



**Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias**

**ESTUDIO DE FATIGA DE EXPANSIÓN
EN SUELOS ARCILLOSOS**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JOSÉ DE JESÚS TORRES GARCÍA

DIRIGIDO POR:

DRA. TERESA LÓPEZ LARA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO; ABRIL 2005

No. Adq. H69962

No. Título _____

Clas. TS

624.15136

T693e



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias

ESTUDIO DE FATIGA DE EXPANSIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

José de Jesús Torres García

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

SINODALES

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Secretario

M. en I. José Alfredo Zepeda Garrido

Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea

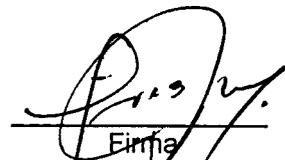
Suplente

M. en I. Julio César Leal Vaca

Suplente



M. en I. Gerardo Rene Serrano Gutiérrez
Director de la Facultad



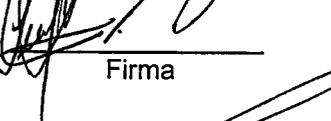
Firma



Firma



Firma



Firma



Firma

Dr. Sergio Quesada Aldana
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Abril, 2005
México

*"Es siempre útil el ejercicio de la humildad intelectual,
la imaginación, la prudencia y el sentido de observación.
Son armas que sirven para tratar con suelos y con hombres"*

Nabor Carrillo

RESUMEN

La fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento y secado fue descrita originalmente por Chen (1975), donde menciona que los pavimentos cimentados sobre arcillas expansivas sujetas a los cambios estacionales, tienen una tendencia a alcanzar un punto de estabilización después de cierto número de años. En este trabajo se reportan ensayos de fatiga de expansión a fin de evaluar los signos de este fenómeno que desarrolla un suelo expansivo después de varios ciclos de secado y humedecimiento en laboratorio. Para esto se ha escogido una arcilla negra con un alto potencial de expansión, ubicada en el Fraccionamiento Jurica, Querétaro; México. Tras determinar las propiedades índice del suelo, se realizan varios ensayos de fatiga de expansión utilizando el equipo de consolidómetro y un procedimiento experimental propuesto que cumple la normatividad actual. El proceso de secado se realizó mediante un horno electrónico a una temperatura constante que represente la media máxima de la zona donde se extrajo la muestra. Por tanto, este trabajo tiene como objetivo comprobar la existencia de este fenómeno en los suelos y sus posibles aplicaciones en la ingeniería práctica e investigación. En el total de ensayos realizados se describe una línea de tendencia que refleja la disminución del porcentaje de expansión unidimensional a medida que el número de ciclos de humedecimiento y secado aumenta. En los primeros ciclos se reflejan los valores máximos de porcentaje de expansión, que además del potencial expansivo, se ve reflejada la alteración de la muestra de suelo por el alivio de esfuerzos que ocurre en el muestreo. Finalmente, este trabajo reporta según los resultados del ensayo de fatiga de expansión; que efectivamente el suelo arcilloso utilizado sufre el fenómeno de fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento y secado, además de que el procedimiento propuesto para el ensayo cumple el fin planteado por lo que puede ser una herramienta suficiente y válida para observar dicho parámetro.

(Palabras clave: Suelos expansivos, porcentaje de expansión, fatiga de expansión)

SUMMARY

The fatigue of swelling by moisture cycles and drying was described originally by Chen (1975), where he mentions that the pavements foundation on expansible clays subject to the seasonal changes, have a tendency to reach a stabilization point after certain number of years. In this work are reported tests of fatigue of swelling in order to evaluate the signs of this phenomenon that an expansible soil developssafter several moisture and drying cycles in laboratory. For this a black clay has been chosen with a high expansion potential, located in Juríca, Querétaro; Mexico. After determining the index properties of the soil, there were carried out several tests of fatigue of swelling using the consolidometer equipment and a proposed experimental procedure that completes the current normativity. The drying process was carried out by means of an electronic oven at a constant temperature that represents the maximum average of the area where the sample was extracted. Therefore, this work has as an objective to check the existence of this phenomenon in the soils and its possible applications in practical engineering and investigation. In the total of tests carried out a tendency line is described that reflects the decrease of the percentage of one-dimensional expansion as the number of moisture and drying cycles increases. In the first cycles we could see the maximum value of percentage of expansion and that besides the expansible potential we could see the alteration of the soil sample by the relief of forces that occur in the sampling. Finally, as a result of the tests performed, this work reports that indeed the tested clay soil undergoes the phenomenon of fatigue of swelling by moisture and drying cycles, and that the proposed procedure accomplishes the outlined goal and, therefore, proves to the sufficient and valid tool to observe this phenomenon.

(Words key: Expansive soils, expansion percentage, fatigue of swelling).

A papá y mamá...

A Diana, Perla y Noemí...

A todos aquellos que han puesto su confianza en mí...

Azco Maitet Zaitut...

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Dios... por el don de la vida y brindarme la dicha de culminar en comunión una etapa más en mi crecimiento personal, académico y profesional. Así mismo por la alegría de haber encontrado en este tiempo a las personas, los momentos y las condiciones necesarias para continuar mi camino a paso firme... con la mirada al frente.

A mis padres... Jesús Torres Flores y Esther García Armenta, que en mi triunfo compartimos el fruto del cariño, esfuerzo y valores que con tanto aprecio y cariño me han inculcado a través de anécdotas y nuestras propias vivencias.

A mis hermanas... Diana, Perla y Noemí Torres García, que con el paso de los años hemos aprendido pese a todo, a mantenernos unidos sin importar el tiempo y la distancia, creando todas esas emociones que como hermanos compartimos en cada momento.

A la Dra. Teresa López Lara... por la constante motivación, apoyo y asesoría que como directora de la presente investigación ha tenido a bien brindarme.

A mis maestros... que mediante su cátedra y el compartir su experiencia, han contribuido a mi formación en el área de Mecánica de Suelos despertando el sentido de la docencia e investigación.

A mis compañeros... Adrián Minor, Jesús Celedón, Antonio Guzmán y Jorge Espítia, que la vida nos colocó momentáneamente en un mismo lugar en la búsqueda de un objetivo personal, así mismo; a Antonio Cueto, Elizabeth Cabrera, y Carlos Marín, que todos en conjunto hemos formado una hermandad.

A la Lic. Genoveva Meneses Salinas por su apoyo desinteresado en la búsqueda y encuentro del valor humano en todo lo que representa esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro... casa de formación académica, donde se me brindó la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al laboratorio de Mecánica de Suelos... y laboratoristas que en distintos espacios me brindaron su apoyo práctico durante la etapa experimental de esta investigación.

A la Universidad del Cauca, Colombia... Catedráticos y laboratoristas, con quienes tuve la oportunidad de aplicar y desarrollar en un proyecto de investigación la metodología y resultados de mi propia investigación.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han intervenido en alguna etapa de mis estudios de posgrado, y que he tenido la oportunidad de conocer en forma personal y afectiva... y compartir las vivencias de este tiempo. De antemano... Gracias.

INDICE GENERAL

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimiento	iv
Índice general	vi
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
1. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Definición de suelos expansivos	6
2.2 Distribución geográfica de los suelos expansivos	8
2.3 Propiedades físicas de los suelos expansivos	10
2.3.1 Génesis de las arcillas	10
2.3.2 Zona activa de los suelos expansivos	12
2.3.3 Humedad	14
2.3.4 Densidad seca	15
2.3.5 Propiedades índice	15
2.3.6 Fatiga de expansión	17
2.3.7 Factores que influyen en la expansión y contracción del suelo	18
2.3.8 Factores que desequilibran el suelo	21
2.4 Los mecanismos de la expansión	22
2.4.1 Historia y estado de esfuerzos "in situ"	22
2.4.2 Migración y transferencia del agua	24
2.4.3 Origen de los cambios de humedad	24
2.4.4 Variación de la profundidad del agua	25

2.4.5	Porcentaje de expansión	27
2.4.6	Presión de expansión	28
2.4.6.1	Norma ASTM D 4546-03	29
2.5	Reconocimiento y clasificación de los suelos expansivos	32
2.5.1	Caracterización mineralógica	33
2.5.2	Métodos indicativos	34
2.5.2.1	Límites de Atterberg	34
2.5.2.2	Límites de contracción	35
2.5.2.3	Expansión libre	35
2.5.2.4	Contenido de coloides	36
2.5.2.5	Predicción de expansiones – contracciones	36
2.6	Métodos de clasificación.	37
2.6.1	Método USBR	38
2.6.2	Método de la actividad	38
2.6.3	Determinaciones indirectas	39
2.6.3.1	Método del PVC	39
2.6.3.2	Succión del suelo	40
2.6.4	Método directo	41
2.7	Tipología de daños	41
3.	METODOLOGIA	46
3.1	Trabajo de campo	46
3.1.1	Localización del lugar de muestreo	46
3.1.2	Muestreo	48
3.2	Procedimiento propuesto para realizar el ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos.	49
3.2.1	Obtención de la muestra inalterada	49
3.2.2	Labrado de pastillas para anillos de consolidación	52
3.2.3	Montaje del anillo en el consolidómetro	54
3.2.4	Saturación y lectura de la expansión	56
3.2.5	Secado de la muestra	59
3.2.6	Ciclos posteriores	63

