Historial)	Un suelo preconsolidado es más expansivo que el mismo suelo en la misma relación de vacíos, pero normalmente consolidado. Las presiones de expansión pueden incrementar con la edad de las arcillas expansivas, pero, se ha demostrado que la edad no afecta la cantidad de expansión bajo cargas ligeras. El repetido secado y humedecimiento tiende a reducir la expansión en muestras de laboratorio, pero después de cierto número de ciclos de humedecimiento-secado, la expansión es inafectable.	Mitchell (1976); Kassiff y Baker(1971).
Condiciones in situ	El estado inicial de esfuerzos en un suelo debe ser estimado para evaluar las probables consecuencias de cargar la masa del suelo y/o alterar la condición de humedad y ambiente dentro de ésta. Los esfuerzos efectivos iniciales pueden ser determinados aproximadamente a través del muestreo y prueba en el laboratorio, o por mediciones y observaciones.	
Carga externa	La magnitud de la sobrecarga impuesta determina la cantidad de cambio de volumen que ocurriría para un contenido de humedad y densidad dados. Una carga aplicada externamente actúa para balacear las fuerzas repulsivas de Interpartículas y reduce la expansión	Holtz(1959)

1.4.1 Mineralogía y química del agua.

Cuando las partículas de suelo son pequeñas, los minerales que las componen, influyen en el comportamiento de las propiedades ingenieriles del suelo.

En una partícula pequeña las moléculas que forman su superficie, constituyen un alto porcentaje del número total de las moléculas que forman la partícula, por lo que las fuerzas que actúan en estas tienen un efecto importante en el comportamiento de las partículas y en la masa de suelo. Las partículas minerales pequeñas que presentan plasticidad al agregarles ciertas cantidades de agua, se consideran minerales arcillosos. La arcilla está constituida básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando en algunas ocasiones silicatos de magnesio, hierro y en menor proporción otros metales también hidratados.

Los minerales que forman parte de los suelos arcillosos se clasifican en caolinitas, montmorilonitas e ilitas. Estos minerales se pueden identificar por métodos de difracción de rayos X, microscopio electrónico y el uso de análisis químicos. Debido a que tienen propiedades similares se han clasificado de acuerdo con su estructura en: caolinita, mica (incluye ilitas y vermiculitas) y smectita (incluye las montmorilonitas). De las cuales son las montmorilonitas las que presentan un alto porcentaje expansivo, por el tipo de arreglo, el área específica y la constitución química de esas partículas de arcilla.

Los minerales de arcilla presentan arreglos tridimensionales muy característicos entre sus átomos formando entrelazamientos de cristales. En el caso de las arcillas montmoriloníticas, están formadas por una lámina alumínica entre dos sílicas, cuyos enlaces son débiles, lo que hace posible la penetración del agua hacia su estructura provocando un espaciamiento mayor entre sus partículas, originando incrementos volumétricos.

Las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la firmeza entre las capas ligadas y la capacidad de intercambio catiónico influyen en el potencial de expansión de la arcilla.

Las caolinitas y las ilitas; por el tipo de estructura que presentan y que las hace más impermeables al paso del agua al interior; son más estables.

También es importante considerar la química del agua del suelo con relación a la magnitud de expansión del mismo. Los cationes de sal contenidos en el agua, tales como el sodio, potasio, calcio y magnesio son adsorbidos por las superficies de las partículas de arcilla y funcionan como cationes intercambiables, balanceando las cargas eléctricas de dichas partículas. La hidratación de las partículas y las fuerzas de adsorción desarrolladas por los cristales, pueden causar la acumulación de grandes cantidades de agua entre las partículas de arcilla.

En los suelos con poca humedad, los cationes de sal se mantienen cerca de los cristales de arcilla generándose fuerzas electrostáticas de gran magnitud. Cuando el agua de nuevo entra en contacto con la masa de suelo es adsorbida por los cationes, debilitando las fuerzas de atracción y separándolos de las superficies de las partículas de arcilla.

1.4.2 Plasticidad y densidad.

Para estimar el probable cambio de volumen en suelos expansivos, se consideran de manera determinante a las propiedades ingenieriles a macroescala (plasticidad y densidad del suelo) por la facilidad de medición en el laboratorio. Estas son el reflejo de las propiedades a microescala de la arcilla que son indicadoras del potencial expansivo del suelo.

En Mecánica de Suelos, la Plasticidad puede definirse como la propiedad de un material por medio de la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas sin rebote elástico, variación volumétrica apreciable, desmoronamiento ni agrietamiento.

Los suelos arcillosos son los únicos que cumplen con esta propiedad ya que por ejemplo: el volumen de la arcilla permanece constante durante la deformación mientras que el de la arena varía; además la arena se desmorona en deformación rápida.

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, *la plasticidad no es una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua*. Así, una arcilla muy seca tiene plasticidad nula y esa misma pero con gran contenido de agua presenta un estado parecido a una suspensión líquida; por lo tanto entre ambos extremos existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

La plasticidad es un indicador del potencial de expansión. En general los suelos que tienen un comportamiento plástico en rangos amplios de humedad, con altos límites líquidos, tienen un gran potencial de expansión y contracción.

La densidad en los suelos es otro indicador importante del potencial expansivo, y es susceptible a ser modificada, los resultados obtenidos de la prueba Próctor estándar y modificada son un reflejo de que se puede jugar con la densidad del suelo, según la conveniencia. Al ser incrementada por efecto de compactación los espacios de las partículas se vuelven más cerrados los cuales pueden significar una gran fuerza de repulsión entre partículas y un mayor potencial de expansión.

En suelos expansivos es muy difícil de considerar la densidad, como constante, ya que aún en condiciones in situ presenta grandes fluctuaciones, debido a los cambios de humedad, provocados por el clima, la temperatura, o cualquier otra fuente que modifique la humedad como es el caso de fugas en tuberías de agua y drenaje.

En Ingeniería Civil el análisis de estas propiedades que son indicadoras del potencial de expansión juegan un papel muy importante para el diseño y buen funcionamiento de las estructuras.

1.5 Identificación y clasificación de los suelos expansivos.

Antes de tomar alguna determinación y emitir cualquier recomendación sobre el tipo de cimentación, es necesario, la plena identificación del tipo de material con el que se está tratando.

La identificación de los suelos expansivos comprende dos etapas importantes. La primera es el reconocimiento y la segunda es el muestreo y medición de las propiedades de los materiales que son usadas en la designación de las predicciones.

En el caso de los suelos expansivos, en un terreno que recién ha perdido humedad y no se ha manifestado tránsito sobre éste, se apreciará una serie de grietas como consecuencia de la contracción del suelo. Si se toma un poco de material y se agrega cierta cantidad de agua tendrá una consistencia pegajosa y plástica.

Para la medición de las propiedades de los materiales se pueden emplear varias técnicas que conducen a tal objetivo.

Identificación mineralógica

La composición mineral de los suelos expansivos tiene importante influencia sobre el potencial de expansión, debido a la estructura reticular que está compuesta por las láminas silícicas y alumínicas, según el tipo de arcilla. Las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la firmeza entre las capas ligadas y la capacidad de intercambio catiónico influyen en el potencial de expansión de la arcilla. De esta forma, se supone que identificando los constituyentes mineralógicos de la arcilla se puede estimar el potencial de expansión. Algunas técnicas que pueden utilizarse para la identificación se enumeran a continuación.

La difracción de rayos X, es un método usado con la ayuda de emisión de rayos, que con la difracción de los mismos a través de cristales son similares a la reflexión de la luz, que proporciona la identificación de minerales de arcilla, en magnitudes alrededor de 1 \AA a 10^{-9} mm .

Otros métodos son el análisis térmico diferencial (DTA) y el microscopio electrónico. El DTA consiste en calentar simultáneamente una muestra de arcilla y una sustancia inerte. Los termogramas resultantes son delineadores de la diferencia de temperatura (WT) al aplicar calor, y comparados con minerales puros, cada muestra mineral, manifiesta reacciones endotérmicas y exotérmicas características en los termogramas.

El microscopio electrónico permite distinguir ciertos minerales de forma muy típica, tales como la haloisita (del grupo de las caolinitas y de forma tubular muy notable), pero sus resultados plantean problemas de interpretación en las formas de escama, de las que participan gran número de minerales de arcilla (montmorilonitas e ilitas).

El análisis químico, la espectroscopia infrarroja, el tinte de absorción (Gim, 1968) y la dispersión eléctrica de radio frecuencia (Baso y Arulanandan, 1973), son otros métodos utilizados con los mismos fines.

El método más usado por los resultados que proporciona es el método de Rayos X, pero es recomendable la combinación de varios métodos para obtener resultados realmente confiables.

Métodos indirectos

La clasificación de los suelos consiste, en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico a través de la experiencia. La clasificación de suelos permite resolver muchos tipos de problemas sencillos, y que sirve de guía para preparar el programa de experimentación, si la dificultad y la importancia del problema requiere de una investigación más profunda.

En la práctica ingenieril, la identificación más común usada en los proyectos está basada en los resultados de clasificación estándar, semejante a los análisis de las medidas granulares y límites de Atterberg. Estas pruebas pueden incluirse en la rutina, para la investigación del lugar donde se realizará la obra de que se trate. Las pruebas índice pueden ser:

- a) Límites de Atterberg
- b) Contracción Lineal
- c) Expansión libre y
- d) Contenido de coloides

Holtz y Gibbs (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices de utilidad para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas.

El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una sobrecarga de 1 libra/plg², después de ser compactada a su peso específico máximo en la humedad óptima, de acuerdo a la prueba AASHO. (Seed, Woodward y Lundgren 1962).

Puesto que el límite líquido y la expansión dependen ambas de la cantidad de agua que trata de absorber la arcilla, no es extraño que se intente relacionarlos. La relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad de las arcillas ha sido propuesta como sigue:

Potencial de Expansión.	Índice de Plasticidad.
Bajo	0 – 15
Medio	10 – 35
Alto	20 – 25
Muy Alto	35 o más

La contracción lineal de un suelo es la reducción del volumen del mismo, medida en una de sus dimensiones, expresada como porcentaje de la dimensión original cuando el contenido de agua se reduce desde la del límite líquido hasta la de su reducción final que corresponde al límite de contracción.

En potencial de expansión se supone que está relacionado con la propiedad opuesta de medición de la contracción lineal en una prueba muy simple. Teóricamente parece ser que las características de contracción de la arcilla deben ser índices consistentes y confiables del potencial de expansión.

Altmeyer sugirió (1995) varios valores de límite líquido y contracción lineal, a manera de guía para la determinación del potencial de expansión, sin embargo, las investigaciones recientes son insuficientes y carecen de evidencia concluyente para correlacionar estas dos propiedades.

El tamaño de las partículas de arcilla manifiesta influencia en el potencial de expansión, en especial el contenido coloidal. La cantidad de expansión aumenta con la cantidad de arcilla presente en el suelo.

Método de la Actividad.

Las características de plasticidad y el cambio de volumen que actúan en los suelos están relacionados con la cantidad de partículas coloidales, que controlan las fuerzas en la superficie (Fuerzas electrostáticas y Fuerzas de adsorción).

Los cambios volumétricos pueden ser predichos utilizando el concepto de actividad. El método de la actividad fue propuesto por Seed, Woodward y Lundgren (1962). La actividad se define como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de partículas menores de 2 micras. A través de la siguiente relación, Seed et al, modificaron la definición:

$$Actividad = \frac{Indice \cdot de \cdot Plasticidad}{(\% \text{partículas} < 2 \text{micras}) - 10} \quad (1)$$

Expansión libre

La prueba de expansión libre consiste en colocar un volumen conocido de suelo seco que pasa la malla No. 40, en un cilindro graduado, sumergido en agua y medida la expansión del volumen después de que se ha estabilizado completamente. La expansión libre del suelo es determinada como la relación del cambio de volumen inicial expresada en porcentaje.

Método del PVC (potencial de cambio volumétrico).

Esta técnica fue desarrollada en 1960 por Lambe. Las muestras son primeramente compactadas en un consolidómetro de anillo fijo con una energía específica de 55,000 lb-pie/pie³ (270 ton-m/m³). Después se aplica una presión inicial de 200 lb/plg² (15 kg/cm²), se agrega agua a la muestra, la cual está parcialmente restringida de la expansión vertical por un anillo de carga. La lectura del anillo de carga se toma después de dos horas y se convierte a presión, siendo designada Índice de Expansión. Por medio de una gráfica, el índice de expansión se convierte en potencial de cambio de volumen. En la siguiente tabla se muestra la clasificación de acuerdo con el potencial de cambio volumétrico, establecido por Lambe.

Rangos de PVC	Peligro de Expansión
Menos de 2	No crítico
2 – 4	Marginal
4 – 6	Crítico
Mayor de 6	Muy crítico

CAPITULO 2

2 Caracterización del sitio de construcción.

Para el diseño y construcción de cualquier proyecto es fundamental la plena identificación y determinación de las características del lugar.

Para identificar las características del sitio de construcción es conveniente hacer un reconocimiento personal y una recopilación de todo tipo de información verbal y/o escrita de las diferentes fuentes disponibles; por ejemplo a partir de entrevistas con ingenieros y arquitectos de la localidad, información cartográfica de organismos gubernamentales especializados, información de estudios y excavaciones anteriores, etc; que den la pauta para saber ¿Con qué tipo de suelo se está tratando?

Particularmente en el caso de suelos problemáticos como las arcillas expansivas deben hacerse algunas observaciones y elaborar cuestionamientos que proporcionen una visión más clara del problema en específico. ¿Qué tipo de infraestructura y construcciones existen?, ¿Cuál ha sido el comportamiento cualitativo de las construcciones existentes? y ¿Qué factores pueden provocar cambios de humedad en el suelo a corto o largo plazo?.

2.1 Condiciones ambientales.

Los daños producidos por el fenómeno de las arcillas expansivas son muy diversos, afectando la funcionalidad y estética de las estructuras, llegando en algunos casos a situaciones de ruina. La intensidad del fenómeno está íntimamente ligado a las condiciones ambientales de la zona, el clima, por ejemplo cuando éste es seco, la evaporación supera la precipitación, y el terreno se encuentra profundamente desecado. Al construir una edificación, se impide la evaporación y se induce un aumento de humedad bajo la estructura, siendo mayor en el centro que en los bordes, tardando varios años en manifestarse el problema.

En climas húmedos, se produce en la superficie descubierta un movimiento estacional, que se amortigua de manera diferencial por el edificio. El centro del edificio tiende al equilibrio, pero los bordes y las esquinas continúan subiendo y bajando, coincidiendo con los cambios estacionales. Estos movimientos cíclicos pueden producir fracturas a la estructura. Sin embargo el levantamiento de las estructuras no puede apegarse a estos modelos estrictamente, ya que el clima tiene fuertes variaciones.

Las consecuencias perjudiciales por la expansión se agudizan en lugares áridos y semiáridos, debido a que la humedad del suelo más superficial es generalmente baja a causa de la evaporación, como es el caso del Valle de Querétaro.

Las circunstancias descritas suelen manifestarse con mayor gravedad en estructuras ligeras, sensibles a movimientos diferenciales, y sobre todo cuando el fenómeno no ha sido previsto ni estructural ni geotécnicamente.

El fenómeno se origina cuando las condiciones ambientales inducen cambios apreciables de humedad en un suelo arcilloso.