3.2.7 Cálculo de la expansión libre	65
3.2.8 Observaciones	67
4. RESULTADOS	68
4.1 Propiedades índice del suelo utilizado en los ensayos	68
4.2 Ensaye de fatiga de expansión No. 1	69
4.3 Ensaye de fatiga de expansión No. 2	73
4.4 Ensaye de fatiga de expansión No. 3	76
4.5 Ensaye de fatiga de expansión No. 4	79
4.6 Ensaye de fatiga de expansión No. 5	82
4.7 Ensaye de fatiga de expansión No. 6	84
4.8 Resumen de ensayos de fatiga de expansión	87
4.9 Comportamiento de la trayectoria de esfuerzos	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
5.1 Conclusiones	91
5.2 Recomendaciones	94
REFERENCIAS	96

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1 Países que reportan presencia de suelos expansivos (Chen, 1975)	9
2.2 Guía de estimaciones de probables cambios de volúmenes en suelos expansivos (Chen, 1975)	16
2.3 Clasificación de suelos expansivos de acuerdo a la HUD/FHA	16
2.4 Relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad (Chen, 1975)	35
2.5 Correlación del grado de expansión con el límite de contracción y contracción lineal (Chen, 1975)	35
2.6 Datos para estimar el probable cambio de volumen en los suelos expansivos (Chen, 1975)	38
2.7 Relación entre el potencial de cambio de volumen, PVC y la expansión resultante (Chen, 1975)	39
2.8 Tipología de daños por cambio de volumen del subsuelo bajo la edificación (Trejo, 1989)	44
4.1 Propiedades índice del suelo en estudio	68
4.2 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 1	70
4.3 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 2	74
4.4 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 3	77
4.5 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 4	80
4.6 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 5	82
4.7 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 6	85

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Distribución de casos reportados de arcillas expansivas (Zepeda, 1989)	8
2.2 Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda, 1989)	9
2.3 Zona activa de los suelos expansivos (López, 2002)	12
2.4 Fatiga de expansión (Chen, 1975)	17
2.5 Variación del contenido de agua con la profundidad (López, 2002)	26
2.6 Método A para determinar la presión de expansión "con expansión libre" bajo una presión de 1 kPa (ASTM, D 4546-03)	30
2.7 Método B para determinar la presión de expansión, con expansión por inundación, bajo la sobrecarga estimada in situ o alguna otra descarga de estructura (ASTM, D 4546-03)	31
2.8 Método C para determinar la presión de expansión, a volumen constante, inundando la muestra (ASTM, D 4546-03)	31
2.9 Daños que se presentan en una casa-habitación (Trejo, 1989)	42
3.1 Ubicación del Fraccionamiento Jurica dentro de la ciudad de Santiago de Querétaro	48
3.2 Obtención de una muestra una inalterada	50
3.3 Detalle del labrado de una muestra inalterada	51
3.4 Anillo de consolidación debidamente montado en el consolidómetro	56
3.5 Anillo de consolidación unido a sus extensiones inferior y superior	57
3.6 Pastilla de suelo una vez terminado el proceso de humedecimiento	59
3.7 Pastilla de suelo secada en horno a 100 ± 5 °C. Se observa un excesivo agrietamiento	60
3.8 Proceso de secado de una muestra de suelo a 30 °C después de someterla al proceso de humedecimiento	62
3.9 Pastilla de suelo en el interior del horno durante el proceso de secado. Se observan los primeros signos de contracción	63
3.10 Medición del diámetro de una pastilla de suelo mediante un vernier digital	65
3.11 Gráfica de las deformaciones (expansión), de una muestra de suelo durante el proceso de humedecimiento	66
4.1 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.1	71
4.2 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.1	71
4.3 Ensaye de fatiga de expansión No. 1	72
4.4 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.2	74
4.5 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 2	75
4.6 Ensaye de fatiga de expansión No. 2	76

4.7	Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.3	77
4.8	Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 3	78
4.9	Ensaye de fatiga de expansión No. 3	79
4.10	Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 4	80
4.11	Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 4	81
4.12	Ensaye de fatiga de expansión No. 4	81
4.13	Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 5	83
4.14	Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 5	83
4.15	Ensaye de fatiga de expansión No. 5	84
4.16	Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 6	85
4.17	Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 6	86
4.18	Ensaye de fatiga de expansión No. 6	86
4.19	Resumen de la tendencia de los ensayos de fatiga de expansión	87
4.20	Trayectoria de esfuerzos correspondiente a diversos ciclos de secado e hidratación	89

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

1.1 Antecedentes.

Los suelos expansivos han representado desde mucho tiempo grandes dificultades en el campo de la rama de construcción, debido a que ocasionan un sin número de daños que resultan demasiado costosos. Estos suelos expansivos suelen estar distribuidos en todo el mundo en regiones que presentan climas semiáridos, la característica principal que define su comportamiento es su estructura mineralógica, que es la que finalmente influye en su comportamiento fisicoquímico y mecánico.

El estudio sistemático y práctico de los suelos expansivos tiene una gran importancia en la actualidad en diversos centros de investigación. Alrededor del mundo muchos países se han visto afectados por el problema de las arcillas expansivas, y en algunos casos; aún no se ha reconocido la existencia del potencial expansivo del suelo en ciertas regiones por falta de información sobre el fenómeno. En la medida en que el crecimiento urbano y de las vías de comunicación ha puesto de manifiesto este problema, se han destinado recursos para la investigación en este campo.

El comportamiento del suelo arcilloso expansivo al ser hidratado ocasiona, en la mayoría de las estructuras ligeras, movimientos que se ven reflejados por la aparición de grietas en la estructura; no obstante no se deben descuidar algunos otros aspectos que puedan provocar asentamientos en las cimentaciones. Existen en la actualidad un sin número de técnicas que han sido propuestas para dar solución a la problemática que representa la existencia de suelos expansivos, entre ellas podemos mencionar: técnicas de estabilización con diferentes aditivos, prehumedecimiento del material, sustitución del material expansivo, etc.

Dentro de las técnicas de estabilización con sustancias químicas podemos mencionar a aquella utilizando cal, la cual ha sido empleada desde tiempos muy remotos con resultados satisfactorios en muchos casos.

Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones que provocan los aumentos de carga sobre el suelo que las soporta fueron identificados como las causas de los daños en las estructuras, sin embargo; el U.S. Bureau of Reclamation fue el primero en reconocer en 1938 el problema de la expansión de los suelos. La primera reunión internacional que abordó el tema de los suelos expansivos tuvo lugar en la Universidad de Texas A & M, en 1965, a la que han seguido otras similares.

En México, la investigación sobre suelos expansivos es relativamente reciente, en 1983 la Universidad Autónoma de Querétaro inició una línea de investigación tendiente a desarrollar conocimientos para atender la problemática originada por estos suelos en muchas regiones del país, y en particular a la ciudad de Santiago de Querétaro (López-Lara, 1995).

El acelerado crecimiento de las ciudades en los últimos 50 años ha ocasionado una gran demanda de vivienda en edificaciones livianas, la mayor parte de ellas en zonas planas y en terrenos cuyos estratos superiores están constituidos por arcillas de medio a alto potencial expansivo. Los daños que se han presentado en las edificaciones cimentadas superficialmente en estos terrenos se manifiestan progresivamente mediante fisuramientos, agrietamientos y giros de conjunto de los muros y elementos estructurales, a causa de movimientos desiguales de su cimentación, especialmente en los años de prolongados períodos de lluvias y estiaje, ocasionando considerables pérdidas económicas aún no cuantificadas, litigios y en algunos casos la demolición total de la edificación.

En los países desarrollados también se pierden grandes cantidades de dinero a causa de este fenómeno, ya que por una parte la práctica del diseño y

construcción está limitada por la falta de entendimiento del comportamiento de los suelos expansivos, especialmente la interacción suelo estructura, y por otra el costo de las soluciones de cimentación se incrementa considerablemente. El fenómeno es de tal magnitud y afecta a tantos países, que ya se han realizado ocho conferencias internacionales exclusivamente sobre el tema y muchas naciones han invertido recursos importantes en trabajos de investigación, que han conducido a la adopción de guías de diseño para las cimentaciones de edificaciones livianas en suelos expansivos (Villafañe y Coronado, 2000).

1.2 Justificación.

A pesar de que actualmente existe mucha información y estudios sobre el fenómeno de la expansión en suelos, los constructores y propietarios de viviendas (en general todo tipo de edificación), desconocen el alcance de los daños que la acción de los suelos expansivos puede ocasionar sobre una estructura. De igual forma solo conocen aquellos métodos que se han utilizado tradicionalmente para mitigar el potencial de expansión (sustitución parcial y desplante profundo de cimentación), que responden a las apreciaciones del personal de obra con experiencia, sin interferir ningún criterio estructural y mucho menos; la opinión de algún especialista en el tema. En ocasiones, esto puede resultar muy costoso y por lo tanto poco recomendable.

El afán de reducir costos ha llevado a utilizar materiales ligeros en la construcción de viviendas, lo que aumenta el potencial de daños causados por la acción de los suelos expansivos. El criterio de utilizar algún método de estabilización de suelos queda opacado por la idealización popular de que resultan incosteables, sobre todo en fraccionamientos de interés social. El conjunto de los criterios utilizados tanto por las empresas constructoras como por el propietario tienden a reducir el costo de construcción de una vivienda, sin embargo; en cada cambio estacional surgen los agrietamientos característicos causados por la expansión y contracción del suelo, mismos que será necesario corregir, causando gastos imprevistos que recaen en el bolsillo del propietario.

El criterio de fatiga de expansión estudiado por Chen (1975), expresa un comportamiento del suelo, en donde este disminuye su porcentaje de expansión a través de la ocurrencia de varios ciclos de humedecimiento y secado, que transportándolo a escala real; pretende correlacionarse con el paso anual de las temporadas de lluvias y estiaje.

Si bien es cierto que originalmente el concepto de fatiga de expansión se pensó para arcillas expansivas compactadas utilizadas en la construcción de vías terrestres, este concepto no se incluye en alguno de los métodos preventivos o en su caso; en los proyectos de remediación sobre estructuras ya dañadas. Lo anterior debe tener una justificación lógica y frente a esto resulta una interrogante el conocer qué tan representativo son los resultados obtenidos por Chen (1975), para arcillas expansivas de otra zona geográfica como las existentes en el valle de la ciudad de Querétaro, con fin de corroborar la ocurrencia del fenómeno de fatiga de expansión aún en el estado natural del suelo.

Si esto procede, indicaría que la fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento y secado podría contemplarse en el criterio del diseñador, ya sea para obras de nueva creación, o bien; proyectos de remediación en las diferentes estructuras en que se presentan los daños.

1.3 Objetivos.

Con relación a la génesis de la formación de los suelos, en específico el proceso geológico mediante el cual la erosión actúa sobre el macizo rocoso del cual pueden derivarse las arcillas, las características fisicoquímicas de las arcillas que se encuentran en el valle de la ciudad de Querétaro, y por tanto de otras zonas geográficas; son diferentes en su naturaleza a las arcillas utilizadas por Chen (1975). Y sumado a esto, el hecho de haberse utilizado arcillas remoldeadas para los ciclos de humedecimiento y secado, origina un tipo de suelo cuyo historial de esfuerzos parte de inicio. Condiciones que en su conjunto describen tipos de suelo diferentes.

De acuerdo a lo anterior, se puede esperar un número diferente de ciclos de secado – humedecimiento para que el comportamiento del suelo del valle de la ciudad de Querétaro se establezca de forma asintótica, si es que existe este comportamiento en dicho suelo; lo que resultaría que la fatiga de expansión se defina como una variable dependiente de las propiedades físicas y químicas del suelo que se esté tratando.

El objetivo de esta investigación consiste en realizar el procedimiento correspondiente al criterio de fatiga de expansión dispuesto por Chen (1975), en las arcillas expansivas de la zona. Analizar los resultados y compararlos con el reportado por el propio Chen (1975). De esta forma se indicará la probable aplicación de forma práctica en el criterio del proyectista local para las recomendaciones sobre la prevención o remediación de daños en las estructuras.

Asimismo, se definirá un método práctico apegado a la normatividad actual que describa las condiciones de los ciclos de humedecimiento y secado, que sirva como referencia para evaluar el criterio de fatiga de expansión de diferentes tipos de arcillas en las distintas zonas geográficas, siendo de esta forma comparables los resultados que se obtengan por medio del método propuesto.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Definición de suelos expansivos.

Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por cambios de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorilonita y un clima semiárido, donde la evapotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual (Zepeda, 1989).

La expansión, en cualquier tipo de suelo, se puede presentar por un alivio de esfuerzos, como el que provoca una excavación. En las arenas, la expansión por descargas suele ser muy pequeña y por ejemplo, en las arcillas de la Ciudad de México se presentan expansiones que deben tomarse en consideración para desarrollar un procedimiento constructivo que se encargue de evitar en lo posible las expansiones.

El fenómeno capilar que se presenta en los suelos es una causa de aumento de los esfuerzos efectivos (intergranulares), cuando en un suelo como las arcillas se pierde el agua por un proceso de evaporación, se genera la tensión capilar que provoca la contracción del suelo. Una vez que el suelo ha disminuido su volumen por secado, también podrá aumentar dicho volumen si se restituye agua al suelo, la cual romperá el efecto de la tensión capilar.

Los suelos expansivos generalmente no tienen problemas de capacidad de carga, sin embargo; son muy frecuentes los levantamientos de las estructuras en consecuencia de la falta de equilibrio de los esfuerzos internos que desarrolla el suelo con aquellos a los que es sometido, es decir; a la carga transmitida por la estructura (López-Lara, 2002).

Los cambios de volumen, ya sean debidos a modificaciones en el contenido de agua o a variaciones de la presión total que actúa sobre el suelo, dan como resultado una redistribución de esfuerzos del sistema suelo-estructura. Las presiones suelo-estructura que se originan pueden ser de importancia cuando también lo es la restricción del movimiento produciendo daños notables en las estructuras, si es que tal efecto no ha sido tomado en cuenta previamente.

Para que se manifieste el fenómeno de la expansión se necesita, además de la presencia de un suelo potencialmente expansivo; condiciones ambientales que generen cambios apreciables de humedad. Estas características se encuentran en regiones de clima monzónico, en donde las estaciones son muy marcadas y tienen periodos de sequía prolongados. Aunque con características diferentes, también aparecen en regiones semiáridas de las regiones con clima templado y tropical en donde el terreno se encuentra profundamente desecado y la evapotranspiración supera a la precipitación durante todo el año.

Algunas arcillas expansivas son al mismo tiempo suelos colapsables, es decir; para un estado de carga aplicada con pequeños aumentos de humedad se incrementa su volumen, pero con humedades mayores colapsa. Esto suele ocurrir sobre todo en arcillas con estructuras floculadas y flojas en las que muchas veces, aún después de haberse expandido; continúan apareciendo huecos causados por el proceso de agrietamiento (Pousada, 1984).

El problema de suelos expansivos fue objeto de estudio por los especialistas en suelos hasta finales de 1930, en EUA. Comúnmente, si el propietario de una edificación encontraba grietas en los muros, atribuía sus causas a una mala construcción o a un sistema de cimentación incorrecto para el tipo de suelo. Para 1940, el uso masivo de losas de cimentación en la construcción provocó el aumento de la manifestación de daños en las estructuras causados por suelos expansivos (Chen, 1975).

A partir de 1970, la Geotecnia en el ámbito internacional mostró un gran interés en los suelos expansivos. Los ingenieros de Canadá, Australia, Sudáfrica, Israel, EUA, y México han contribuido en gran forma al estudio y diseño apropiado de las estructuras apoyadas sobre suelos expansivos.

G. W. Donalson clasificó un patrón de materiales que pueden ser asociados con suelos expansivos en dos grupos. El primer grupo comprende las rocas ígneas. En estos suelos, el feldespato y los minerales piroxenos de las rocas se disgregaron para formar la montmorilonita y otros minerales secundarios. El segundo grupo corresponde a las rocas sedimentarias que contienen montmorilonita como un constituyente, en que las rocas se desintegran mecánicamente para formar los suelos expansivos (Chen, 1975).

Para que el problema de expansión se manifieste en mayor o menor grado, es necesario el conjunto que se describe a continuación:

- a) Un subsuelo compuesto de arcillas con propiedades expansivas.
- b) Cargas estructurales de reducida a mediana intensidad.
- c) Alteraciones en el contenido natural de humedad del terreno.

La magnitud del movimiento depende entonces de las propiedades físicas y químicas del suelo, de las características de la subestructura y del régimen hídrico de la región (Vallejos, 2000).

La realización inadecuada de obras tales como pavimentos, casas habitación, edificios comerciales y de servicios, provoca fallas en las estructuras debido al comportamiento inestable del suelo donde han sido apoyadas. Para comprender mejor el problema, debemos entender por "falla" las discrepancias entre los resultados esperados de un proyecto y lo que en la realidad se observa.

Tratándose de estructuras ligeras tales como casas habitación, en el proyecto se espera un adecuado comportamiento estructural sin deterioro ni defectos; y lo que se observa al cabo de un tiempo más o menos corto son ciertos desplazamientos y algunas deformaciones inexplicables, que en última instancia se manifiestan en la estructura mediante la aparición de grietas y desplomes en los muros, levantamientos de pisos y en algunas ocasiones daños en elementos estructurales (Trejo, 1989).

2.2 Distribución geográfica de los suelos expansivos.

Los suelos potencialmente expansivos se pueden encontrar en cualquier parte del mundo. En las naciones subdesarrolladas muchos de los problemas por suelos expansivos aún no han sido estudiados. Se puede esperar que conforme pase el tiempo se encontrarán más regiones con suelos expansivos, dependiendo del incremento en el número de construcciones. En la figura 2.1 se indican las zonas potencialmente expansivas, que son limitadas por regiones semiáridas de las zonas de climas tropicales y templados.

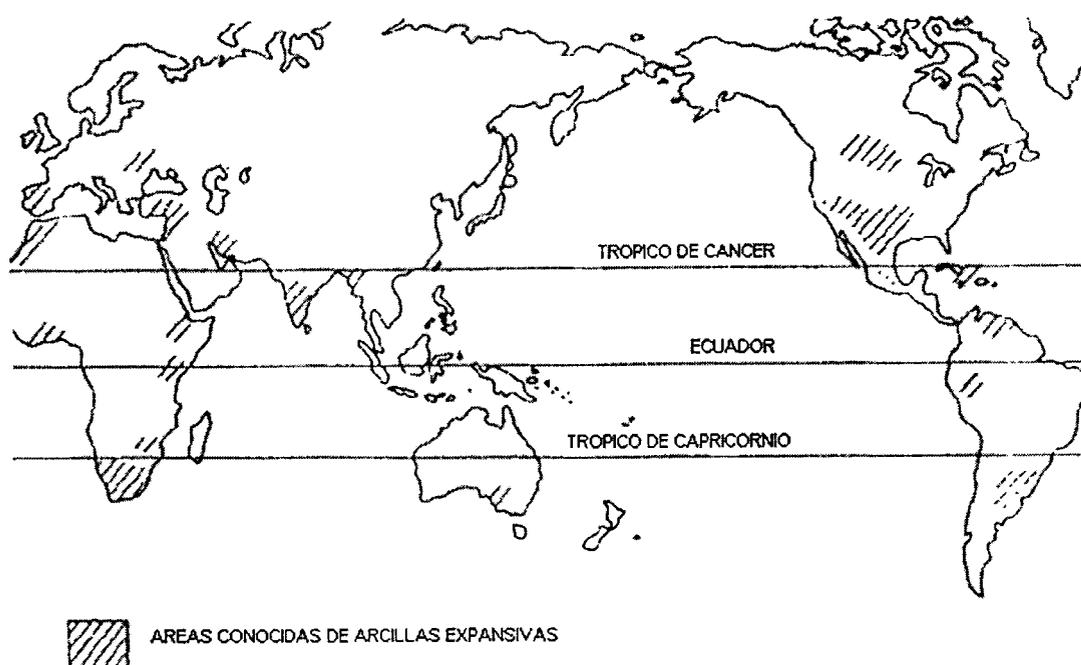


Figura 2.1.- Distribución de casos reportados de arcillas expansivas en el mundo (Zepeda, 1989).