2.2 Estado de esfuerzos.

La historia del estado de esfuerzos a los que ha estado sujeto el suelo es un factor determinante en la expansión del mismo, ya que dependiendo del grado de consolidación del suelo, implícita la densidad del mismo; será la inestabilidad volumétrica de éste.

El suelo deberá estar en equilibrio con los esfuerzos externos a los que está sometido, de lo contrario se da lugar a una modificación del espaciamiento entre las partículas que lo forman, manifestándose en una contracción o expansión, en busca del equilibrio.

Los suelos expansivos generalmente no tienen problemas de capacidad de carga, por lo que este tipo de problemas quedan descartados. Sin embargo los problemas que se tienen son los levantamientos de las estructuras, consecuencia de la falta de equilibrio de los esfuerzos internos que desarrolla el suelo con los esfuerzos a los que es sometido, es decir a la carga transmitida por la estructura. Es por tal motivo que las estructuras ligeras son las más afectadas por este tipo de problemas.

2.3 Zona activa.

Los problemas de suelos expansivos se producen generalmente como resultado de las fluctuaciones volumétricas, que se presentan en un espesor de pocos metros como resultado de variaciones en el contenido de agua, el cual se ve influenciado por factores como las condiciones climáticas del medio ambiente. Es conveniente señalar que en un depósito arcilloso no todo su espesor es expansivo, es decir, los cambios de humedad no afectan a toda la capa arcillosa. Esta zona es generalmente definida como: Zona de fluctuación estacional ó Zona activa y no tiene el mismo espesor en un terreno desnudo que en uno cubierto por alguna construcción.

La humedad del suelo descubierto varía entre amplios límites, pero si se determina a diferentes profundidades se tienen distribuciones como las de la fig. 2.3.1

La variación es máxima en la superficie, pero se amortigua con la profundidad, y hay un punto en el cual el flujo estacional ya no llega.

Por tanto, existe una profundidad definida de la capa activa, por debajo de la cual el suelo permanece estable.

No debe omitirse señalar que los cambios de humedad en el suelo pueden tener diversos orígenes no sólo por variaciones climáticas, sino también por ejemplo: las

oscilaciones del nivel de aguas freáticas, fugas en instalaciones hidráulicas y drenajes; causas que no necesariamente son independientes.

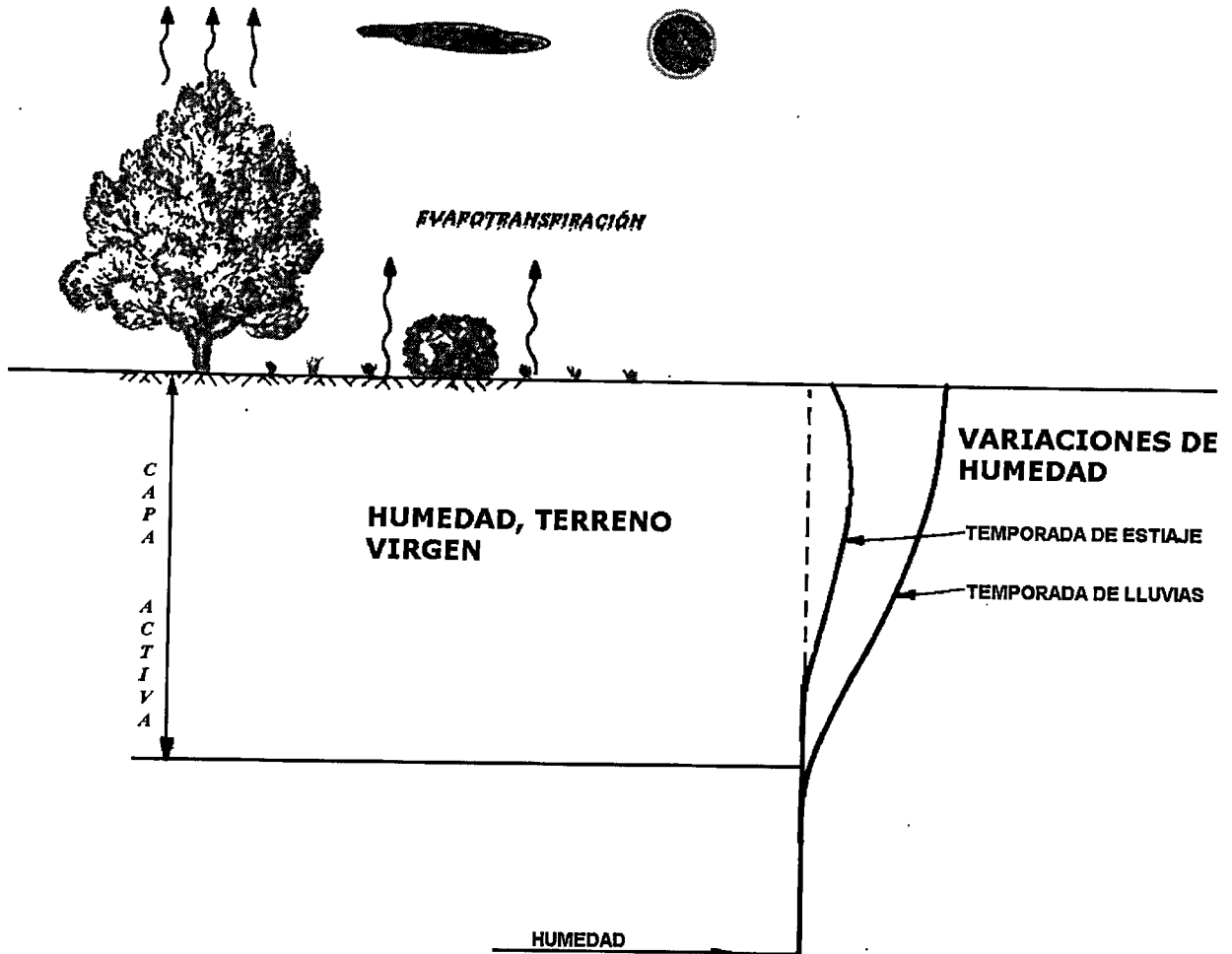


Fig. 2.3.1 Perfiles de humedad que definen el espesor activo del terreno virgen.

2.4 Exploración y muestreo.

Los trabajos de campo son una parte importante y fundamental de un estudio de Mecánica de Suelos, ya que es en este período donde se identifican los diferentes factores que pueden contribuir al cambio de humedad del suelo arcilloso generando posibles daños a la estructura. Es necesario identificar y definir plenamente la topografía de la zona en estudio, ya que las pendientes del terreno y de los terrenos vecinos pueden influir en la acumulación del agua de lluvia, provocando cambios volumétricos del suelo.

Ante el problema latente de pendientes que propicien la acumulación del agua de lluvia es recomendable tomar la decisión de modificarlas evitando así la acumulación de agua y por ende la expansividad del suelo.

Es importante observar las condiciones en que se encuentra el suelo, en estado húmedo, muy húmedo o bien desecado, y si es el caso, se pueden medir las profundidades de grietas existentes (fig. 2.4.1).

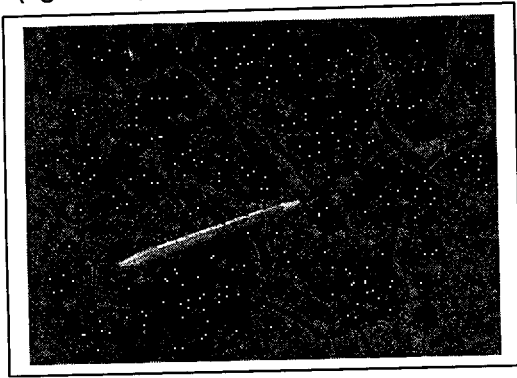


Fig. 2.4.1 Agrietamiento en suelo expansivo, fraccionamiento Jurica

Después de haber identificado las características físicas superficiales del terreno, será conveniente hacer los diferentes sondeos con pozos a cielo abierto si es el caso, los cuales deberán estar distribuidos estratégicamente para que la información obtenida de éstos sea realmente representativa.

Simultáneamente a los sondeos hay que proceder a la recolección de muestras, para la determinación de las diferentes propiedades mecánicas del suelo. Así la precisión de los resultados obtenidos dependerán en gran medida de los cuidados y precauciones tomadas durante el muestreo, tanto de muestras inalteradas como en la obtención de muestras alteradas para determinar los límites de consistencia así como la humedad del suelo.

En este caso en particular se obtuvieron muestras inalteradas y alteradas de pozos a cielo abierto en un predio ubicado en Jurica, Qro. La profundidad máxima alcanzada fue de 2.00 metros. El muestreo inalterado en los pozos fue a cada 0.40 metros de profundidad, a partir del 1er metro, para luego, hacer las pruebas correspondientes de incrementos de humedad bajo carga y medir, inmediatamente la succión a través del método del papel filtro, antes y después de incrementar la humedad. Las pruebas de expansión a diferentes humedades se desarrollaron en un aparato oedométrico estándar.

La recolección de muestras alteradas en los pozos a cielo abierto se hicieron a cada 0.20 metros. Las muestras fueron selladas herméticamente para evitar pérdidas de humedad. Su humedad fue determinada inmediatamente.

2.5 Ensayes de laboratorio.

Es conocido que si disminuye la humedad, disminuye el volumen del suelo y aumenta la succión; del mismo modo, si aumenta la humedad, aumenta el volumen y disminuye la succión.

La intención de los ensayos realizados en el laboratorio es conocer cuantitativamente, para los suelos del Valle de Querétaro; la relación que guarda el cambio volumétrico con otras propiedades tales como la succión, la humedad y la presión de expansión principalmente.

2.5.1 Pruebas de succión

A la presión del agua del suelo, inferior a la atmosférica, se le denomina *succión*, la cual es la suma de la contribución de la succión mátrica y la osmótica principalmente. La succión mátrica, Ψ_m , es el resultado de las fuerzas capilares y la adsorción debida a la matriz del suelo, la cual es muy importante en suelos arcillosos. La succión osmótica, Ψ_o , es el efecto que produce la presencia de sales en el agua del suelo, que disminuye su energía potencial. Esto no afecta en forma significativa al comportamiento mecánico del suelo, pero si influye en el proceso que involucra la difusión del vapor. Siempre que un suelo se encuentre en condiciones de parcial saturación, podemos estar seguros de que el agua que contenga estará a presión menor que la atmosférica.

La succión en el suelo puede ser medida tanto por métodos directos como indirectos. En este caso se utilizó el método del papel filtro (fig. 2.5.1.1), que es un método indirecto muy simple para medir la succión del suelo (Lytton, 1988 a). El tipo de papel utilizado, que es disponible comercialmente fue el Schleicher & Schuell 589 White Ribbon calibrado por Mckeen, en discos de 5.5 cm. El papel debe tratarse con una solución de pentaclorofenol en etanol, permitiendo su secado al aire posteriormente, para inhibir la descomposición biológica. Se ha demostrado que una solución del 2% protege lo suficiente los discos por dos o tres semanas. Un 3% garantiza la protección y permite procesar tiempo después.



Fig. 2.5.1.1 Prueba de succión con papel filtro

Procedimiento de prueba

Está prueba debe realizarse con cuidados extremos; es necesario la utilización de guantes para evitar el contacto directo de las manos, ya sea con la muestra misma o con los recipientes utilizados, debido al grado de precisión de la prueba; ya que el peso por la grasa natural de la piel afectaría los resultados.

Primeramente se labra un espécimen cúbico de 3 cm de lado aproximadamente, el cual se coloca en un recipiente de vidrio, previamente identificado y pesado. Una vez colocada la muestra en el frasco se toma el peso y se colocan sobre ésta dos discos de papel filtro, utilizando pinzas, uno por uno previamente identificados y pesados, sin tocar las paredes del recipiente.

En suelos parcialmente saturados uno de los discos estará en contacto directo con el suelo. Sin embargo en suelos con altos grados de saturación no deben estar en contacto directo con la muestra, pues el agua que pase del suelo al papel debe hacerlo como vapor, de lo contrario no podrá medirse el potencial osmótico y la succión determinada no corresponderá a la succión total del suelo.

Después de colocar los discos de papel filtro, se sella herméticamente el recipiente, se pesa y a temperatura constante se dejan transcurrir siete días (mínimo son cinco días), que es el tiempo necesario para que la humedad en los poros del suelo se equilibre con la de los poros del papel filtro.

Pasados los siete días promedio se pesa nuevamente el recipiente sellado para verificar cualquier variación en el peso, lo que indicará que hubo algún error por fuga de vapor, si no es así se continua la prueba.

Luego se abre el recipiente y rápidamente con ayuda de las pinzas se pesan los discos de papel filtro y la muestra, de tal forma que se tengan los pesos húmedos de cada uno de éstos. Con el fin de determinar la humedad correspondiente, los discos y la muestra se someten respectivamente a temperaturas entre 105°C y 110°C, para determinar los pesos secos. Una vez calculada la humedad del suelo y del papel filtro se encuentra la succión mediante la ecuación:

$$\Psi = m \omega + b$$

donde:

Ψ = succión en pF.

m = pendiente de la curva de calibración.

b = punto donde la curva de calibración intercepta al eje de las ordenadas.

Se colocó una sobrecarga – que para fines del experimento fue la carga aproximada debida al peso propio del suelo in situ- y se hizo el registro de las deformaciones.

Se determinaron las humedades iniciales de las muestras. Posteriormente, cierta cantidad de agua fue agregada para incrementar la humedad del suelo y provocar un incremento de volumen.

Con el fin de evitar en lo posible las pérdidas de agua por contacto con la cazuela del oedómetro o en la piedra porosa, ésta fue adicionada por la parte superior de la muestra simulando el efecto de las precipitaciones sobre el suelo.

Para montar la pastilla de suelo en el oedómetro, se siguió el mismo procedimiento de una prueba de consolidación, con la diferencia de que no se colocó piedra porosa en la parte superior, en este caso se utilizó una placa perforada para la distribución de la presión, de tal forma que permitió además la saturación superior de la muestra sin tener pérdidas mayores de agua agregada.

Es conveniente tapar la cazuela sin afectar las lecturas en el micrómetro, para reducir en lo posible el efecto de la evaporación en la muestra. En este caso se utilizó una película de plástico adherible (fig. 2.5.2.1.1).

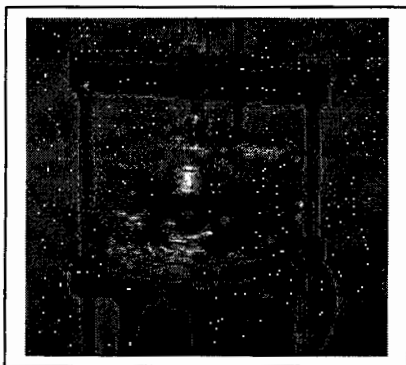


Fig. 2.5.2.1.1 Uso de película de plástico para pruebas en el oedómetro.

Durante el proceso de expansión por incremento de humedad se toman lecturas en el micrómetro a diferentes tiempos para determinar la curva de expansión (unidimensional vertical) correspondiente al incremento en la cantidad de agua. En este caso se obtuvieron varias curvas de expansión para diferentes cambios de humedad y con ello obtener una relación entre cambios de volumen vs cambios de humedad, hasta llegar a la saturación del suelo.

Para encontrar la presión de expansión se colocaron las muestras inalteradas en oedómetro y se incremento la humedad siguiendo el procedimiento descrito, de tal forma que se registró el cambio de volumen. Una vez estabilizada la expansión en su valor máximo, el esfuerzo vertical por carga fue aumentado hasta devolver al suelo a su volumen inicial.