En la tabla 2.1 se nombran los países en que se ha reportado la presencia de suelos expansivos.

Tabla 2.1.- Países que reportan presencia de suelos expansivos.

Angola	Cuba	Israel	Mozambique
Argelia	Ecuador	Irak	Myanmar
Argentina	España	Irán	Perú
Australia	Etiopía	Kenia	Rusia
Brasil	EUA	Malaba	Sudáfrica
Canadá	Ghana	México	Turquía
Colombia	India	Marruecos	Venezuela

Basándose en la zonificación de los suelos expansivos de la República Mexicana, posiblemente muchas otras ciudades de nuestro país y/o lugares cercanos a ellas tendrán problemas por este tipo de suelo. La figura 2.2 muestra las zonas afectadas por problemas de expansión de suelos.

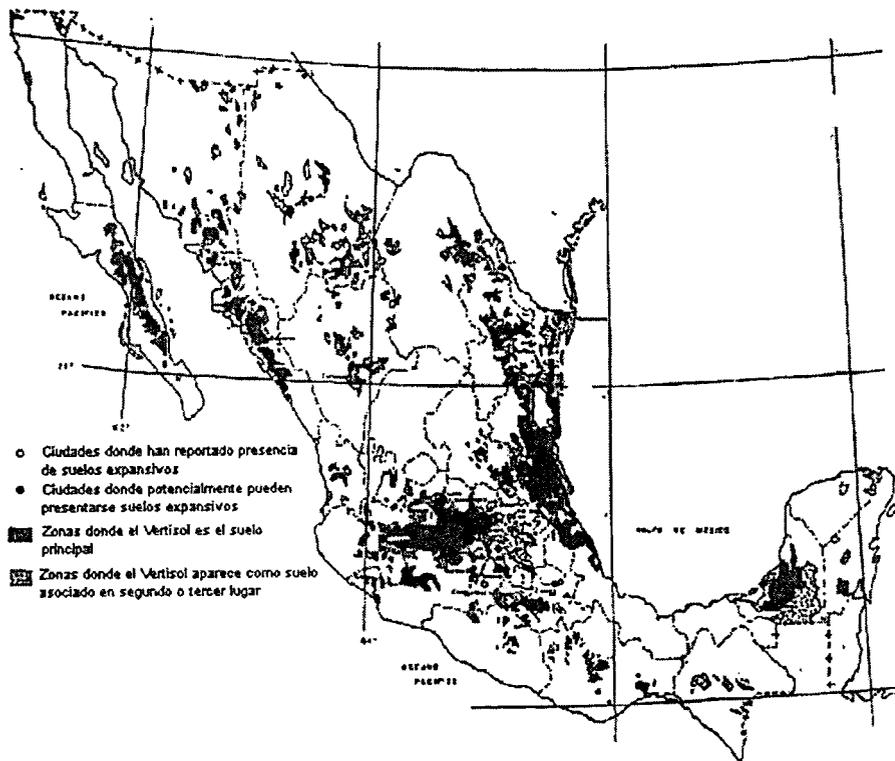


Figura 2.2.- Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda, 1989).

Aproximadamente un 12% de la superficie del país esta cubierta por depósitos arcillosos potencialmente expansivos (Zepeda, 1989).

2.3 Propiedades físicas de los suelos expansivos

Es de importancia para la Mecánica de Suelos conocer las características y proceso geológico de formación de los depósitos que constituyen los materiales del subsuelo, para visualizar el comportamiento de las masas en el campo. La desintegración mecánica produce fragmentos de roca, grava, arena y limo, es decir; divide la roca madre en sus fragmentos litológicos. La acción mecánica puede ser el resultado de movimientos terrestres, acción del hielo, viento y agua. La transformación química de los minerales que forman la roca, produce nuevas componentes mineralógicas que vienen a constituir desde materiales muy finos hasta coloides (Sánchez, 1979).

2.3.1 Génesis de las arcillas

Las arcillas se forman a partir de la alteración de rocas por meteorización, formando nuevas rocas y minerales pertenecientes a suelos de tipo sedimentario. Clasificados por su textura como clásticos, en ellas se mantienen ciertos materiales antígenos unidos por una matriz cementante. Así se determina la presencia común de cuarzo, carbonatos y feldspatos no alterados en las arcillas. El contenido de arcilla en un suelo o roca alterados es directamente proporcional a los factores climáticos incidentes.

Barbeta (2002) menciona que la cantidad de arcilla aumenta en función de la humedad y la temperatura, pasando a escala logarítmica para condiciones tropicales y subtropicales. Las principales propiedades de las arcillas que son de nuestro interés son:

a) Capacidad de intercambio de iones.

Las arcillas tienen capacidad de intercambio de iones con el medio acuoso, absorbiéndolos del agua o cediéndolos cuando los contiene en su composición. La mayoría de las arcillas pueden liberar álcalis, como el potasio y el sodio. Las arcillas más susceptibles de liberar álcalis son las montmorilonitas y versiculitas, siendo la caolinita e illita las menos peligrosas.

H69962

b) Plasticidad.

Las arcillas tienen la capacidad de absorber agua, convirtiéndose en un material coherente y moldeable, llegando incluso a comportarse como un fluido si absorbe suficiente cantidad de agua. Se dice que una arcilla es tanto más plástica cuanto más agua puede absorber sin convertirse en un fluido. Para cuantificar esta propiedad se han definido unos parámetros conocidos como límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico e índice plástico). Para el cálculo de dichos parámetros existen normas, como la Norma ASTM D4318.

c) Variaciones de volumen.

Al absorber agua, todas las arcillas aumentan de volumen en mayor o menor grado. Al secarse sucede lo contrario, sufren una retracción en su volumen, agrietándose con facilidad, fenómeno conocido como “shrinkage”. Este fenómeno es muy frecuente en las llamadas “arcillas expansivas” tales como la montmorilonita y la vermiculita, y mucho menos importante en la caolinita e illita.

d) Floculación.

Los cristales de arcilla suelen ser de forma plana. Con frecuencia no tienden a apilarse unos sobre otros, sino a unir los cantos con las caras, dando lugar a grumos de arcillas muy porosos con estructura abierta (Barbeta, 2002). Una arcilla no floculada necesitará menos agua que otra floculada para fluir dado que tiene menos espacio entre cristales. En cambio, una arcilla floculada se secará más fácilmente que otra no floculada y así tendrá menos riesgo de agrietarse.

En el suelo es poco habitual encontrar un solo tipo de arcilla; normalmente encontraremos una mezcla de varios tipos, aunque sí puede haber un tipo predominante. Por consiguiente las propiedades del suelo reflejarán el promedio de las propiedades de las arcillas que lo componen.

2.3.2 Zona activa de los suelos expansivos.

Los problemas de los suelos expansivos se producen generalmente como resultado de las fluctuaciones volumétricas que se presentan en un espesor de pocos metros, producto de las variaciones en el contenido de agua; el cual se ve influenciado por factores como el clima. Esta zona es generalmente definida como zona de fluctuación estacional o zona activa y no tiene el mismo espesor en un terreno desnudo que en uno cubierto por alguna construcción.

La variación de la humedad es máxima en la superficie, luego se amortigua con la profundidad para llegar a un punto en el cual el flujo estacional ya no afecta (figura 2.3). Por tanto, existe una profundidad definida de la capa activa, por debajo de la cual el suelo permanece estable.

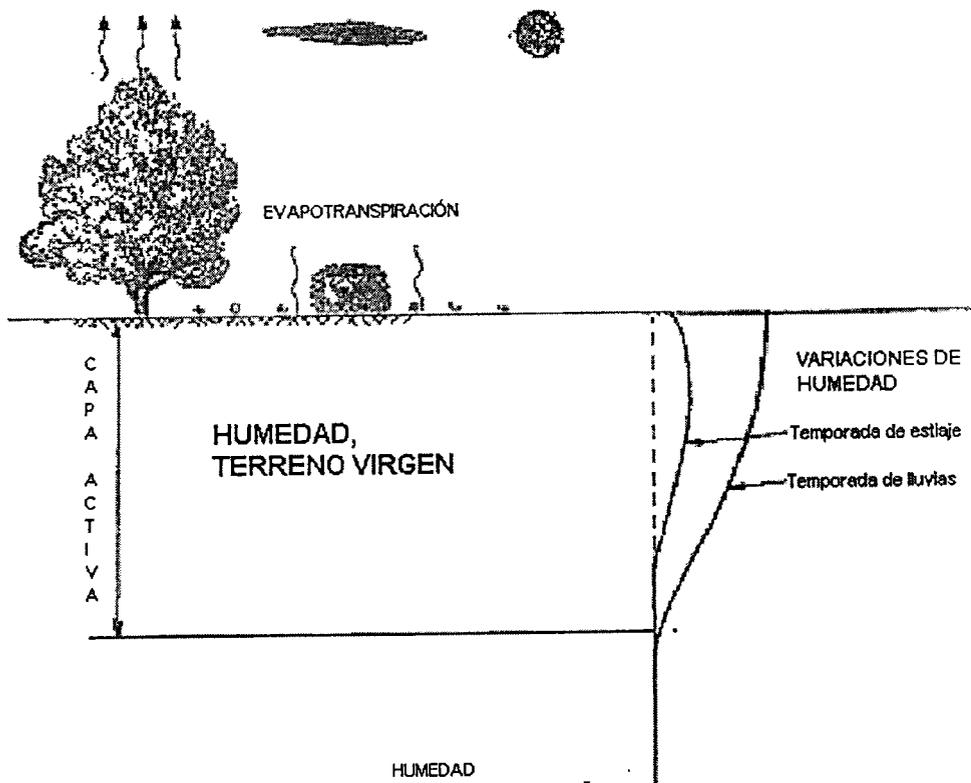


Figura 2.3.- Zona activa de los suelos expansivos (López-Lara, 2002).

Se debe señalar que los cambios de humedad en el suelo pueden tener diversos orígenes y no solo 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 (López- Lara, 2002).

La profundidad de variación de la humedad, por las estaciones del año, puede ser equivalente a la correspondiente a la zona activa si el material responde relativamente rápido a los cambios del clima. Sin embargo; la mayoría de los materiales no responden de esa forma, por tanto la profundidad de la zona activa generalmente es mayor que la profundidad por variación de la humedad estacional (Pérez, 1993).

La historia del clima se ve reflejada en la zona activa por los extremos más áridos del pasado. Con base en ciertas experiencias, se visualizan dos reglas para estimar la zona activa:

- a) Para perfiles de succión versus profundidad, donde se muestre un valor relativamente constante con la profundidad en los niveles más bajos, la profundidad de la zona activa se coloca en la parte más alta del rango constante.
- b) Para perfiles de succión versus profundidad, donde se muestren curvas de forma de S o Z con la profundidad, la profundidad de la zona activa se pone abajo del primer cambio importante de la succión del suelo, en magnitud.

En general no existe una regla universal aplicable para establecer la profundidad de la zona activa (Zepeda y Flores, 2002). El reglamento de construcción del estado de Querétaro, México; indica que puede considerarse profundidad de la zona activa aquella a la cual la diferencia de contenido de agua no difiera en mas de 1.0% en relación a una profundidad adyacente.

2.3.3 Humedad.

Para los especialistas en suelos es muy conocido que las arcillas en donde predomina la montmorilonita se expanden cuando se incrementa el contenido de agua, en tanto que en las arcillas donde la illita o caolinita predominan, la expansión se encuentra limitada. Sin tomar en cuenta el potencial de expansión, si la humedad de las arcillas permanece constante, no se producirán cambios de volumen; y las estructuras cimentadas sobre arcillas cuya humedad sea constante, no son sujetos a movimientos causados por expansiones. Cuando la humedad de la arcilla cambia, se genera la expansión vertical y horizontal.

No es necesaria una saturación completa para que se produzca la expansión, ya que un pequeño cambio en la humedad (del 1 al 2%), es suficiente para causar la expansión. En el laboratorio, se ha logrado expandir muestras de arcilla en el consolidómetro con pequeños cambios de humedad.

Se sabe que las viviendas apoyadas sobre suelos expansivos se agrietan cuando la humedad se incrementa debido a la humedad local. Si el suelo se satura (puede ser por el agua freática), la vivienda no está exenta de agrietarse. La humedad inicial de los suelos expansivos controla la cantidad de expansión. Esta afirmación se cumple en suelos no alterados y en estado remoldeado.

Las arcillas secas cuyo contenido natural de agua sea del 15%, pueden indicar mayor susceptibilidad a la expansión. Estas arcillas absorben fácilmente la humedad hasta en un 35% con resultados de expansión dañinos a las estructuras. Inversamente, las arcillas cuyo contenido de agua sea del 30% indican que puede darse una menor expansión (López-Lara, 2002).

Sin embargo; muchas arcillas se secan debido al bajo nivel freático o a otros cambios de condiciones físicas y subsecuentemente serán propensas a humedecerse, causando nuevamente el potencial de expansión.

2.3.6 Fatiga de expansión.

Chen (1975), expresa que una arcilla que en el consolidómetro se deja expandir completamente y luego se deja secar hasta su contenido de agua inicial para posteriormente saturarse nuevamente, repitiéndose para un número de ciclos, se ha notado que se presentan signos de fatiga después de cada ciclo de secado y saturado.

Se ha notado que los pavimentos cimentados sobre suelos expansivos, donde las arcillas muestran movimientos estacionales debido a aumentos de humedad y secado, tienen una tendencia a llegar a un punto de estabilización después de algunos años. La figura 2.4 muestra una curva de fatiga de expansión. La fatiga de expansión se ha investigado sobre pruebas de control de succión. La expansión durante el primer ciclo será más alta que los ciclos subsecuentes (Chen, 1975).

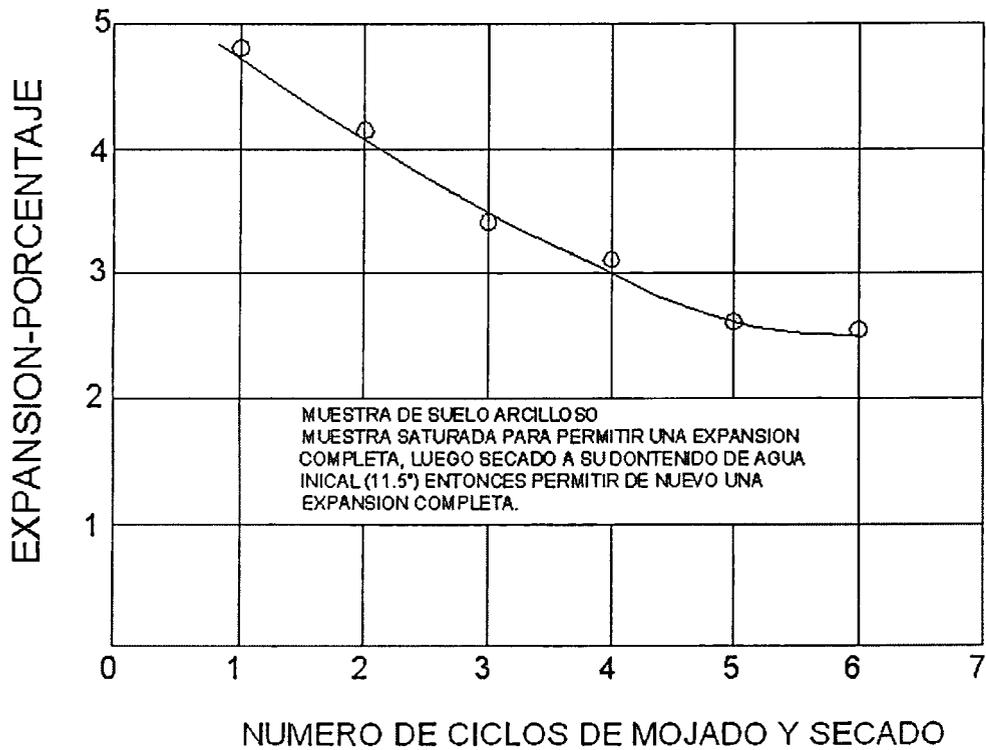


Figura 2.4.- Fatiga de expansión (Chen, 1975).

El fenómeno de fatiga ha sido estudiado por muchos años en el área de pavimentos, en los diferentes materiales que constituyen los componentes estructurales de los mismos. Sin embargo aunque algunos trabajos han sido reportados hace algunos años en el área de la Mecánica de Suelos, la fatiga por expansión es poco conocida. El problema en los suelos expansivos puede tratarse análogamente al problema de cargas repetidas en pavimentos, la diferencia estriba en que en los suelos expansivos, el cambio en el estado de esfuerzos se debe a cambios en las condiciones de humedad y no a cambios en la aplicación de cargas (Pérez y Castañón, 1999).

El fenómeno de fatiga por expansión no ha sido investigado completamente. Pérez y Castañón (1999), reportaron un trabajo sobre la evaluación en el laboratorio de la fatiga de expansión de un suelo de Querétaro. Durante el proceso de ensaye se realizaron mediciones de succión, se controló la temperatura y la humedad relativa.

En dicha investigación se utilizó el odómetro modificado en el cual se confina lateralmente el espécimen de manera que la expansión ocurre únicamente en el sentido vertical. Hasta la publicación de su artículo, se habían realizado cuatro ciclos de humedecimiento – secado. Las curvas que muestran los cambios de volumen en los diferentes ciclos reportan que el cambio de volumen disminuye conforme se aumenta el número de ciclos.

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

Los cambios de humedad que originan la expansión y contracción en un suelo expansivo, pueden ser inducidos por cambios climáticos, por la influencia de la temperatura y la vegetación, por la topografía, el tipo de estructura, la cimentación, infraestructura actual de la zona, fugas en tuberías de agua y drenaje, etc; 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; incluyendo las propiedades mineralógicas y químicas del suelo, que determinan la capacidad de contener agua absorbida en su estructura; así como las propiedades de plasticidad y densidad que son un reflejo de los factores a microescala que afectan su comportamiento. 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 de una décima de micra).
2. Las condiciones ambientales 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 los esfuerzos efectivos del suelo. En tiempo de estiaje el suelo expansivo experimenta una contracción en su estructura y el espaciamiento entre sus partículas es más cerrado.
3. El fenómeno de la succión que se presenta en los suelos es causa del aumento en los esfuerzos intergranulares; cuando en un suelo, como las arcillas, se pierde el agua por un proceso de desecación, se genera el aumento de la succión, provocando la contracción del mismo. Caso contrario, en época de lluvias, el suelo tiene un incremento en la humedad de la estructura, el espaciamiento entre sus partículas es mayor y se dan incrementos en su volumen. En estas condiciones, el potencial de expansión, la capacidad de absorción de agua y la succión disminuyen, hasta llegar a ser prácticamente nulos. 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 se basan en la 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.