La presión requerida para lograrlo se denomina la presión de expansión. Al final de la prueba, se determinaron la humedad y el estado de succión final del suelo, con el método del papel filtro.

Este procedimiento se puede considerar como complemento y como contraparte del criterio de Chen (1975), que considera la presión de expansión independiente del grado de saturación inicial, además que se desconoce el estado de succión original. Con el resultado de estas pruebas se espera corroborar que la presión de expansión no es independiente ni de la humedad ni del grado de saturación iniciales que tiene el suelo como lo asume Chen.

CAPITULO 3

3 Comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos expansivos.

3.1 Generalidades del comportamiento esfuerzo-deformación de suelos arcillosos.

Cuando se ven modificados los esfuerzos efectivos a los que está sometido el suelo, éste en busca del equilibrio experimenta una deformación en su estructura, que bien puede ser expansión o contracción. Así cuando se reducen los esfuerzos actuantes en el suelo éste se expande. Un alivio de esfuerzos en el suelo puede ser originado a causa de una excavación y esto a su vez, provoca una expansión. En el caso de los suelos expansivos, un alivio en las fuerzas de atracción entre las partículas de suelo; originado por la adición de moléculas de agua; provoca una expansión del mismo tipo.

El estado de esfuerzos en el suelo depende de la succión, y al ser ésta considerada como un esfuerzo en el suelo; el alivio de esfuerzos ocurre por disminución en la succión al agregar agua al suelo.

Para estimar los desplazamientos verticales y horizontales en la masa de suelo cuando éste se somete a un incremento o decremento de esfuerzos; es necesario determinar las propiedades esfuerzo – deformación del suelo.

Los esfuerzos en la masa de suelo producto de la carga transmitida por la cimentación de la estructura pueden provocar desplazamientos totales diferenciales que pueden resultar perjudiciales para la estructura.

Las deformaciones de la estructura deberán ser iguales a las originadas en la superficie de contacto entre la cimentación y el suelo. Los esfuerzos y deformaciones en la superficie de contacto dependerán de la rigidez de la estructura de cimentación, de la deformabilidad del subsuelo y de la distribución de cargas que se apliquen sobre la cimentación.

La interacción entre la estructura de cimentación y el suelo (ISE) consiste en encontrar un sistema de reacciones que aplicadas simultáneamente a la estructura de cimentación y a la masa de suelo produzcan la misma configuración de desplazamientos entre los dos elementos; donde será necesario considerar a la masa de suelo como un medio continuo, así la acción en un punto i de la masa de suelo ejerce su influencia en otro punto j de ella como se muestra en la fig. 3.1.1

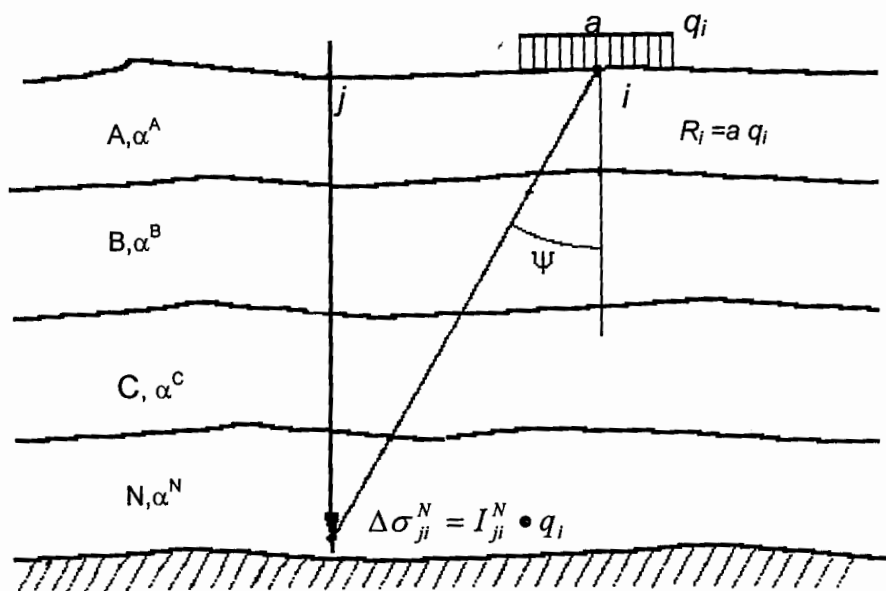


Fig. 3.1.1 Esfuerzo vertical en un punto

Para el cálculo de esfuerzos desde el punto de vista de ingeniería práctica de cimentaciones, en la mayoría de los casos es suficiente estimar el nivel de esfuerzos y los cambios probables de éstos para elegir las propiedades mecánicas a usar en ISE (Zeevaert, 1980)

En lo que respecta al suelo y principalmente a suelos finos y suelos saturados donde se presentan propiedades dependientes del tiempo podrá decirse que los esfuerzos de contacto también varían en función del tiempo haciendo cambiar los elementos de estabilidad de la estructura de cimentación. Por tal motivo es necesario conocer como mínimo las propiedades esfuerzo – deformación - tiempo para cada uno de los estratos que forman el subsuelo y hasta una profundidad en que su influencia sea mínima.

Los desplazamientos verticales se determinan estimando el cambio de esfuerzos por medio de soluciones aproximadas de la *Teoría de Elasticidad* (Zeevaert, 1973):

Los parámetros que definen la deformabilidad del suelo representativos de los estratos deberán de determinarse para el nivel medio de esfuerzos efectivos considerando en cada caso el tipo de esfuerzo aplicado , a saber: estático, o transitorio.

Llamando α^N a la deformación volumétrica de un estrato N , para un tiempo determinado t , y $\Delta \sigma_{ji}^N$ al incremento medio de esfuerzo en un punto j para el mismo estrato N debido a la carga aplicada en un área tributaria a_i . La deformación del estrato N en este punto es:

$$\Delta \delta_{ji}^N = \alpha^N \cdot \Delta \sigma_{ji}^N \quad (3.1.1)$$

El desplazamiento vertical de la superficie en el punto j será la suma de las deformaciones de todos los estratos

$$\delta_{ji} = \sum_A^N \alpha^N \cdot \Delta\sigma_{ji}^N \quad (3.1.2)$$

El valor de $\Delta\sigma_{ji}^N$ en cualquier punto de la masa del suelo se puede expresar en función de la carga unitaria superficial q_i aplicada en un área tributaria a_i

$$\Delta\sigma_{ji}^N = I_{ji}^N \cdot q_i \quad (3.1.3)$$

En la figura anterior, N indica el estrato a tratar. El punto i se encuentra localizado al centro del área tributaria a_i donde se encuentra aplicada la carga q_i , y j el punto donde se calculan los efectos resultantes. Por tanto al sustituir (3.1.3) en (3.1.2) se tiene.

$$\delta_{ji} = \sum_A^N \alpha^N I_{ji}^N \cdot q_i$$

Si consideramos que sobre el área tributaria a_i actúa una carga unitaria $q_i = +1$ se puede obtener el desplazamiento unitario vertical en el punto j inducido por la carga unitaria en el punto i y se tiene:

$$\bar{\delta}_{ji} = \sum_A^N \alpha^N \cdot I_{ji}^N \quad (3.1.4)$$

Para conocer los desplazamientos en la superficie debido a la carga unitaria aplicada $q_i = +1$; se pueden seccionar los estratos de suelo de tal modo que en cada sección se considere una misma influencia I_{ji} de esfuerzo unitario para dicha sección en particular tal como se muestra en la fig. 3.1.2

	(+1)	2	3	4	i	
A	I_{11}^A	I_{21}^A	I_{31}^A	I_{41}^A	I_{i1}^A	α^A
B	I_{11}^B	I_{21}^B	I_{31}^B	I_{41}^B	I_{i1}^B	α^B
C	I_{11}^C	I_{21}^C	I_{31}^C	I_{41}^C	I_{i1}^C	α^C

Fig. 3.1.2 Factores de influencia para carga unitaria. (Zeevaert, 1973)

De esta manera se tiene la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta}_{11} \\ \overline{\delta}_{21} \\ \overline{\delta}_{31} \\ \overline{\delta}_{41} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{11}^A & I_{21}^A & I_{31}^A & I_{41}^A \\ I_{11}^B & I_{21}^B & I_{31}^B & I_{41}^B \\ I_{11}^C & I_{21}^C & I_{31}^C & I_{41}^C \end{bmatrix}^T \bullet \begin{bmatrix} \alpha^A \\ \alpha^B \\ \alpha^C \end{bmatrix}$$

Que puede expresarse como

$$|\overline{\delta}_{ji}| = [I_{ji}^N]^T \bullet |\alpha^N| \quad (3.1.5)$$

Al sustituir la ecuación (3.1.5) se forma la matriz general para todos los puntos deseados

$$[\overline{\delta}_{ji}] = \begin{bmatrix} |\delta_{j1}|^T \\ |\delta_{j2}|^T \\ |\delta_{j3}|^T \\ |\delta_{j4}|^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\delta}_{11} & \overline{\delta}_{21} & \overline{\delta}_{31} & \overline{\delta}_{41} \\ \overline{\delta}_{12} & \overline{\delta}_{22} & \overline{\delta}_{32} & \overline{\delta}_{42} \\ \overline{\delta}_{13} & \overline{\delta}_{23} & \overline{\delta}_{33} & \overline{\delta}_{43} \\ \overline{\delta}_{14} & \overline{\delta}_{24} & \overline{\delta}_{34} & \overline{\delta}_{44} \end{bmatrix} \quad (3.1.6)$$

La ecuación matricial 3.1.6 transpuesta y multiplicada por la matriz columnar de las cargas unitarias, proporciona los desplazamientos verticales de la superficie cargada. Y se obtiene finalmente la ecuación matricial de asentamientos (EMA):

$$|\delta_i| = [\overline{\delta}_{ji}]^T \bullet |q_i| \quad (3.1.7)$$

o bien

$$|\delta_i| = [\overline{\delta}_{ji}]^T \bullet \left| \frac{X_i}{a} \right| \quad (3.1.8)$$

Si las áreas tributarias se escogen iguales se obtendrá una matriz simétrica de desplazamientos unitarios, donde $\overline{\delta}_{ij} = \overline{\delta}_{ji}$.

La ecuación matricial de interacción EMI se construye, primero, suponiendo una viga de ancho unitario y longitud L apoyada en forma continua sobre el suelo y solicitada por cargas concentradas P y cargas distribuidas w . La viga se divide en n segmentos iguales λ que representan áreas tributarias iguales ($1 \cdot \lambda$) donde quedan aplicadas las reacciones medias $R_a, X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, R_b$ al centro de estas áreas tributarias \bar{a} .

La viga en estas condiciones es hiperestática; sin embargo si se hacen las reacciones $X_i = 0$ se obtendrá una viga estáticamente determinada; para la cual se pueden determinar los desplazamientos verticales, ocasionados por las cargas aplicadas, en los puntos $1, \dots, i, 3, \dots, n$ tal y como se analiza el ejemplo del capítulo 5. Por tanto el desplazamiento total Δ_{i0} en un punto cualquiera i de la viga debido a la condición $X_i = 0$ es el resultado de los desplazamientos por flexión en la viga de cada una de las fuerzas actuantes así como por desplazamientos verticales de los apoyos, que son función del módulo de cimentación.

La solución de las reacciones incógnitas; X_1, X_2, \dots, X_i , se determina estudiando el efecto que cada una de ellas produce sobre la viga y el suelo. Considerando una condición de carga unitaria $X_i = +1$ en cualquier punto i . Así los desplazamientos totales de la viga y el suelo para esta condición son: para el punto i , \bar{S}_{ii} ; y para el punto j , \bar{S}_{ji} .

Estos desplazamientos multiplicados por sus respectivas reacciones incógnitas X_1, X_2, \dots, X_i , nos darán los efectos en el punto j por las reacciones aplicadas en un punto i . De donde sumando estos valores se obtienen los desplazamientos verticales totales del punto considerado; los que deberán ser iguales al del mismo punto de la viga en la condición $X_i = 0$. La compatibilidad de desplazamientos verticales entre el suelo y la estructura se obtiene estableciendo las siguientes ecuaciones de condición:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11}X_1 + \bar{S}_{12}X_2 + \bar{S}_{13}X_3 + \bar{S}_{14}X_4 &= \Delta_{10} \\ \bar{S}_{i1}X_1 + \bar{S}_{i2}X_2 + \bar{S}_{i3}X_3 + \bar{S}_{i4}X_4 &= \Delta_{i0} \end{aligned}$$

La solución de este sistema de ecuaciones proporcionará los valores incógnitos X_i . Por el teorema de Maxwell $\bar{S}_{ji} = \bar{S}_{ij}$; de donde se concluye que la matriz de los coeficientes de los desplazamientos unitarios es simétrica. Generalizando puede escribirse en forma matricial; la cual se llamará EMI, *ecuación matricial de interacción*.

$$[\bar{S}_{ji}] \bullet |X_i| = |\Delta_{i0}| \quad (3.1.9)$$

3.2 Deformación volumétrica del suelo por alivio de esfuerzos. (Zeevaert, 1973)

Cuando la masa de suelo experimenta una reducción en los esfuerzos efectivos σ_{0i} , a los que está sometido, ya sea por haber retirado una estructura construida sobre éste, o por que se efectuó alguna excavación. Los estratos de suelo experimentan una

deformación volumétrica (α) que se traduce en una expansión, siendo máxima al centro del área que se encontraba cargada. Nótese que para un estrato cercano implica una deformación unitaria por expansión.