4. La topografía del terreno es un punto importante a considerar en estructuras cimentadas sobre suelos parcialmente saturados con altos contenidos de mineral 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. La historia geológica de esfuerzos a que el suelo ha estado sometido influye considerablemente en la magnitud del cambio de volumen para una humedad y densidad dada. 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 para alcanzar dicho equilibrio.

Las arcillas floculadas tienden a ser más expansivas que las arcillas dispersas. 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 (López-Lara, 2002).

Un suelo preconsolidado es más expansivo que el mismo suelo en la misma relación de vacíos, pero normalmente consolidado. La presión de expansión puede crecer conforme la edad geológica de las arcillas, pero se ha demostrado que esto no afecta la cantidad de expansión bajo cargas ligeras.

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 de ésta. 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 agua, presentan expansiones que deben tomarse en consideración; además de los cambios de humedad que sufre el suelo al estar expuesto al medio ambiente.

2.3.8 Factores que desequilibran el suelo.

Cuando el hombre interviene el terreno, altera el equilibrio que la naturaleza establece entre el suelo, la vegetación y el clima. Al edificar, o simplemente cubrir el terreno, se interrumpe su equilibrio pues se altera el gradiente térmico existente en el subsuelo y se producen fenómenos de migración de agua y acción capilar. Esto ocasiona un aumento desigual de la humedad en la zona activa, el cual es menor en el centro del área cubierta, y por lo tanto se produce una expansión desigual del terreno.

En terrenos de intensa dinámica fluvial el cambio estacional del clima produce fluctuaciones del nivel freático que también ocasiona cambios de humedad/succión desiguales en el subsuelo. En las zonas donde hay evidencias que existen paleodrenajes en el subsuelo, el gradiente hidráulico en ellos es más alto y la humedad del terreno se incrementa durante la temporada lluviosa, ocasionando expansiones desiguales del terreno. La vegetación y especialmente las raíces de los árboles ornamentales que se siembran al urbanizar los terrenos, al extraer el agua que necesitan para su supervivencia rompen con el equilibrio de humedad en el subsuelo. En los meses del año en que la evapotranspiración excede a la precipitación se reduce desigualmente la humedad de la zona activa. Se presenta mayor reducción de humedad en las áreas descubiertas y con mayor vegetación, mayor succión y por lo tanto se produce una mayor contracción del terreno en estas áreas.

Se han reportado casos de asentamientos producidos por árboles cuando han sido sembrados en las cercanías de las edificaciones, y el suministro de agua es deficiente ya sea por el clima o por reducción excesiva del área descubierta expuesta a la lluvia. La sustitución selectiva de los árboles ha restablecido el equilibrio dinámico del subsuelo y ha detenido el proceso de desecación y asentamiento (Villafañe y Coronado, 2000).

Otro de los factores que desequilibra la humedad/succión del suelo, es el movimiento de tierras que se realiza previo a la construcción de las edificaciones. Primero se retira la capa vegetal, la cual debido a su baja permeabilidad protege al subsuelo de la evaporación y de la infiltración. Seguidamente se coloca una o varias capas de un material granular. En muchos casos se reemplaza la capa vegetal por terraplenes, dejando al terreno en condiciones críticas para el control de los cambios de humedad, pues la evaporación aumenta en la época de estiaje y la infiltración se incrementa en la temporada de lluvias.

Las fugas de las redes de agua potable y alcantarillado se acumulan en el relleno y también incrementan las expansiones diferenciales de la zona activa (Villafañe y Coronado, 2000).

2.4 Los mecanismos de la expansión.

2.4.1 Historia y estado de esfuerzos “in situ”.

En la mecánica de suelos clásica que considera la ley de esfuerzos propuesta por Terzaghi, aplicable al caso de suelos saturados, resulta relativamente sencilla la determinación del esfuerzo total, la presión de poro y; por la diferencia entre ambas presiones, el esfuerzo efectivo. La historia de esfuerzos toma importancia a través de la carga de preconsolidación que identificamos en la curva de compresibilidad de suelos finos, que se considera como la carga máxima a la que ha sido consolidado un suelo en su historia geológica.

Se dice que un suelo es normalmente consolidado cuando la carga de preconsolidación que se obtiene de la curva de compresibilidad resulta del mismo rango que el esfuerzo vertical efectivo actual estimado "in situ"; si resulta que el esfuerzo efectivo actual es inferior que la carga de preconsolidación determinada experimentalmente, entonces se asigna al suelo el término de "preconsolidado".

La historia de esfuerzos para un suelo fino no saturado resulta más compleja que la del suelo saturado y que lo ha sido así siempre. En el caso particular de los suelos expansivos existen, además del efecto del peso propio del material, el de los cambios estacionales, tanto el que puede ser consecuencia de situaciones recientes; como también los procesos acaecidos desde su origen y los efectos climáticos y ambientales que dejan testimonio de ciclos de hidratación y deshidratación ocurridos miles de años atrás, con la consecuencia de contracciones y expansiones y del agrietamiento sufrido por la desecación, la influencia de la vegetación, pastos, árboles y diversas plantas que se pueden desarrollar en la superficie del suelo. Además, la superficie del suelo de hoy no existía antes. El suelo arcilloso formado hace miles de años, pudo estar expuesto a condiciones ambientales y climáticas diferentes a las del presente.

La predicción de las expansiones o asentamientos de un suelo, requiere del conocimiento de las condiciones de esfuerzo presentes in situ y de las que se tendrán en el futuro. La diferencia entre ambas dará como resultado el cambio de volumen que podrá ocurrir, de ahí la relevancia de conocer apropiadamente las condiciones del estado de esfuerzos prevaleciente en un momento dado in situ.

A partir de pruebas realizadas en el oedómetro, es factible lograr un acercamiento al valor de los esfuerzos in situ. Evidentemente, en la medida en que se logren obtener muestras representativas del suelo, los resultados experimentales serán satisfactorios y confiables. Dicha labor no es sencilla a causa del agrietamiento que les caracteriza (Zepeda y Flores, 2002).

2.4.2 Migración y transferencia del agua.

La migración del agua depende de la formación geológica, las condiciones climatológicas, las características topográficas, tipo de suelo y el nivel freático. Comúnmente la migración del agua se realiza por gravedad. La filtración del agua superficial, precipitación, y el derretimiento de nieve son algunos ejemplos. La migración del agua se desplaza en todas direcciones. Dependiendo de las condiciones del nivel freático, el flujo puede ser ascendente. En arcillas rígidas y en pizarras de la capa rocosa, el flujo se presenta en capas planas o en fisuras y fracturas continuas. Las grietas de contracción que se desarrollan debido al secado superficial crean un fácil acceso del agua hacia el subsuelo.

En suelos naturales el contenido de agua de suelos parcialmente saturados, generalmente se encuentra en equilibrio con la cantidad de evaporación y transpiración en la superficie del terreno. Cuando el área se cubre por edificios o pavimentos, la evapotranspiración es eliminada generando un equilibrio más estable. Este nuevo equilibrio requerirá el flujo de agua o una humedad compatible con las nuevas condiciones. Las fuerzas que se generan con el cambio de humedad se llaman succión del suelo.

2.4.3 Origen de los cambios de humedad.

Los cambios de humedad del suelo se derivan principalmente por el agua superficial, causando la ascensión del nivel de agua freática por medio de la infiltración. Las fuentes de donde proviene el agua superficial son las siguientes:

a) Precipitación.

Antes de construir cualquier conjunto habitacional, la precipitación escurre libremente, infiltrándose al suelo una pequeña porción de la precipitación. Con la construcción de un edificio, la precipitación se filtra por medio del suelo que generalmente queda flojo alrededor del edificio, además de que el escurrimiento natural se llena de obstáculos, acumulando agua en ciertos sectores en lugar de salir del sitio.

b) Riego de césped.

Después de que se completa la construcción del edificio, el riego de césped crea condiciones de ascensión del nivel de agua freática. Es lógico pensar que una gran cantidad del agua de riego se infiltrará a través de los suelos superiores y quedará atrapada en la superficie del estrato rocoso. Este problema se acentúa con el hecho de que la mayoría de los propietarios utilizan un exceso de agua para el riego del césped, alterando las condiciones naturales del suelo.

c) Fugas en las líneas de tuberías.

Normalmente este tipo de problemas se manifiestan mucho tiempo después de haber iniciado, porque el suelo tenderá a saturarse y la cimentación opone una cierta resistencia a los primeros indicios de expansión, sin embargo; al continuar la saturación del suelo, llegará a un punto en que la expansión ya desarrolló problemas en la estructura (grietas en pisos y muros). Algunos investigadores proponen que las tuberías de agua potable y drenaje, sean revestidos con algún tipo de aislante (como el poliducto) que evite la infiltración del agua en el suelo.

2.4.4 Variación de la profundidad del agua.

Kraynski explicó la relación del contenido de agua con la profundidad, en un suelo homogéneo (figura 2.5). Una curva (1) muestra el perfil de humedad para una área cubierta, en este caso no existen cambios atmosféricos. El contenido de agua del suelo disminuye con la profundidad. Una segunda curva (2) indica la variación del contenido de agua con la profundidad en la misma área; en condiciones naturales (sin recubrimiento).