Si el alivio de esfuerzos es parcial, $(\sigma_{oi} - \sigma_i)$, a una profundidad Z_i , la expansión unitaria a esa profundidad se considera $\Delta\varepsilon_i$ sobre la línea vertical del comportamiento de expansión fig.3.2.1

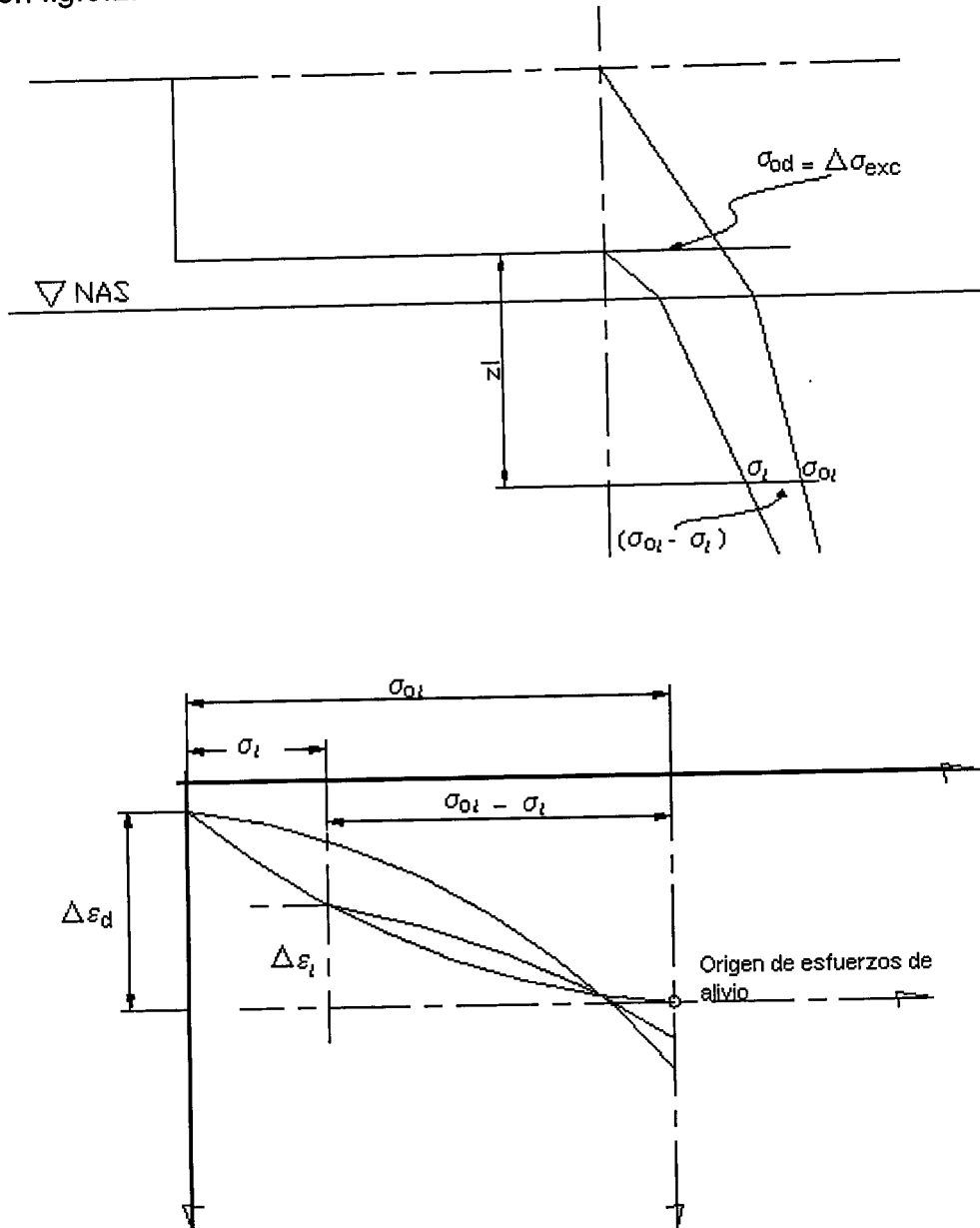


Fig. 3.2.1 Ciclo de histéresis

Zeevaert (1973), encontró de investigaciones realizadas en probetas de suelo inalterado que la ley fenomenológica que rige el fenómeno expansión por descargas se puede expresar por:

$$\Delta \epsilon_i = a(\sigma_{0i} - \sigma_i)^c \quad (3.2.1)$$

donde los parámetros a y c pueden determinarse en el laboratorio.

De pruebas en probetas no confinadas de suelo arcilloso, por medio de un ciclo de histéresis, a un nivel de esfuerzos $\sigma_i \leq 1/4 q_u$ compatible con los factores de seguridad que se emplean en el diseño de cimentaciones, y para el cual el rango de esfuerzos aplicados produce efectos visco-plásticos pequeños, el valor del módulo secante de deformación unitaria por expansión que corresponde a la respuesta elástica máxima se define:

$$M_{eo} = \frac{\Delta \epsilon_0}{\Delta \sigma_{0i}} \quad (3.2.2)$$

El valor de c se obtiene de la curva de expansión, es la pendiente de la recta que resulta si ésta se dibuja en escalas logarítmicas; tal y como lo expresa Zeevaert.

$$c = \frac{\log \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}}{\log \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1}}} \quad (3.2.3)$$

Para un alivio total de esfuerzos $\Delta \sigma_0$ se obtiene

$$\Delta \epsilon_0 = a(\Delta \sigma_0)^c$$

el módulo secante M_{eo} será

$$M_{eo} = a(\Delta \sigma_0)^{c-1} \quad (3.2.4)$$

El módulo secante para un alivio parcial de esfuerzos

$$M_{ei} = \frac{\Delta \epsilon_i}{\Delta \sigma_i} = a(\Delta \sigma_i)^{c-1} \quad (3.2.5)$$

de donde la relación de módulos de deformación unitaria se define

$$\frac{M_{ei}}{M_{eo}} = \left(\frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_0} \right)^{c-1} \quad (3.2.6)$$

Lo anterior se conoce como factor de expansión

$$\rho_{ei} = \left(\frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_0} \right)^{c-1} \quad (3.2.7)$$

ρ_{ei} puede expresarse

$$\rho_{ei} = \left(\frac{\sigma_{0i} - \sigma_i}{\sigma_{0i}} \right)^{c-1} \quad (3.2.8)$$

Así también de las pruebas se conoce el valor M_{eo} de la respuesta elástica máxima, por consiguiente el módulo de deformación unitaria de la respuesta elástica para descarga parcial a la profundidad investigada será

$$M_{ei} = \rho_{ei} (M_{eo}) \quad (3.2.9)$$

Una vez conocidos estos valores para cada estrato de espesor d_i se puede calcular la expansión volumétrica del estrato.

$$\alpha_{ei} = M_{ei} * d_i \quad (3.2.10)$$

El cual multiplicado por el alivio de esfuerzos ($\sigma_{0i} - \sigma_i$) a esa profundidad dará la expansión del estrato.

$$\Delta\delta_{ei} = \alpha_{ei} (\sigma_{0i} - \sigma_i) \quad (3.2.11)$$

3.3 Deformación volumétrica del suelo por incremento de humedad.

Cuando por las diferentes causas ya mencionadas, el suelo experimenta un incremento en su humedad se origina una expansión (fig.3.3.1) y se induce una modificación de esfuerzos efectivos σ_{oi} existentes en la masa de suelo.

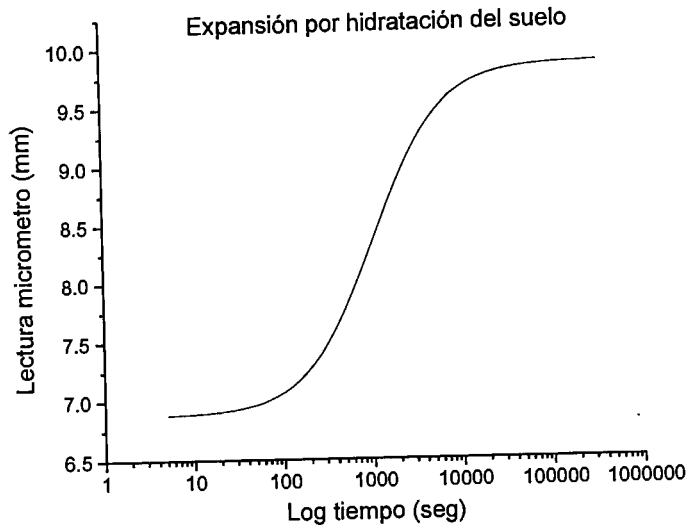


Fig.3.3.1 Curva de expansión para un solo incremento de humedad

Durante el proceso de hidratación el suelo desarrolla una presión de expansión que se mide en el laboratorio como la presión necesaria para retornar el suelo a su volumen inicial después de la expansión por adición de agua; así al graficar la deformación unitaria del suelo vs la presión de expansión se obtiene la fig. 3.3.2

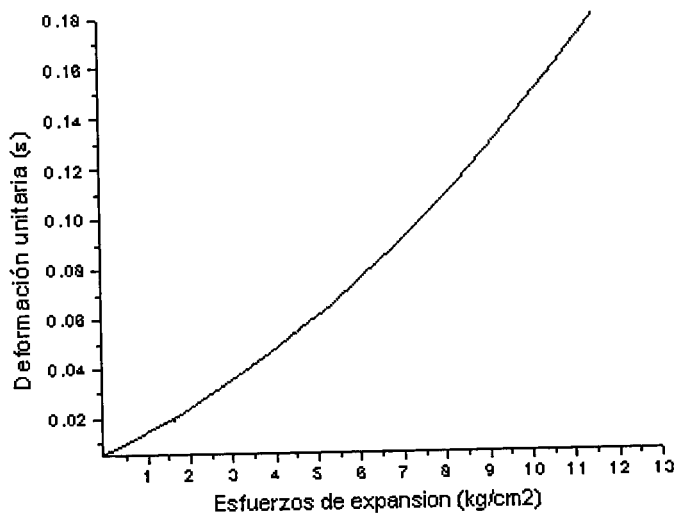


Fig.3.3.2 Curva de esfuerzos de expansión

La curva de esfuerzos de expansión fig.3.3.2, es análoga a la curva de alivio de esfuerzos en la gráfica $\Delta\varepsilon$ vs σ propuesta por Zeevaert (1973). La fig. 3.3.2 puede construirse con las deformaciones unitarias de los ensayos de expansión vs el correspondiente valor de la presión de expansión.

El alivio de esfuerzos por cambios de humedad es máximo σ_0 cuando el suelo pasa de un estado relativamente seco a un estado totalmente saturado. Para un estrato cercano a la fuente de humedad implica una deformación unitaria; entonces el suelo está en condiciones parcialmente saturadas y la expansión es parcial, es decir el suelo aun tiene potencial expansivo y el cambio en sus esfuerzos efectivos es parcial, $(\sigma_{oi} - \sigma_i)_h$, a una profundidad z_i , la expansión unitaria a esa profundidad será únicamente $\Delta\varepsilon_{hi}$. fig. 3.3.3

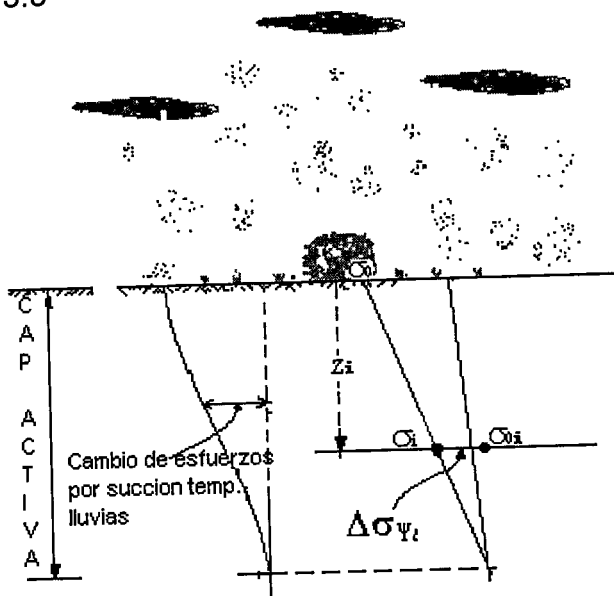


Fig. 3.3.3 Distribución de esfuerzos

Como ya se dijo, Zeevaert (1973), propuso, la ley fenomenológica que rige el fenómeno expansión por descargas:

$$\Delta\varepsilon_i = a(\sigma_{oi} - \sigma_i)^c$$

donde los parámetros a y c pueden determinarse en el laboratorio. El valor de c corresponde a la pendiente de la curva de expansión (tramo de descompresión).

El parámetro a es una constante de proporcionalidad diferente en magnitud a la propuesta por Zeevaert, pero con una función idéntica. a influye directamente en el cambio de esfuerzos por succión, sea ésta parcial o total, pero al hacer la relación de módulos, a desaparece.

Entonces en la ecuación:

$$\Delta\varepsilon_{hi} = a(\sigma_{oi} - \sigma_i)_h^c \tag{3.3.1}$$

donde

$\Delta\varepsilon_{hi}$ = Deformación unitaria por hidratación del suelo $\Delta\sigma_{\psi i}$
 $(\sigma_{oi} - \sigma_i)_h$ = Alivio de esfuerzos efectivos debido al cambio en la succión del suelo

Suponiendo que la relación entre los cambios de esfuerzo por succión y las deformaciones correspondientes sea lineal. Es módulo secante máximo de deformación unitaria por expansión, debido a cambios de humedad se define

$$M_{ho} = \frac{\Delta\varepsilon_{ho}}{\Delta\sigma_{ho}} \quad (3.3.2)$$

Para un cambio total de esfuerzos debidos a cambios en la succión

$$\Delta\varepsilon_{ho} = a(\Delta\sigma_{\psi o})^c$$

sustituyendo en la ec.(3.3.2) el módulo secante M_{ho} será

$$M_{ho} = a(\Delta\sigma_{\psi o})^{c-1} \quad (3.3.4)$$

Del mismo modo para un alivio parcial de esfuerzos se tiene

$$M_{hi} = a(\Delta\sigma_{\psi i})^{c-1} \quad (3.3.5)$$

Y haciendo una relación de módulos, se tiene que

$$\frac{M_{hi}}{M_{ho}} = \left(\frac{\Delta\sigma_{\psi i}}{\Delta\sigma_{\psi o}} \right)^{c-1} \quad (3.3.6)$$

De esta manera el factor de expansión por cambios de succión será

$$\rho_h = \frac{M_{hi}}{M_{ho}} = \left(\frac{\Delta\sigma_{\psi i}}{\Delta\sigma_{\psi o}} \right)^{c-1} \quad (3.3.7)$$

Considerando que los esfuerzos son proporcionales a las succiones, esto es, que exista una relación lineal entre el esfuerzo y la succión (Pérez, 1993)

Entonces se tiene que

$$\frac{\Delta\sigma_{\Psi_i}}{\Delta\sigma_{\Psi_0}} = \frac{\Delta\Psi_i}{\Delta\Psi_0} \quad (3.3.8)$$

Por tanto se pueden sustituir los esfuerzos por las succiones en la ec (3.3.7), donde el factor de expansión quedaría expresado entonces como

$$\rho_h = \left(\frac{\Delta\Psi_i}{\Delta\Psi_0} \right)^{c-1} \quad (3.3.9)$$

La deformación volumétrica α puede ser inducida por dos tipos de esfuerzo, uno, $\Delta\sigma_{\Psi}$ debido a cambios de succión por incrementos en la humedad del suelo, generando un alivio de esfuerzos efectivos que se traduce en una expansión; y otro ocasionado por incrementos de carga externa Δq , transmitida a la masa de suelo a través de la cimentación.

Es importante que la deformación volumétrica α considere ambas partes del esfuerzo que provoca el desequilibrio en el suelo y que induce las deformaciones en el mismo.

Para determinar los valores de los parámetros involucrados en el cálculo de α ; se utilizaron pruebas en el oedómetro. Numerosos ensayos fueron realizados midiendo la presión de expansión para diferentes incrementos de humedad. La succión fue medida al inicio y al final de cada prueba. La presión de expansión fue determinada regresando el suelo a su volumen inicial mediante carga. Con estos datos se construyó la curva por expansión del suelo de la fig. 3.3.2

El esfuerzo total aplicado en la zona de contacto se define como:

$$\Delta\sigma = P_{Exp.} - \Delta q$$

y pueden presentarse tres casos

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| a) Si $\Delta q < P_{Exp.}$ | La def. volumétrica = α_1 |
| b) Si $\Delta q = P_{Exp.}$ | La def. volumétrica = 0 |
| c) Si $\Delta q > P_{Exp.}$ | La def. volumétrica = α_2 |

Caso a) $\Delta q < P_{Exp}$.

En este caso la deformación volumétrica α corresponde a deformaciones por expansión del suelo; y la carga externa aplicada al análisis es la diferencia entre la descarga y la presión de expansión.

Según el procedimiento de los ensayos α considera ambas partes del esfuerzo; presentando deformaciones tanto por incremento de humedad como por carga externa; siendo $\Delta q = P_{Exp}$. el máximo esfuerzo aplicado a la probeta, donde $\alpha = 0$.

De la gráfica de esfuerzos por expansión fig. (3.3.2) se conoce M_{ho} y una vez calculado ρ_{hi} ; al igualar la ec. (3.3.6) y (3.3.7) el módulo de deformación unitaria correspondiente a la respuesta por un alivio parcial de esfuerzos por expansión a la profundidad investigada Z_i ; se define:

$$M_{hi} = \rho_{hi} (M_{ho}) \quad (3.3.10)$$

La expansión volumétrica α para cada uno de los estratos de espesor d_i que conforman la masa de suelo se calcula

$$\alpha_{hi} = M_{hi} * d_i \quad (3.3.11)$$

Caso b) $\Delta q = P_{Exp}$.

Es el esfuerzo máximo que se aplicado a la probeta en los ensayos. El sistema está en equilibrio y las deformaciones en la superficie de contacto son nulas.

Caso c) $\Delta q > P_{Exp}$.

Cuando las cargas originadas por el peso de la estructura superan a las fuerzas de expansión del suelo, el coeficiente α corresponde a deformaciones por asentamientos, como es el caso del comportamiento en grandes estructuras con peso superior a la presión de expansión; y no representan el problema al que se refiere esta tesis.

En diferentes trabajos se ha abordado el problema de las construcciones ligeras, en las cuales el peso de la estructura es con mucho menor a las presiones de expansión que se pueden desarrollar, esto como ya se dijo en capítulos anteriores tiene grandes repercusiones económicas, consecuencia de los daños físicos en las estructuras como son casas de interés social, que en la mayoría de los casos representa el patrimonio familiar; canchas deportivas, banquetas, pavimentos, etc.

En el análisis los valores de carga introducidos en el cálculo de los asentamientos será la diferencia entre el peso de la estructura y la presión de expansión.

CAPITULO 4

Determinación de los parámetros para evaluar la deformación volumétrica por hidratación de un suelo.

De pruebas de succión realizadas en el laboratorio con probetas de material inalterado del fraccionamiento Jurica del Valle de Querétaro se obtuvo la siguiente gráfica donde se puede ver el cambio de succión o de esfuerzo para diferentes humedades a las que ha sido sometido el suelo

SUCCIÓN ψ (Kpa)	HUMEDAD w(%)
61258.02	12
26222.92	19
29385.23	20
27439.23	21
12255.25	25
11826.12	27
10733.5	29
8383.631	31
816.506	46
7.714	58
2.096	65
1.305	66
1.202	67

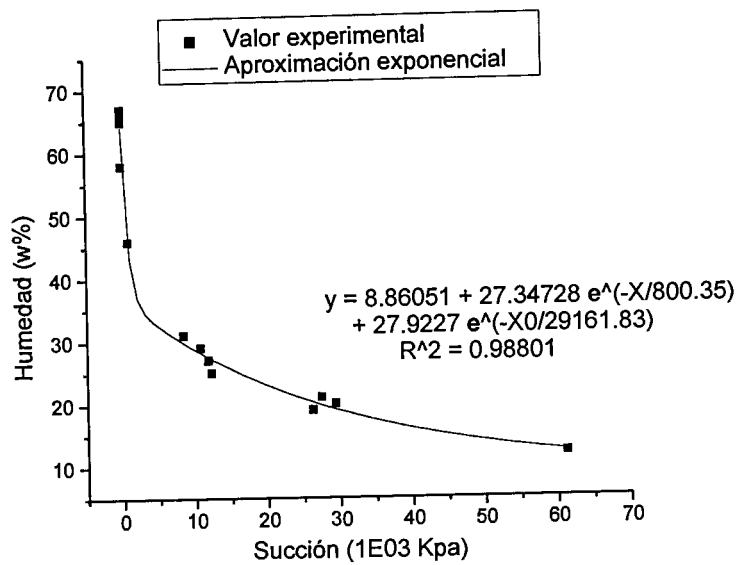
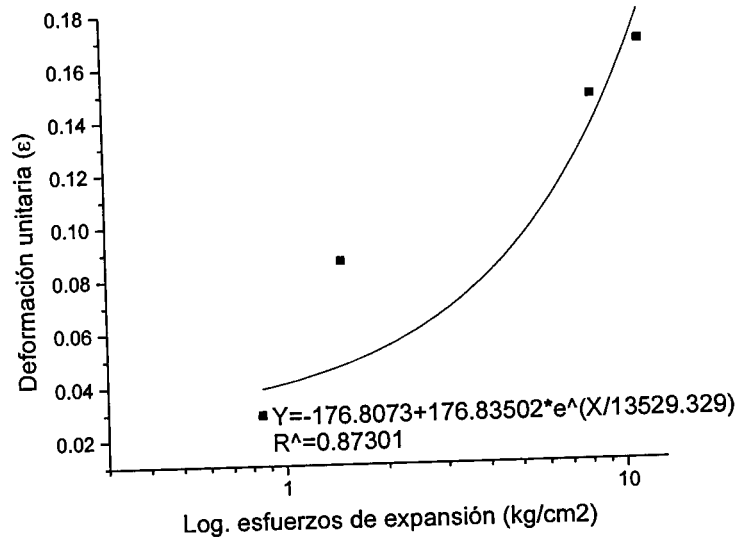


Fig. 4.1 Esfuerzos de succión Vs contenido de humedad

a)

PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm2)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ε)
0	0.000
0.852	0.029
1.48	0.086
8.237	0.146
11.44	0.166



b)

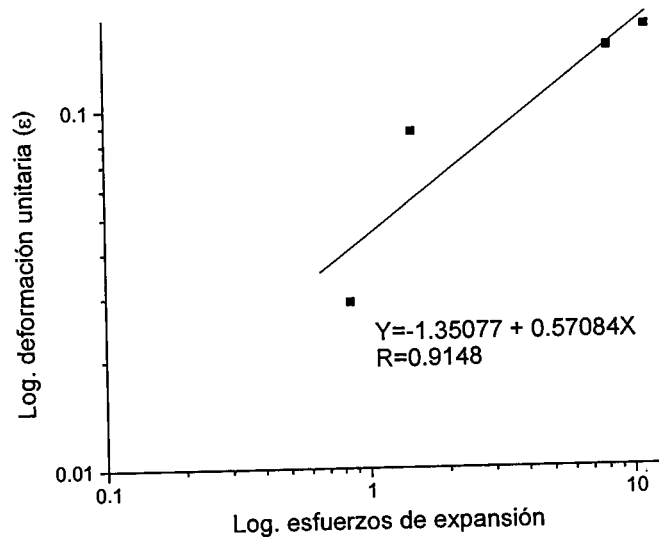


Fig. 4.2 En los incisos (a y b) de esta fig. se muestra la curva de esfuerzos de expansión dibujada en diferente escala

De la fig. 4.2 se tiene:

$$c = 0.57084$$

que corresponde a la pendiente de la recta que se ajusta a los puntos dibujados en escala logarítmica.

El máximo cambio de esfuerzos por hidratación $\Delta\sigma_{\Psi_0}$, se presenta cuando el suelo, pasando de una humedad inicial alcanza las condiciones de saturación, que en este caso particular corresponden al 63% de humedad. Así el máximo cambio de esfuerzos por hidratación $\Delta\sigma_{\Psi_0}$ esperado, varía dependiendo de la humedad natural del suelo.

$$\begin{aligned} \omega_i &= 27.8\% & \Psi_i &= 11365 \text{ Kpa} \\ \omega_f &= 63\% & \Psi_f &= 3.7734 \text{ Kpa} \end{aligned}$$

de donde

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_0 &= \Psi_i - \Psi_f \\ &= 11365 - 3.7734 \\ &= 11361.226 \text{ Kpa} \end{aligned}$$

De la Tabla A.1, anexo A, se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_0 &= 0.166 \text{ m/m} \\ \text{P.Exp.} &= 11.44 \text{ kg/cm}^2 = 114,400 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

sustituyendo $\Delta\varepsilon_0$ y $\Delta\sigma_{\Psi_0}$ en la ec. (3.3.2)

$$M_{ho} = 0.166 / 114,400 = 1.454105\text{E-}06 \text{ m}^2/\text{kg}$$

Calculamos ahora la expansión volumétrica por hidratación α_h para diferentes incrementos de humedad considerando $\omega_i = 27.8\%$ (humedad natural del suelo en el momento de construcción)

W_{final}(%)	SUCCIÓN (Kpa)	Cambio de succión parcial (Kpa)	Factor de expansión $\rho_h = \left(\frac{\Delta\Psi_i}{\Delta\Psi_o}\right)^{c-1}$	$M_{hi} = \rho_{hi} (M_{ho})$ (m ² /kg)	Expansión volumetrica (m³/kg) $\alpha_h = M_{hi} \cdot d_i$
27.8	11365	0	0	0	0
34.1	6819.755	4545.245	1.481661507	2.15E-06	4.51493E-06
45.65	816.506	10548.494	1.032366422	1.498E-06	3.14583E-06
58	7.714	11357.286	1.000148889	1.4513E-06	3.04766E-06
62.91	3.7734	11361.2266	1	1.4511E-06	3.04721E-06

$W_{final}(\%)$	Expansión volumétrica (m3/kg) $\alpha_h = M_{hi} \cdot d_i$
27.8	0
34.1	4.5149E-06
45.65	3.1458E-06
58	3.0477E-06
62.91	3.0472E-06

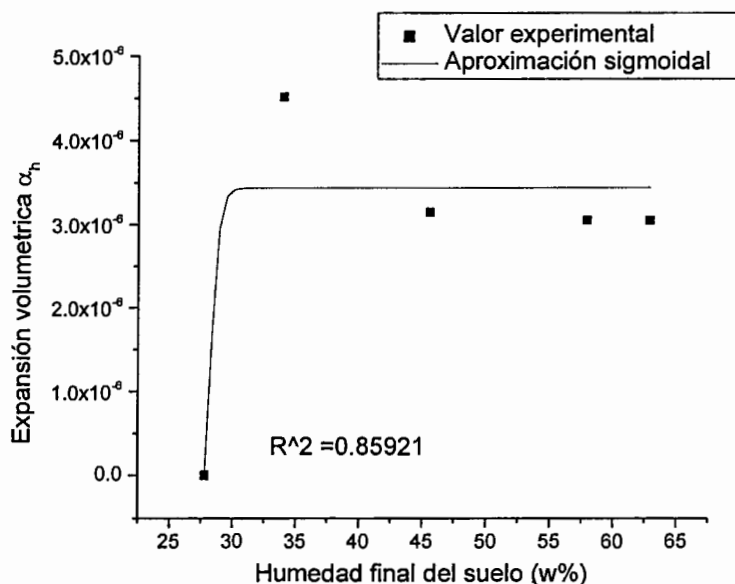


Fig. 4.3 En esta fig. se muestra la expansión volumétrica (α_h) para diferentes valores de humedad en un suelo arcilloso considerando en cada punto una humedad inicial del 27.84%; fraccionamiento Jurica, Qro.

Calculo de la expansión volumétrica por hidratación α_h para diferentes incrementos de humedad considerando $\omega_i = 34.1\%$ (humedad natural del suelo en el momento de construcción)

De la Tabla A.1, anexo A, se tiene:

$$\Delta \varepsilon_0 = 0.137 \text{ m/m}$$

$$P_{Exp.} = 10.59/\text{cm}^2 = 105,900 \text{ kg/m}^2$$

sustituyendo $\Delta \varepsilon_0$ y $\Delta \sigma_{\Psi_0}$ en la ec. (3.3.2)

$$M_{ho} = 0.137 / 105,900 = 1.29367E-06 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$W_{final}(\%)$	SUCCIÓN (Kpa)	Cambio de succión parcial (Kpa)	Factor de expansión $\rho_h = \left(\frac{\Delta \Psi_l}{\Delta \Psi_o} \right)^{c-1}$	$M_{hi} = \rho_{hi} (M_{ho})$ (m2/kg)	Expansión volumétrica (m3/kg) $\alpha_h = M_{hi} \cdot d_i$
34.1	6819.755	0	0	0	0
45.65	816.506	6003.249	1.056002054	1.3661E-06	2.86886E-06
58	7.714	6812.041	1.000248218	1.294E-06	2.71739E-06
62.91	3.7734	6815.9816	1	1.2937E-06	2.71671E-06

Cambios de humedad $\Delta w(\%)$	Expansión volumétrica (m3/kg) $\alpha_h = M_h * d_t$
0	0
11.55	2.8689E-06
23.9	2.7174E-06
28.81	2.7167E-06

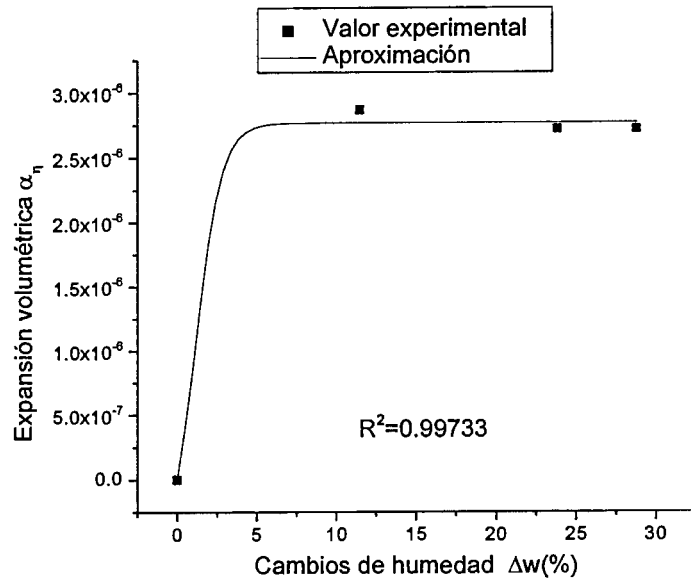


Fig. 4.4 En esta fig. se muestra la expansión volumétrica (α_h) para diferentes valores de humedad en un suelo arcilloso considerando en cada punto una humedad inicial del 34.1%; fraccionamiento Jurica, Qro.

Expansión volumétrica por hidratación α_h para diferentes incrementos de humedad considerando $\omega_i = 45.65\%$ (humedad natural del suelo en el momento de construcción)

De la Tabla A.1, anexo A, se tiene:

$$\Delta \varepsilon_0 = 0.08 \text{ m/m}$$

$$P.\text{Exp.} = 9.96/\text{cm}^2 = 99,600 \text{ kg/m}^2$$

sustituyendo $\Delta \varepsilon_0$ y $\Delta \sigma_{\psi 0}$ en la ec. (3.3.2)

$$M_{ho} = 0.08 / 99,600 = 8.032128E-07 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$W_{\text{final}}(\%)$	SUCCIÓN (Kpa)	Cambio de succión parcia (Kpa)I	Factor de expansión $\rho_h = \left(\frac{\Delta \Psi_i}{\Delta \Psi_o}\right)^{e-1}$	$M_{hi} = \rho_{hi} (M_{ho})$ (m2/kg)	Expansión volumétrica (m3/kg) $\alpha_h = M_{hi} * d_t$
45.65	816.506	0	0	0	0
58	7.714	808.792	1.002088055	8.0489E-07	1.69027E-06
62.91	3.7734	812.7326	1	8.0321E-07	1.68675E-06

Cambios de humedad $\Delta w(\%)$	Expansión volumetrica $\alpha_h = M_h * d_t$ (m3/kg)
0	0
12.35	1.6903E-06
17.26	1.6867E-06

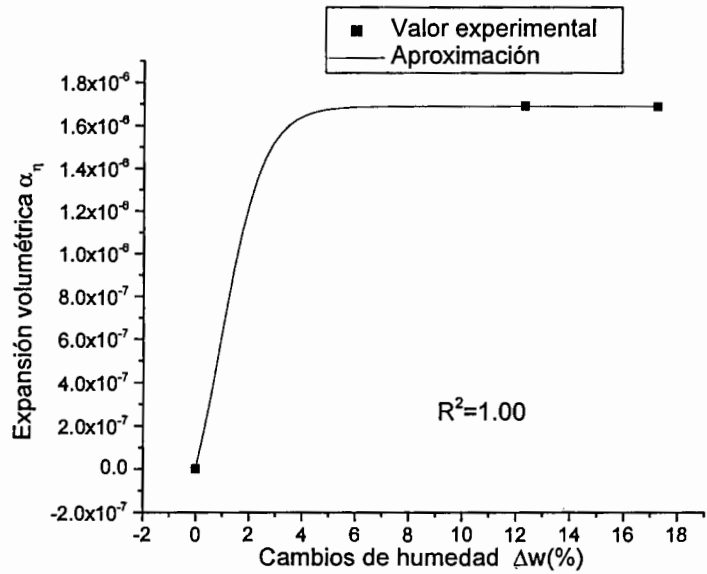


Fig. 4.5 En esta fig. se muestra la expansión volumétrica (α_h) para diferentes valores de humedad en un suelo arcilloso considerando en cada punto una humedad inicial del 45.65%; fraccionamiento Jurica, Qro.