La evaporación genera pérdida de agua en el suelo más superficial. Sin embargo; la influencia de la evaporación decrece conforme aumenta la profundidad (H_d) y en algunos casos el contenido de agua permanece en equilibrio. Kraynski llamó a esta profundidad como "profundidad de secado". El valor H_d (figura 2.5), depende de las condiciones climatológicas, tipo de suelo y la localización del nivel freático.

Esta profundidad representa el espesor del material que tiene un potencial de expansión. Sin embargo, no es fácil determinar el valor de H_d . En los climas más extremos, la profundidad de secado es mucho mayor. La profundidad máxima H_d es igual al nivel freático, y la profundidad mínima es la que se genera por la variación temporal del contenido de agua.

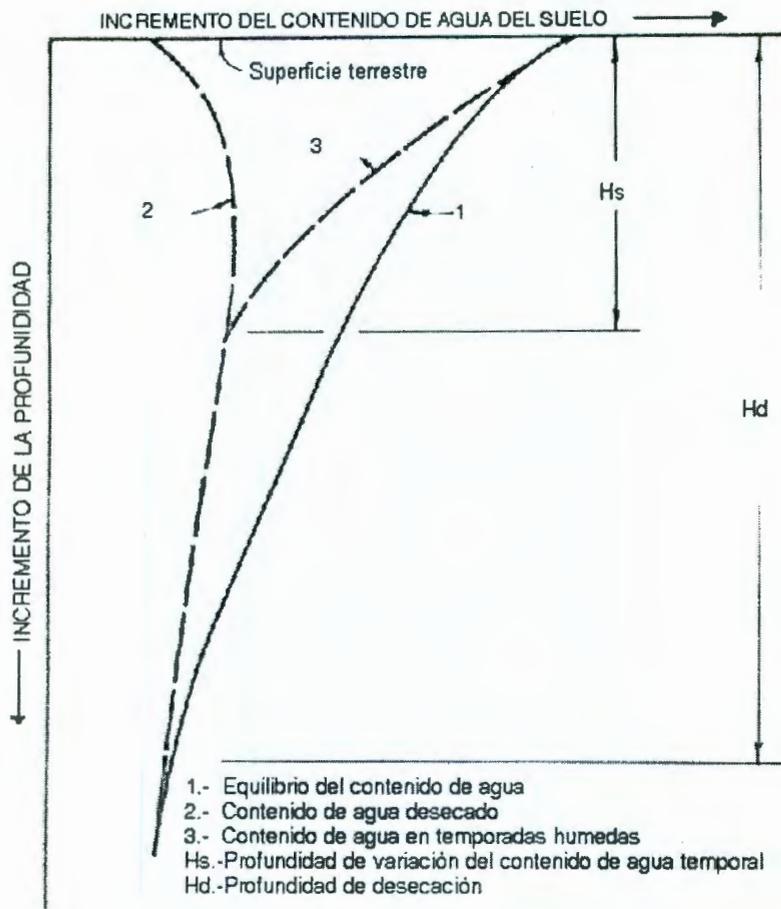


Figura 2.5.- Variación del contenido de agua con la profundidad (López, 2002).

Durante la temporada de lluvias el contenido de agua superficial se incrementa y el perfil de la humedad descrito por la curva 2 se altera para formar la curva 3. La parte alta de la curva 3 puede extenderse más allá de la curva 1 en temporadas muy lluviosas y detrás de la curva 2 en la temporada de sequía. La variación del contenido de agua (H_s), indicado en la figura 4 depende de la

variación de humedad en la superficie, la permeabilidad del suelo y las condiciones climatológicas. En lugares donde la precipitación y la evaporación son constantes, la profundidad H_s puede ser de apenas unos centímetros. Después de una larga sequía, con las primeras lluvias, la profundidad H_s puede llegar a más de 3 m.

Debe notarse que la evaluación de la profundidad H_s indicada en la figura 2.5, no considera el ambiente artificial. Esto es el regado de pasto, formación de canales de drenaje y pantanos, así como la posibilidad de fugas en líneas de agua potable y drenaje. No es raro que la profundidad H_s alcance hasta 7.6 m. Cuando los suelos son cubiertos, la evaporación es bloqueada o parcialmente retardada. La humedad bajo del área cubierta se incrementa por migración gravitacional y capilaridad, y en el transcurso de varios años; la variación de la profundidad del contenido de agua temporal H_s puede acercarse a la profundidad de secado H_d , la cual queda definida por el concepto de capa activa.

El cambio de las condiciones naturales del perfil de humedad de un suelo expansivo representados por las curvas 1, 2 y 3 en la figura 2.5, son la causa de daños para condiciones de suelos cubiertos. Cuando la transferencia es un proceso lento, no es raro que los daños a los edificios aparezcan tiempo después de ser ocupados.

Durante la realización del peritaje de un edificio agrietado, no es común encontrar incrementos en el contenido de agua del suelo bajo el área cubierta o en las colindancias del área del edificio.

2.4.5 Porcentaje de expansión.

El potencial expansivo, sirve para medir el grado de expansión que puede presentar el suelo cuando se apoye una edificación sobre él. Existen dos parámetros que lo identifican: el porcentaje de expansión y la presión de expansión. En la prueba de consolidación definimos el porcentaje de expansión como la ecuación 1.

$$S\% = \frac{\delta}{h} \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde:

S% = Porcentaje de expansión.

δ = Expansión generada en el espécimen cuando se satura.

h = Altura.

2.4.6 Presión de expansión.

La presión de expansión definirá el esfuerzo necesario para regresar el espécimen, mediante sucesivos incrementos de carga, a la condición de volumen inicial. El mecanismo para realizar la prueba depende de la visión que sobre el fenómeno expansivo posea el investigador, esto provoca diferencias que giran principalmente alrededor de los siguientes aspectos:

- Alteración de la muestra.
- Tiempo de ejecución.
- Carga inicial sobre el espécimen.

Basándose en el argumento de que la estructura del suelo arcilloso define su comportamiento mecánico, muchos autores exigen que la muestra deba llegar inalterada al anillo de consolidación conservando su humedad natural; piden que los experimentos sean realizados con un peso específico seco constante por ser ésta la única condición que afecta al potencial de expansión. La forma de saturar la muestra incide en la duración de la prueba, ésta será rápida si se inundan las vasijas del consolidómetro; y lenta si se permite que el agua penetre por acción capilar en todos los poros de la pastilla (mínimo 72 hrs).

Por la premura en la entrega de resultados, en ocasiones el analista desprecia el efecto que la entrada rápida del agua en el espécimen tendrá sobre el potencial de expansión. La prueba en este caso, dará un potencial de expansión menor al que daría si el agua penetrara lentamente.

Las cargas iniciales propuestas para la prueba varían de 0.01 a 0.10 kg/cm², el valor más pequeño corresponde al procedimiento seguido por Jennings y fundamentado en el hecho de que una carga inicial mayor cerraría las fisuras naturales de la muestra, impidiendo la completa penetración del agua y alargando el tiempo de ejecución de la prueba, esto conduce a expansiones mayores a las reales, ya que la pequeña carga inicial descomprime la muestra.

En opinión de otros autores, es suficiente con impedir que la muestra se desmorone por efecto del humedecimiento, o bien; a través de incrementos sucesivos (dos o tres) llega a una carga inicial equivalente a la que tendría la muestra "in situ". Otra recomendación para la realización de la prueba es la propuesta hecha por Zepeda (1986); en ella se contemplan dos etapas:

1. Obtención del porcentaje y presión de la expansión.
2. Verificación del valor de la presión calculada en la etapa.

El porcentaje de expansión servirá para calcular la expansión máxima que sufrirá un estrato de suelo, por otro lado, la presión de expansión es útil para determinar si un suelo sufrirá expansiones o contracciones dependiendo de si la presión ejercida por el edificio es menor o mayor que dicha presión de expansión.

Ante la incertidumbre que provoca el hecho de que las muestras obtenidas correspondan a las condiciones de humedad iniciales de la obra, los resultados obtenidos de las curvas de compresibilidad deberán verse como información cualitativa más que cuantitativa (Luna, 1988).

2.4.6.1 Norma ASTM D 4546-03.

La norma D 4546-03 ASTM (American Society for Testing and Materials) presenta los métodos estandarizados para determinar la presión de expansión, a partir de pruebas en el odómetro. Esta norma considera tres métodos para suelos que al iniciar no se encuentran saturados.

Método A. Se inunda el espécimen y luego se permite la expansión vertical, bajo una presión de 1 kPa, considerando el peso de la piedra porosa y la placa de carga. Así se ha de llegar a completar la expansión primaria. Posteriormente se aplica carga a la muestra hasta llevarla a su relación de vacíos inicial (fig. 2.6).

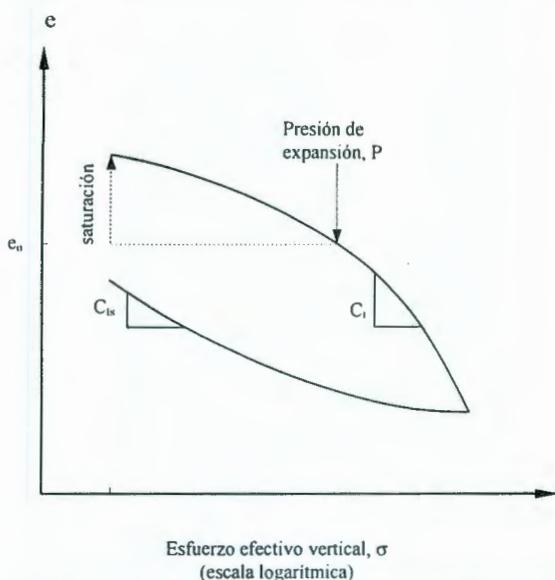


Figura 2.6.- Método A para determinar la presión de expansión "con expansión libre" bajo una presión de 1 kPa (ASTM, D 4546-03).