Expansión volumétrica máxima por hidratación α_h , para diferentes valores de humedad natural del suelo, considerando una humedad máxima promedio de 63%, que corresponde a las condiciones de saturación y cuya succión del suelo a esta humedad es de 3.7734 Kpa

$W_{\text{natural}}(\%)$	SUCCIÓN (Kpa)	Cambio de succión parcial (Kpa)	Factor de expansión $\rho_h = \left(\frac{\Delta\Psi_i}{\Delta\Psi_o}\right)^{c-1}$	$M_{hi} = \rho_{hi} (M_{ho})$ (m2/kg)	Expansión volumetrica (m3/kg) $\alpha_h = M_{hi} * d_t$
27.84	11365	11361.2266	1	1.45105E-06	3.0472E-06
43.5	2081.384	2077.6106	1	1.29367E-06	2.7167E-06
45.65	816.506	812.7326	1	8.03213E-07	1.6867E-06
62.91	3.7734	0	0	0	0

W natural(%)	Expansión volumetrica (m3/kg) $\alpha_h = M_{ht} \cdot d_t$
27.84	3.0472E-06
43.5	2.7167E-06
45.65	1.6867E-06
62.91	0

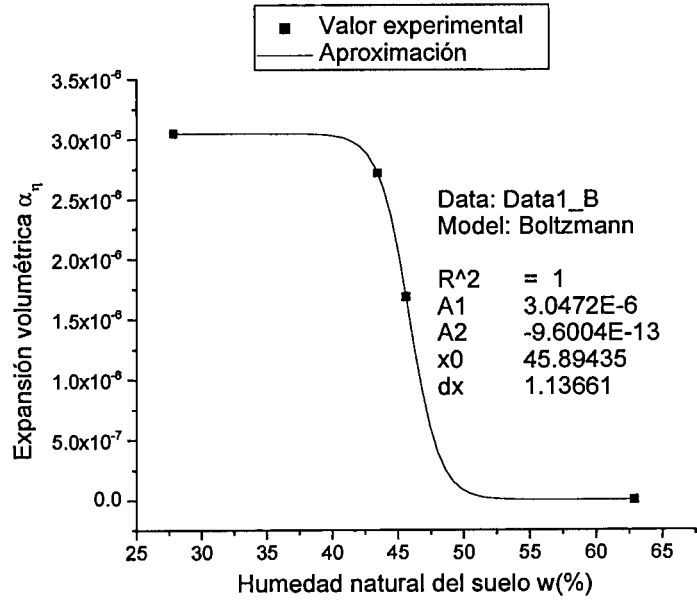


Fig. 4.6 En esta fig. se muestra la expansión volumétrica máxima por hidratación (α_h) para diferentes valores de humedad natural en un suelo arcilloso; fraccionamiento Jurica, Qro.

CAPITULO 5

Análisis y aplicación de resultados

A continuación se considera un estrato de suelo expansivo de 2.10m de profundidad sobre el cual se ha construido una casa habitación con una cimentación tipo losa rígida de dimensiones 10x14m y peralte efectivo $h=0.20\text{m}$, la cual distribuye sobre el suelo una presión uniforme de 1ton/m^2 . La profundidad del nivel freático se encuentra por debajo de los 150 metros de profundidad. El predio se encuentra ubicado en el fraccionamiento Jurica de la ciudad de Querétaro.

Para el cálculo de de las influencias I_{ji}^N , la losa se ha dividido en fracciones de $2.5\text{m} \times 14\text{m}$, la humedad natural promedio del suelo es de 27.84%; y se ha dividido el espesor del estrato en tres partes de 0.70m según la humedad promedio que se espera alcanzará el suelo después de la hidratación, esto basado en el historial de humedades del suelo en las diferentes épocas del año, (ver perfil de humedades anexo A fig. A.1), correspondiendo a cada uno una expansión volumétrica α_h tal como se muestra en la fig. 5.1.

	(+1)	2	3	4	wfinal (%)	α_h^N (m3/kg)
0.70m	I_{11}^A	I_{21}^A	I_{31}^A	I_{41}^A	45.65	3.146E-06
0.70m	I_{11}^B	I_{21}^B	I_{31}^B	I_{41}^B	34.10	4.515E-06
0.70m	I_{11}^C	I_{21}^C	I_{31}^C	I_{41}^C	27.80	0.000E+00

fig. 5.1 Factores de influencia por carga unitaria

(Apéndice C, ISE, Zeevaert) Según Frolich para un suelo homogéneo e isótropo $X=3$; que corresponde a la solución de Boussinesq, de donde:

$$I_{ji} = \frac{3}{2\pi} \left(\text{sen}\alpha_0 - \frac{\text{sen}^3\alpha_0}{3} \right) \{ (\psi_1 - \psi_2) + \text{sen}(\psi_1 - \psi_2) \cos(\psi_1 + \psi_2) \} \quad (5.1.0)$$

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \frac{B}{\sqrt{x^2 + z^2}}$$

$$\psi_1 = \tan^{-1} \frac{x + \lambda/2}{z} \quad (5.2.0)$$

$$\psi_2 = \tan^{-1} \frac{x - \lambda/2}{z}$$

Por tanto en este caso

$$B = 7.0\text{m}$$

$$\lambda/2 = 1.25\text{m}$$

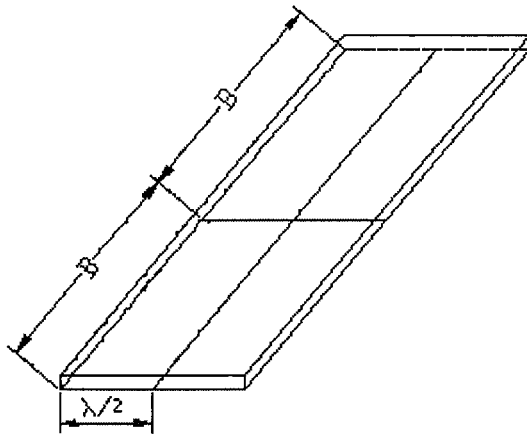


Fig. 5.2 muestra la magnitud de los valores $\lambda/2$ y B de un área rectangular cargada uniformemente que representa una de las particiones de la losa.

a) Cálculo de influencias por fracción de losa colocada en el punto No. 1 sustituyendo valores en las ec.(5.1.0) y (5.2.0) se tiene:

	x	z	α_0	ψ_1	ψ_2	I_{ji}^N
I_{11}^A	0.00	0.35	87.14	74.35	-74.35	0.9914
I_{21}^A	2.50	0.35	70.17	84.70	74.36	0.00406
I_{31}^A	5.00	0.35	54.40	86.80	84.70	1.24E-04
I_{41}^A	7.50	0.35	42.99	87.7	86.80	2.008E-05
I_{11}^B	0.00	1.05	81.46	49.97	-49.97	0.8686
I_{21}^B	2.50	1.05	68.82	74.36	49.97	6.097E-02
I_{31}^B	5.00	1.05	53.87	80.46	74.35	3.11E-03
I_{41}^B	7.50	1.05	42.75	83.15	80.46	5.279E-04
I_{11}^C	0.00	1.75	75.96	35.53	-35.53	0.6949
I_{21}^C	2.50	1.75	66.44	64.98	35.53	0.1337
I_{31}^C	5.00	1.75	52.88	74.36	64.98	1.202E-02
I_{41}^C	7.50	1.75	42.27	78.7	74.36	2.259E-03

a) Cálculo de influencias por fracción de losa colocada en el punto No. 2

sustituyendo valores en las ec.(5.1.0) y (5.2.0) se tiene:

	x	z	α_0	ψ_1	ψ_2	I_{ji}^N
I_{12}^A	-2.50	0.35	70.17	-74.36	-84.7	4.063E-03
I_{22}^A	0.00	0.35	87.14	74.35	-74.35	0.9914
I_{32}^A	2.50	0.35	70.17	84.70	74.35	4.063E-03
I_{42}^A	5.00	0.35	54.40	86.80	84.70	1.24E-04
I_{12}^B	-2.50	1.05	68.82	-49.97	-74.36	6.097E-02
I_{22}^B	0.00	1.05	81.46	49.97	-49.97	0.8686
I_{32}^B	2.50	1.05	68.82	74.36	49.97	6.097E-02
I_{42}^B	5.00	1.05	53.87	80.46	74.35	3.11E-03
I_{12}^C	-2.50	1.75	66.44	-64.98	-35.53	0.1337
I_{22}^C	0.00	1.75	75.96	35.53	-35.53	0.6949
I_{32}^C	2.50	1.75	1.75	66.44	64.98	0.1337
I_{42}^C	5.00	1.75	1.75	52.88	74.36	1.202E-02

Las influencias por la fracción de losa colocada en los puntos 3 y 4 son simétricas a las provocadas por posicionarla en los puntos 1 y 2.

Al sustituir I_{ji}^N y α_h^N en la ec.(3.1.5) se tienen los desplazamientos verticales por carga unitaria para cada uno de los puntos 1,2,3,4

a) Desplazamientos provocados por fracción losa No.1

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta_{11}} \\ \overline{\delta_{21}} \\ \overline{\delta_{31}} \\ \overline{\delta_{41}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.0407E-06 \\ 2.8805E-07 \\ 1.4432E-08 \\ 2.4466E-09 \end{bmatrix}$$

b) Desplazamientos provocados por fracción losa No.2

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta_{12}} \\ \overline{\delta_{22}} \\ \overline{\delta_{32}} \\ \overline{\delta_{42}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.8805E-07 \\ 7.0407E-06 \\ 2.8805E-07 \\ 1.4432E-08 \end{bmatrix}$$

c) Desplazamientos provocados por fracción losa No.3

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta_{13}} \\ \overline{\delta_{23}} \\ \overline{\delta_{33}} \\ \overline{\delta_{43}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4432E-08 \\ 2.8984E-07 \\ 7.0407E-06 \\ 2.8805E-07 \end{bmatrix}$$

d) Desplazamientos provocados por fracción losa No.4

$$\begin{bmatrix} \overline{\delta_{14}} \\ \overline{\delta_{24}} \\ \overline{\delta_{34}} \\ \overline{\delta_{44}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.4466E-09 \\ 1.4432E-08 \\ 2.8805E-07 \\ 7.0407E-06 \end{bmatrix}$$

Utilizando los valores de desplazamientos anteriores se forma la matriz general para todos los puntos deseados ec. (3.1.6)

$$[\overline{\delta_{ji}}] = \begin{bmatrix} \overline{\delta_{j1}}^T \\ \overline{\delta_{j2}}^T \\ \overline{\delta_{j3}}^T \\ \overline{\delta_{j4}}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.0407E-06 & 2.8805E-07 & 1.4432E-08 & 2.4466E-09 \\ 2.8805E-07 & 7.0407E-06 & 2.8805E-07 & 1.4432E-08 \\ 1.4432E-08 & 2.8984E-07 & 7.0407E-06 & 2.8805E-07 \\ 2.4466E-09 & 1.4432E-08 & 2.8805E-07 & 7.0407E-06 \end{bmatrix}$$

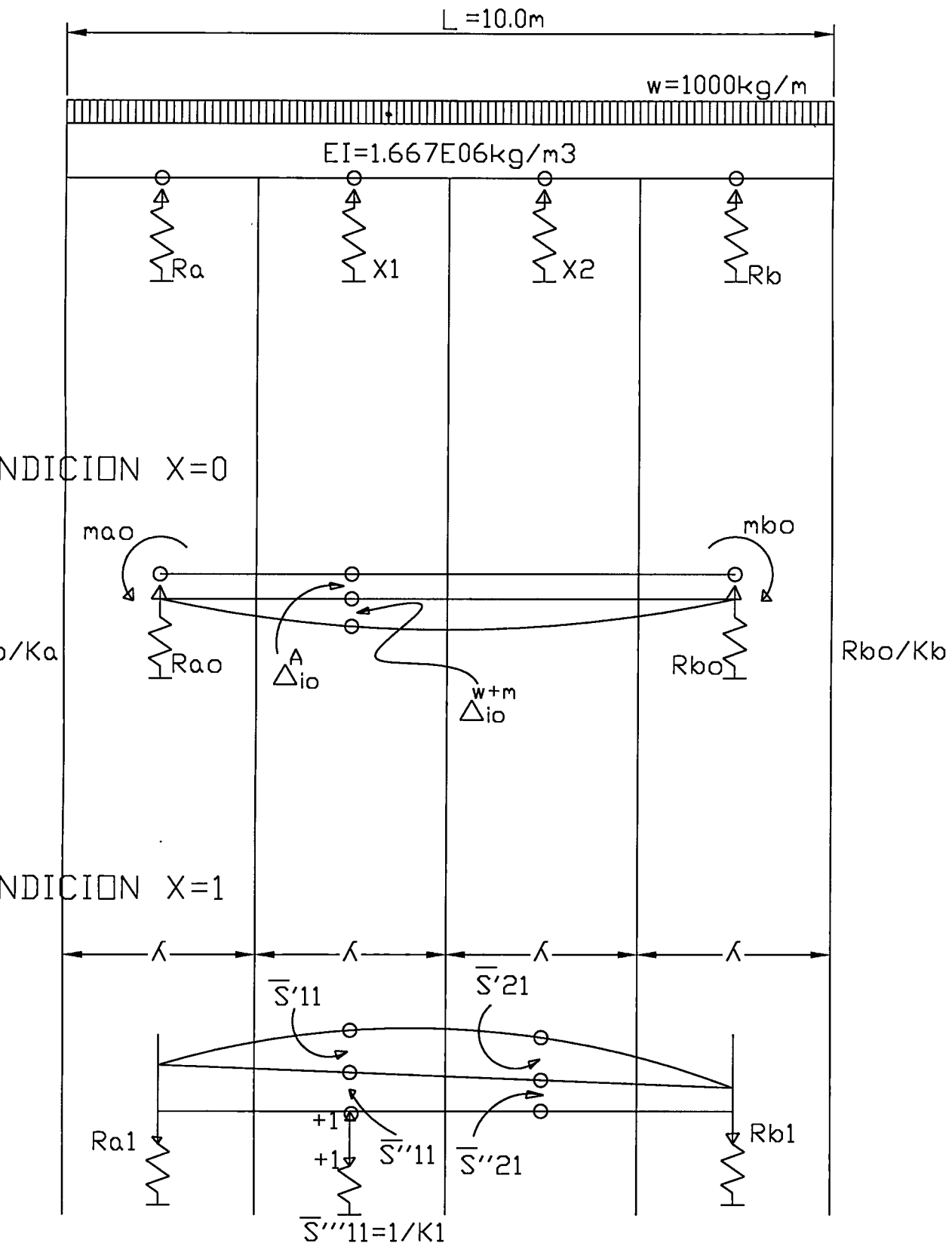


Fig. 5.3 Desplazamientos verticales de la cimentación

El cálculo de las deformaciones en la losa se hará considerando el procedimiento propuesto por Zeevaert, ISE (1973). Se analiza la losa como una viga de ancho unitario y de longitud $L=10m$; apoyada en forma continua sobre el suelo; dividida en 4 partes iguales $\lambda=2.50m$ que representan áreas tributarias iguales ($\bar{a}=1*\lambda$), al centro de las cuales quedan aplicadas las reacciones R_a, R_b, X_1, X_2 , como se indica en la fig. (5.3).

Para la ISE, las ecuaciones matriciales de desplazamientos en la masa de suelo EMA y de interacción EMI quedan ligadas por los valores de K_i . Así para el cálculo de los esfuerzos de contacto se comienza suponiendo los valores R_a, R_b, X_1, X_2 . El esfuerzo actuante en la masa de suelo que provoca el desequilibrio y que induce las deformaciones queda determinado por la diferencia entre la presión de expansión promedio y cada una de las reacciones; después de varias iteraciones se obtiene un valor de las reacciones más aproximado como se muestra a continuación:

$$P. \text{ Exp. } = (14,800 + 8,520 + 0.00) / 3 = 7,773.33 \text{kg/m}^2$$

$$R_a = R_b = 2794.96 \text{kg}$$

$$X_1 = X_2 = 2205.037 \text{kg}$$

$$\bar{a} = 1 * 2.5 = 2.50 \text{m}^2$$

Al sustituir en la ecuación matricial EMA (3.1.8) se tiene:

$$\delta_i = [\bar{\delta}_{ji}]^T * \left\{ \begin{array}{l} 7,773.33 \\ 7,773.33 \\ 7,773.33 \\ 7,773.33 \end{array} - \left\{ \begin{array}{l} 2794.96/2.5 \\ 2205.037/2.5 \\ 2205.037/2.5 \\ 2794.96/2.5 \end{array} \right\} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0.049 \text{m} \\ 0.053 \text{m} \\ 0.053 \text{m} \\ 0.049 \text{m} \end{array} \right\}$$

donde $k_i = R_i / \delta_i$ (5.3.0)

$$k_a = k_b = 2794.96 / 0.049 = 57,156.64 \text{kg/m}$$

$$k_1 = k_2 = 2205.037 / 0.053 = 42,000.70 \text{kg/m}$$

Condición $X=0$

a) Cálculo de reacciones y momentos

$$R_a = R_b = 5000$$

$$m_{a0} = m_{b0} = (1000)(1.25)^2 / (2) = 781.25 \text{ kg.m}$$

b) Desplazamiento vertical en los apoyos

$$\Delta_{i0}^A = R_{i0} / k_i$$

$$\Delta_{a0}^A = \Delta_{b0}^A = 5000 / 57,156.64 = 0.0875 \text{m}$$

(5.4.0)

c) Desplazamientos verticales por flexión de cargas uniformes y momentos extremos

$$\Delta_{i0}^{w+m} = \frac{wx}{24EI} \left[x^3 - \left(2l + \frac{4m_{a0}}{wl} - \frac{4m_{b0}}{wl} \right) x^2 + \frac{12m_{a0}}{w} x + l^3 - \frac{8m_{a0}l}{w} - \frac{4m_{b0}}{w} \right] \quad (5.5.0)$$

$$\Delta_{10}^{w+m} = \frac{1000 * 2.5}{24EI} \left[2.5^3 - \left(2 * 7.5 + \frac{4(781.2)}{1000 * 7.5} - \frac{4(-781.2)}{1000 * 7.5} \right) 2.5^2 + \frac{12(781.2)}{1000} * 2.5 \right. \\ \left. + 7.5^3 - \frac{8(781.2) * 7.5}{1000} - \frac{4(-781.2) * 7.5}{1000} \right]$$

$$\Delta_{10}^{w+m} = 35264.75 / EI$$

$$\Delta_{20}^{w+m} = \frac{1000 * 5}{24EI} \left[5^3 - \left(2 * 7.5 + \frac{4(781.2)}{1000 * 7.5} - \frac{4(-781.2)}{1000 * 7.5} \right) 5^2 + \frac{12(781.2)}{1000} * 5 \right. \\ \left. + 7.5^3 - \frac{8(781.2)}{1000} - \frac{4(-781.2)}{1000} \right]$$

$$\Delta_{20}^{w+m} = 36349.82 / EI$$

Condición X=1

a) Por deformación del suelo

$$\bar{S}_{ii}''' = 1 / K \quad (5.6.0)$$

$$\bar{S}_{11}''' = \bar{S}_{22}''' = 1 / 42,000.70 = 2.3809E - 05$$

b) Por flexión de la viga \bar{S}'_{ii} ; \bar{S}'_{ji}

$$\bar{S}' = \frac{Pbx}{6EI * l} (l^2 - b^2 - x^2) \quad (5.7.0)$$

$$\bar{S}'_{11} = \bar{S}'_{22} = \frac{1 * 5 * 2.5}{6 * 7.5EI} (7.5^2 - 5^2 - 2.5^2) = 6.94 / EI$$

$$\bar{S}'_{21} = \bar{S}'_{12} = \frac{1 * 2.5 * 2.5}{6 * 7.5EI} (7.5^2 - 2.5^2 - 2.5^2) = 6.076 / EI$$

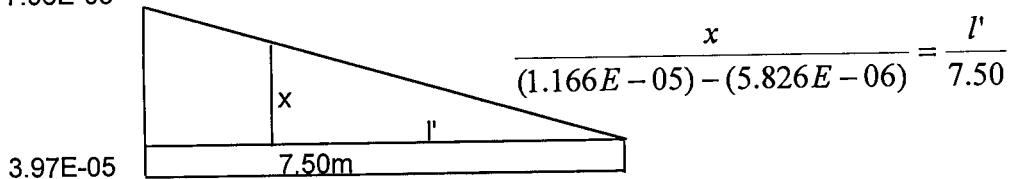
c) Por desplazamiento de los apoyos \bar{S}''_{ii} y \bar{S}''_{ji}

$$\bar{S}''_{a1} = \bar{S}''_{b2} = \frac{0.667}{57,156.64} = 1.166E - 05m$$

$$\bar{S}''_{b1} = \bar{S}''_{a2} = \frac{0.333}{57,156.64} = 5.826E - 06m$$

Con lo anterior establecemos la siguiente relación que nos permite calcular el desplazamiento en los puntos 1 y 2 de la viga, por efecto de la aplicación de la carga unitaria en ambos puntos:

7.96E-05



$$\bar{S}''_{11} = \bar{S}''_{22}$$

$$\frac{x}{5.8383E - 06} = \frac{5.0}{7.5}; x = 3.892E - 06$$

$$\bar{S}''_{11} = \bar{S}''_{22} = (5.826E - 06) + (3.892E - 06) = 9.718E - 06m$$

$$\bar{S}''_{21} = \bar{S}''_{12}$$

$$\frac{x}{5.8383E - 06} = \frac{2.5}{7.5}; x = 1.9461E - 06$$

$$\bar{S}''_{21} = \bar{S}''_{12} = (5.826E - 06) + (1.9461E - 06) = 7.772E - 06m$$

Una vez calculados los valores anteriores se establece la siguiente igualdad

$$\left([\bar{S}''_{ij}] + [\bar{S}''_{ji}] + \left[\frac{1}{k_i} \right] \right) \cdot |X_i| = |\Delta_{i0}^f| + |\Delta_{i0}^A| \quad (5.8.0)$$

$$\frac{1}{EI} \begin{bmatrix} 6.94 & 6.076 \\ 6.076 & 6.94 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 9.718E-06 & 7.772E-06 \\ 7.772E-06 & 9.718E-06 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.3809E-05 & 0 \\ 0 & 2.3809E-05 \end{bmatrix} * |X_i|$$

$$= \frac{1}{EI} \begin{bmatrix} 35264.75 \\ 35264.75 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0875 \\ 0.0875 \end{bmatrix}$$

Despejando X_i , se tiene:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2212.216kg \\ 2212.216kg \end{bmatrix}$$

Si hacemos el equilibrio externo con estos valores tenemos que:

$$R_a = R_b = 2787.8kg$$

Los valores obtenidos al final de esta iteración son prácticamente iguales a los propuestos al inicio de la misma; por tanto al sustituirlos en la ecuación matricial EMA (3.1.8) se tienen los valores de deformaciones en los puntos de contacto entre el suelo y la estructura de cimentación:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.065m \\ 0.073m \\ 0.073m \\ 0.065m \end{bmatrix}$$

Perfil de la losa de cimentación deformada por expansión del suelo fig.5.4

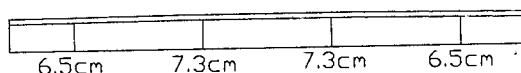


Fig. 5.4 En este perfil se muestra la magnitud de las deformaciones en los puntos de contacto entre el suelo y la losa de cimentación

5.1 Comparación con otros métodos de análisis

Los métodos de predicción para la expansión volumétrica en suelos arcillosos parcialmente saturados se pueden agrupar en tres tipos: teóricos, Semi- empíricos y empíricos.

La aplicación de estos métodos se basa en los procedimientos de pruebas y técnicas de análisis utilizadas en los métodos teóricos. Es importante mencionar que la validez de estos procedimientos es aceptada solo si se aplican en condiciones del lugar.

Para el cálculo de la expansión volumétrica tanto por los métodos teóricos como son por pruebas en el oedometro y por pruebas de succión es necesario considerar que el suelo de Jurica, Qro, tiene un $\gamma_{sat}=1.852\text{ton/m}^2$, $\gamma_m=1.636\text{ ton/m}^2$ y un índice de expansión $C_s=0.06$. La humedad de saturación $\omega_s=63\%$ y la relación de vacíos en estas condiciones $e_s=1.701$. En la fig. (5.7) se muestra Δq para cada una de las profundidades calculadas con la teoría de Boussinesq; se proporcionan además otros datos necesarios, resumidos en la tabla siguiente.

Prof. (m)	w(%)	e(%)	ψ_i (kpa)	ψ_i (kg/cm ²)	C_m (cm ² /kg)	C_t (cm ² /kg)	$\Delta \log(\psi_f - \psi_i)$	$(\gamma_m * z + \Delta q)_o$	$(\gamma_m * z + \Delta q)_f$	$\Delta \log(\gamma_m * z + \Delta q)$
0.7	26.8	1.16	11836	11.836	0.056	0.0011	3.497	2138	2289.2	0.0297
1.4	28.2	0.8133	10834	10.833	0.0332	0.076	3.458	3264.4	3566.8	0.0385
2.1	30.6	0.763	8383.6	8.383	0.0156	0.0286	3.35	4395.6	4849.2	0.0427

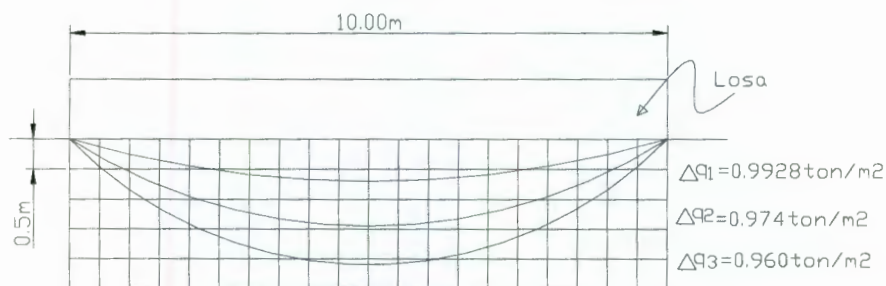


Fig. 5.7 Distribución de esfuerzos en la masa de suelo usando el bulbo de presiones por Boussinesq

5.1.2 Método por pruebas en el oedometro

Como su nombre lo indica se basa en pruebas realizadas en el oedometro y consiste en aplicar carga conforme aumenta la humedad durante el proceso de saturación, de tal forma que se conserve un volumen constante. Sin embargo para determinar la presión de expansión, es necesario corregir con las curvas ajustadas de compresibilidad.

La predicción de la expansión total es la sumatoria de los desplazamientos en cada uno de los estratos del suelo y se expresa en la expresión siguiente, deducida de la curva de consolidación (Nelson and Miller, *Expansive soils, problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*)

$$\rho = \sum_{i=1}^n \Delta z_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{(1 + e_0)} z_i \quad (5.1.2a)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_s z_i}{(1 + e_0)_i} \log \left(\frac{\sigma' f}{\sigma'_{sc}} \right)_i \right] \quad (5.1.2b)$$

donde

- ρ = deformación total por expansión
- $\sum \Delta z_i$ = deformación por expansión del estrato i
- z_i = espesor inicial del estrato i
- $\sum e_i$ = cambio en la relación de vacíos del estrato i
 $= (e_f - e_0)_i$
 $= [C_s \log(\sigma' f / \sigma'_{sc})]_i$
- Δq_i = incremento de esfuerzo a una profundidad z por carga de losa
- $\sigma' f$ = esfuerzo efectivo
- σ'_{sc} = Presión de expansión
- n = número de estratos

Para una succión $\Psi_i = 0$, constante en una profundidad z

$$\sigma' f = z \gamma_{sat}$$

Los coeficientes C_s , C_m , C_t , son obtenidos en forma grafica de la curva de compresibilidad del suelo. Así C_s corresponde a la pendiente del tramo de descarga, C_m es la pendiente de la curva que se forma al graficar $\log(\text{succión})$ vs relación de vacíos ($e\%$) y C_t es el valor de la pendiente del tramo virgen.

En el caso del suelo en estudio, los cálculos utilizando pruebas en el oedómetro se plantean enseguida:

Para 0.00 – 0.70m

$$\sigma' f = 0.35 \times 1852 = 648.2 \text{ kg/m}^2$$

$$\Delta q = 992.8 \text{ kg/m}^2$$

Sustituyendo en la ec. (5.1.2b) se tiene

$$\rho_{0.70} = \frac{0.06 * 0.70}{(1 + 1.16)} \log \left(\frac{648.2 + 992.8}{82000} \right) = -3.30E - 02m$$

Para 0.70 – 1.40m

$$\sigma'f = [(0.7+1.4)/2] \times 1852 = 1944.6 \text{ kg/m}^2$$
$$\Delta q = 974 \text{ kg/m}^2$$

Sustituyendo en la ec. (5.1.2b) se tiene

$$\rho_{1.4} = \frac{0.06 * 0.7}{(1 + 0.8133)} \log\left(\frac{1944.6 + 974}{82000}\right) = -3.35E - 02m$$

Para 1.40 - 2.10m

$$\sigma'f = [(1.4+2.1)/2] \times 1852 = 3241 \text{ kg/m}^2$$
$$\Delta q = 960 \text{ kg/m}^2$$

Sustituyendo en la ec. (5.1.2b) se tiene

$$\rho_{2.1} = \frac{0.06 * 0.7}{(1 + 0.763)} \log\left(\frac{3241 + 960}{82000}\right) = -3.07E - 02m$$

La deformación total por expansión considerando la carga de la losa es la sumatoria de cada uno de los estratos:

$$\rho_{total} = \rho_{0.7} + \rho_{1.40} + \rho_{2.10} = -9.70E - 02m = 9.7cm$$

5.1.3 Método por pruebas de succión

La respuesta del suelo al cambio de succión se puede predecir de manera semejante por el cambio en el esfuerzo efectivo por saturación σ' . La relación entre la relación de vacíos y la succión es análoga a la compresión o expansión determinada en el oedómetro por lo que estas predicciones son hechas considerando las ecuaciones similares a las ecuaciones de consolidación usadas en el método del oedómetro

$$\rho = \sum_{i=1}^n \Delta z_i = \sum_{i=1}^n \frac{z_i [\Delta e_i]}{(1 + e_0)}_i \tag{5.1.3}$$
$$= \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{(1 + e_0)} [C_{mi} \Delta \log(u_a - u_w) + C_{ti} \Delta \log(\sigma - u_w)]_i$$

donde

- $\sigma - u_a = \gamma_m * z + \Delta q$
- ρ = deformación total por expansión
- $\Sigma \Delta z_i$ = deformación por expansión del estrato i
- z_i = espesor inicial del estrato i
- Σe_i = cambio en la relación de vacíos del estrato i
 - = $(e_f - e_0)_i$
 - = $C_{mi} \log[(u_a - u_w)_f / (u_a - u_w)_0]_i$
- C_{mi} = índice de succión mátrica para cada estrato
- C_{ti} = índice de esfuerzo efectivo para cada estrato
- Δq_i = incremento de esfuerzo a una profundidad z por carga de losa
- σ = esfuerzo total

Aplicando este método al suelo que se está analizando y sustituyendo en la ec. (5.1.3) se tiene

Prof. 0.00 – 0.70m

$$\rho_{0.70} = \frac{70}{(1+1.16)} [0.056(3.497) + 0.0011(0.0297)] = -6.34 \text{ cm}$$

Prof. 0.70 – 1.40m

$$\rho_{1.4} = \frac{70}{(1+0.8133)} [0.0332(3.458) + 0.076(0.0385)] = -4.50 \text{ cm}$$

Prof. 1.40 - 2.10m

$$\rho_{2.1} = \frac{70}{(1+0.763)} [0.0156(3.35) + 0.0286(0.04265)] = -2.12 \text{ cm}$$

La deformación total por expansión considerando la carga de la losa es la sumatoria de cada uno de los estratos:

$$\rho_{total} = \rho_{0.7} + \rho_{1.40} + \rho_{2.10} = -13.02 \text{ cm}$$

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

El suelo potencialmente expansivo, cuando desarrolla su expansividad, causa muchos problemas a las construcciones, ocasionando pérdidas cuantiosas, por lo que es importante considerar el comportamiento de este tipo de suelos en el cálculo y diseño de las cimentaciones.

Existen numerosos métodos reportados en diversos medios, como el del oedómetro o la succión que ayudan a predecir la magnitud de la expansión. Es importante el análisis del suelo desde los cambios que presenta en su estructura interna ocasionados por incrementos de humedad lo cual se manifiesta macroscópicamente en un incremento de volumen; no dejando de lado que las deformaciones por expansión del suelo deben ser compatibles con las deformaciones en la estructura, así se atacará el problema de raíz.

En este trabajo se sugiere un método de análisis de interacción suelo-estructura basado en pruebas en el oedómetro y pruebas de succión, que consiste en determinar un coeficiente α_h por expansión, que introducido en el método de interacción suelo-estructura propuesto por Zeevaert (1973) nos prediga la magnitud de la expansión del suelo tomando en cuenta la estructura.

El método propuesto analiza el comportamiento del suelo desde los cambios que sufre en su estructura interna provocados por incrementos de humedad y los efectos que éstos producen en la cimentación, de manera que en los puntos de contacto entre el suelo y la estructura de cimentación se de un solo efecto donde interactúen ambas partes.

Al determinar el coeficiente de expansión por hidratación del suelo α_h , se observó que para cambios de humedad de la misma magnitud con diferentes humedades iniciales, no corresponden cambios de succión iguales, por tanto se considera que α_h varía con las condiciones iniciales de humedad del suelo. Tratando de relacionar α_h con otros parámetros se concluye que no se puede tener una idea clara del comportamiento de α_h para diferentes cambios de humedad sin considerar la humedad inicial del suelo.

Esto ocurre probablemente porque el suelo en condiciones secas o con humedades relativamente bajas tiende a experimentar un fuerte intercambio cátonico al someterse a incrementos de humedad; es decir tiene un alto potencial expansivo. No siendo así para suelos con humedades intermedias o muy altas, donde el suelo conserva más el equilibrio ante la presencia de incrementos de humedad y su intercambio cátonico disminuye casi en su totalidad.

De manera comparativa se analiza un ejemplo con el método propuesto en esta tesis y los métodos reportados en la literatura y que son ampliamente usados.

Con base en los resultados obtenidos de esta comparación se concluye que el método no está alejado de la realidad, y que solo falta comparar con mediciones hechas in situ. Los resultados son aceptables comparados con aquellos que arrojan los otros métodos.

Bibliografía

Fu Hua Chen; **FOUNDATIONS ON EXPANSIVE SOILS, *Developments in Geotechnical Engineering Vol. 12.*** Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.

Juárez Badillo E., Rico Rodríguez A., **MECÁNICA DE SUELOS**, Tomo I; Noriega Editores, Limusa; Ed. 3ª.

Lambe, Whitman; **MECÁNICA DE SUELOS**; Edit. Limusa, México D. F.

Nelson John D., Miller Debora J.; **EXPANSIVE SOILS, Problemas and Practice in Foundation and Pavement Engineering**; Edit. JOHN WILEY & SANS, INC.

O. Erol; Middle East. **Technological University, Ankara TURKEY; 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS.**

Pérez Rea Ma. De la Luz, **SUCCIÓN Y COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN SUELOS EXPANSIVOS DE JURICA Y TEJEDA, QRO. TESIS**; Facultad de Ingeniería, Querétaro, Qro. Junio de 1993.

Trejo Moedano Ángel; *Segundo Congreso de Ingeniería Civil en Querétaro, ponencia* **SUELOS EXPANSIVOS PROBLEMAS, SOLUCIONES**; Facultad de Ingeniería, UAQ, Colegio de Ingenieros Civiles de Querétaro; Agosto de 1992.

Zeevart W. Leonardo; **INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES Y PROFUNDAS, SUJETAS A CARGAS ESTÁTICAS Y SÍSMICAS**; Edit. Limusa, México 1980.

Zepeda Garrido José A. **CIMENTACIONES SOBRE ARCILLAS EXPANSIVAS**; División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Qro, México, Diciembre, 1986.

Zepeda Garrido José A. **EXPANSION Y COMPRESIBILIDAD DE ARCILLAS PARCIALMENTE SATURADAS, CURSO INTERNACIONAL DE MECANICA DE SUELOS**; Marzo de 1999.

Zepeda Garrido José A. **COMPORTAMIENTO DE ARCILLAS EXPANSIVAS**; Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Qro, México, Agosto, 1992.

ANEXO A

REGISTRO DE PRUEBAS EN LABORATORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS DE POSGRADO

TABLA A.1 RESUMEN DE DATOS IMPORTANTES OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN EL OEDÓMETRO

w% INICIAL PROM: 27.844%

NÚMERO DE PRUEBA	W(%) FINAL	ALTURA FINAL MUESTRA (CM)	VOLUMEN (CM ³)	CAMBIO DE VOLUMEN (CM ³)	SUCCIÓN (KPA)	CAMBIO DE SUCCIÓN (KPA)
P.I	27.844	1.92	84.877	0	11365	0
8	34.1	1.976	87.3392	2.4622	6819.755	4545.245
2	45.65	2.085	92.157	7.28	816.506	10548.494
4	62.91	2.2	97.24	12.363	3.7734	11361.2266
1	55.86	2.239	98.9638	14.0868	151.9485	11213.0515

CAMBIO DEHUMEDAD (W%)	DEFORMACIÓN (MM)	DEFORMACIÓN UNITARIA (ϵ)	PRESIÓN DE EXPANSIÓN (kg/cm ²)
0	0.00	0.000	0
6.256	0.56	0.029	0.852
17.806	1.65	0.086	1.48
35.066	2.80	0.146	8.237
28.016	3.19	0.166	11.44

Prof. (m)	Humedad natural (%)					
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
0.30	30.76	21.93	21.35	41.4	38.3	25.56
0.60	34.45	23.23	21.74	25.5	26.34	24.33
0.90	36.36	24.85	22.89	30.35	29.12	25.87
1.20	37.72	25.47	23.56	29.25	32.98	27.32
1.50	27.09	24.14	23.61	25.87	28.76	26.41
1.80	26.45	25.91	21.11	26.9	27.07	25.86
2.10	25.03	24.52	17.75	26.8	26.9	25.97
2.40	28.12	25.79	20.14	26.11	26.54	26.39
2.70	29.06	26.84	20.45	25.32	27.45	26.44
3.00	29.33	25.79	22	26.54	28.15	26.63

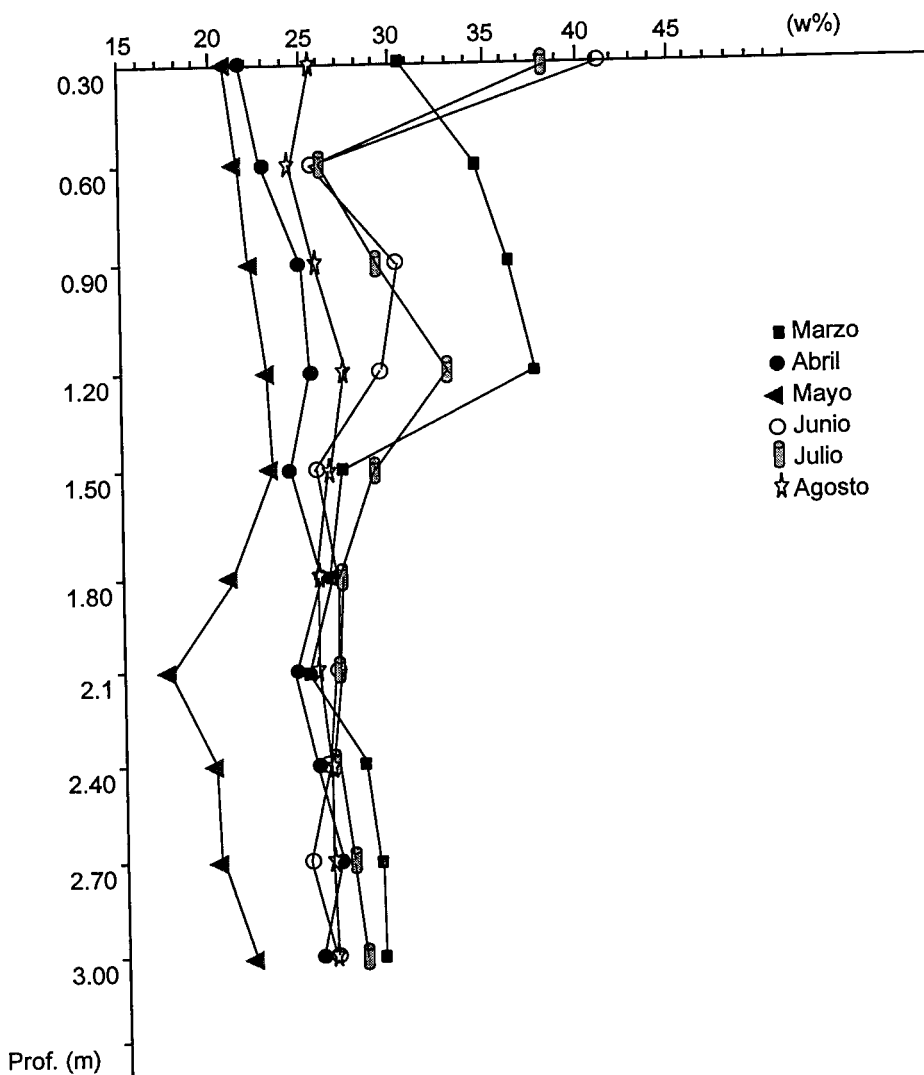


Fig. A.1 Perfiles de humedad de un suelo de Jurica en algunos meses del año.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS DE POSGRADO

PRUEBAS DE SUCCIÓN
LUGAR: FRACCIONAMIENTO JURICA
REALIZÓ: OSCAR CABRERA ARVIZU

No. ensay	Fecha entrada	Fecha salida	Flan. no.	W (gr) flanera	Wf+Wm	No. Papel	W papel seco a50°C	Wf+Wm+Wp +tapa (1)	Wf+Wsh+Wp +tapa (2)	Wpapel húmedo	Wflanera + suelo húm.	Wflanera + suelo seco	Wpapel seco
1	27-Abr-00	04-May-00	54a	130.1609	177.2907	6	0.1860	179.0833	179.0826	0.1905	177.2415	169.2664	0.174
						3	0.1885						0.181
2	28-May-00	06-Jun-00	72	120.9620	144.9149	53	0.1942	146.4521	146.4711	0.2087	144.8676	139.7602	0.184
						48	0.1842						0.173
3	28-May-00	06-Jun-00	51	121.0116	141.3746	47	0.1860	142.8942	142.8767	0.1991	141.3101	137.2351	0.176
						38	0.1854						0.174
4	28-May-00	06-Jun-00	100	119.1661	141.8821	31	0.1774	143.3600	143.3638	0.1832	141.8583	138.1857	0.174
						28	0.1755						0.161
5	28-May-00	06-Jun-00	20	125.1455	148.1530	9	0.1976	149.6530	149.6648	0.2039	148.1379	144.1929	0.191
						32	0.1772						0.171
7	02-Jun-00	09-Jun-00	29a	129.4220	180.7662	7	0.1908	182.3090	182.3227	0.2115	180.7660	168.6233	0.181
						5	0.1880						0.181
10	21-Jun-00	28-Jun-00	159	125.1345	164.1605	39	0.1813	165.9322	165.9390	0.2005	164.1076	155.2558	0.171
						2	0.1928						0.181
11	26-Jun-00	03-Jul-00	217	120.5580	180.8804	51	0.1812	182.6460	182.6738	0.1826	180.9255	174.5050	0.171
						30	0.1761						0.171
12	02-Jul-00	10-Jul-00	31a	130.0410	162.2730	41	0.1856	163.7368	163.6306	0.2338	162.0262	151.9788	0.171
						49	0.1803						0.171
15	05-Jul-00	13-Jul-00	17	121.2437	149.4373	44	0.1862	151.3244	151.2913	0.4132	148.8705	138.0325	0.171
						43	0.1878						0.171
16	05-Jul-00	13-Jul-00	42a	129.8030	159.7586	57	0.1880	161.4643	161.4033	0.4786	159.0410	147.3005	0.171
						12	0.1955						0.181
17	05-Jul-00	13-Jul-00	158	129.5079	169.7499	56	0.1902	171.5673	171.5018	0.2724	169.4460	154.8502	0.171
						45	0.1827						0.171
18	05-Jul-00	13-Jul-00	166	125.7371	159.7960	35	0.1775	161.5150	161.4066	0.4432	159.1086	145.8503	0.161
						52	0.1807						0.171