Método B. Se aplica una carga vertical al espécimen, la cual puede ser la sobrecarga vertical "in situ" o una carga mayor. Posteriormente se permite el acceso de agua. Las consecuencias pueden ser varias, expansión; contracción; expansión y luego contracción; contracción y luego expansión. La cantidad de expansión o asentamiento se mide hasta que resulta despreciable el volumen del suelo bajo la carga aplicada. Esto se muestra gráficamente en la figura 2.7.

Método C. Se evita la expansión del suelo al generarse su hidratación. Se realizan los ajustes necesarios hasta que se tienen una presión máxima (presión de expansión), la cual se ha obtenido a volumen constante. Posteriormente se lleva a cabo una prueba de consolidación. Si se desea conocer la expansión después de haberse definido la presión de expansión, se puede descargar al suelo, en esta forma se conocerá el potencial de expansión (fig. 2.8).

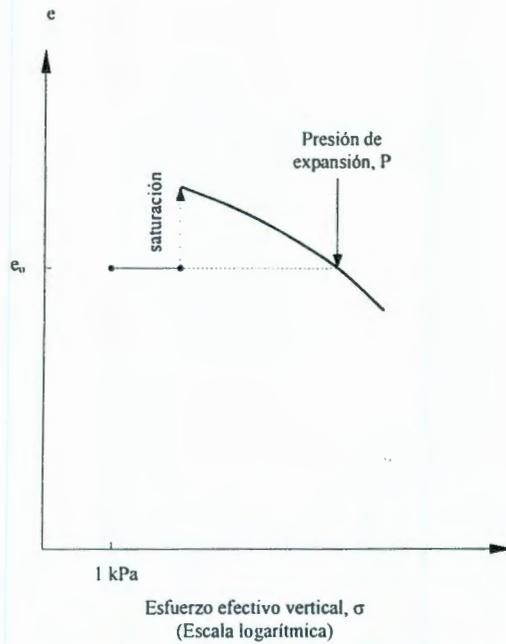


Figura 2.7.- Método B para determinar la presión de expansión, con expansión por inundación, bajo la sobrecarga estimada in situ o alguna otra descarga de estructura (ASTM, D 4546-03).

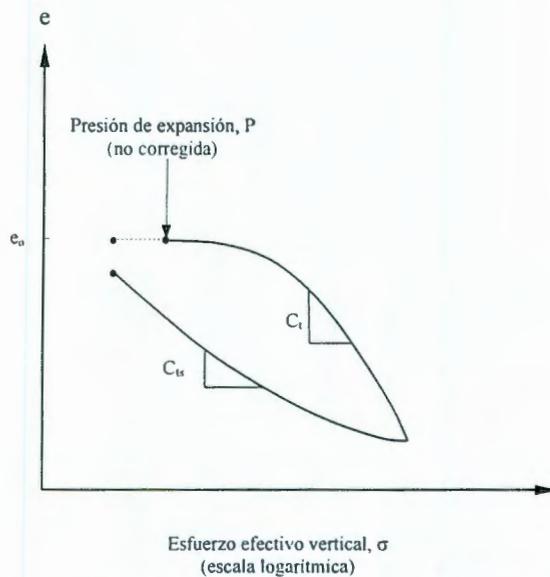


Figura 2.8.- Método C para determinar la presión de expansión, a volumen constante, inundando la muestra (ASTM, D 4546-03).

Cuando se realizan las pruebas en suelo inalterado no saturado, el método A permite determinar la expansión libre o porcentaje de expansión, así como también la presión de expansión. El método B permite conocer el porcentaje de expansión a asentamiento para una cierta presión vertical, que puede ser la asociada al sitio, también se determina la presión de expansión. Para el caso del método C, se puede encontrar la presión de expansión, la carga de preconsolidación y el porcentaje de expansión o asentamiento dentro de cierto rango de esfuerzo vertical aplicado (Zepeda y Flores, 2002).

2.5 Reconocimiento 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 del suelo.

En el caso de los suelos expansivos, en un terreno que recientemente haya perdido humedad y no se manifieste 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. Sanchez (1979) Menciona que de acuerdo a la naturaleza de las observaciones se pueden agrupar dos métodos diferentes para el reconocimiento de los suelos expansivos:

- a) Los métodos indirectos han sido utilizados para obtener parámetros de expansión, como son el porcentaje de expansión y la presión de expansión, a partir de la correlación con las propiedades índice como límites de consistencia, densidad, contenido de humedad y parámetros de succión.

- b) Los métodos directos son los mas satisfactorios y convenientes desde el punto de vista de ingeniería para estudiar los parámetros de hinchamiento del suelo en función del concepto de potencial de expansión.

2.5.1 Caracterización mineralógica.

La composición mineral de los suelos expansivos tiene una importante influencia sobre el potencial de expansión. 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. Por consiguiente, el identificar los constituyentes mineralógicos de la arcilla puede ayudar a conocer tentativamente el potencial de expansión. Algunas técnicas que pueden utilizarse para la identificación se enumeran a continuación.

La Difracción de Rayos X (DRX), 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), análisis térmico gravimétrico (GTA) 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) y, comparados con minerales puros, se 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), aunque sus resultados sugieren 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 y la dispersión eléctrica de radio de frecuencia, son otros métodos utilizados con los mismos fines.

El método mas utilizado en la caracterización de suelos es el de rayos X; sin embargo, se recomienda la combinación de varios métodos para obtener resultados realmente confiables.

2.5.2 Métodos indicativos.

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

En la práctica de ingeniería, la identificación más utilizada en proyectos se basa 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: límites de Atterberg, límites de contracción, expansión libre y el contenido de coloides.

2.5.2.1 Límites de Atterberg.

Holtz y Gibbs 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 del aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, la cual se satura bajo una sobrecarga de 1 lb/plg^2 (0.0703 kg/cm^2) después de ser compactada a su peso específico máximo en la humedad óptima, de acuerdo a la prueba AASHTO. Puesto que el límite líquido y la expansión dependen de la cantidad de agua que absorbe la arcilla; la relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad de las arcillas se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4.- Relación entre el potencial de expansión y el índice de plasticidad (Chen, 1975).

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

2.5.2.2 Límites de contracción.

El límite de contracción es una frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, definido como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando. El potencial de expansión es indirectamente proporcional a la contracción lineal. Altmeyer sugirió varios valores de límite líquido y contracción lineal, a manera de una guía para la determinación del potencial de expansión (tabla 2.5).

Tabla 2.5.- Correlación del grado de expansión con el límite de contracción y la contracción lineal (Chen, 1975).

Límites de contracción (%)	Contracción lineal (%)	Grado de Expansión
Menor que 10	Mayor que 8	Crítico
10-12	5-8	Al margen
Mayor que 12	0-5	No crítico

2.5.2.3 Expansión libre.

La prueba de expansión libre consiste en colocar un volumen conocido de suelo seco que pasa la malla No. 40 dentro de un cilindro graduado. El suelo se sumerge en agua, sin sobrecarga, luego se mide la expansión generada después de que se ha estabilizado. La diferencia entre el volumen inicial y final, expresada en porcentaje, corresponde al valor de la expansión libre.

Algunos experimentos de Holtz indicaron que un alto grado de expansión, correspondía a una bentonita comercial que tuvo un rango de expansión libre entre 1200 y 2000%. Holtz sugirió que los suelos que tuvieran valores de expansión libre mayores del 100% podían causar daños considerables a estructuras ligeras y aquellos que tuvieran valores menores del 50% raramente presentarían cambios de volumen apreciables, aun cuando estuvieran bajo cargas ligeras.

2.5.2.4. Contenido de coloides.

El tamaño de las partículas de arcilla parece estar relacionado con su potencial de expansión, particularmente el contenido coloidal. Seed, Woodward y Lundgren creen que no existe correlación entre el potencial de expansión y el porcentaje de los tamaños de arcillas. Sin embargo, para una arcilla dada, el valor de expansión va aumentando con la cantidad de arcilla presente en el suelo.

2.5.2.5 Predicción de expansiones - contracciones.

En la última década se han realizado muchas investigaciones que demuestran la confiabilidad de los ensayos de succión (los cuales miden la presión de poros negativa en el suelo parcialmente saturado), para predecir el potencial de expansión-contracción del terreno al cambiar su humedad.

Estas investigaciones concluyen que el método del papel de filtro (ASTM D 5298) es el más sencillo y económico para medir la succión del suelo en la práctica de la mecánica de suelos no saturados, pues su precisión es adecuada y el costo es aproximadamente el mismo del de un ensayo estándar de humedad. Sin embargo, en el ámbito mundial, aún son muy pocos los consultores que utilizan esta tecnología para la evaluación de casos reales.

A pesar de la cantidad de factores que desequilibran la humedad/succión del terreno durante la vida útil de las edificaciones, lo cual hace muy complejo predecir confiablemente los cambios diferenciales de humedad que ocurrirán en las diferentes capas de la zona activa del subsuelo (Δw_i), los cálculos para estimar las expansiones/contracciones totales esperadas en el terreno (ΔH_T) deben realizarse con base en los valores estimados de Δw_i .

Por los motivos enunciados anteriormente, algunos autores aún prefieren calcular ΔH_T en función de los cambios de humedad (Δw_i), en lugar de los cambios en la succión del suelo, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H_T = \sum \Delta w_i \left(\frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta w_i} \right) \Delta t_i \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde:

- Δw_i = cambio estimado de w de la capa i (%).
 $\Delta \varepsilon_i / \Delta w_i$ = índice de contracción lineal de la capa i .
 Δt_i = espesor de la capa i (m).

Para desarrollar los modelos constitutivos de problemas de la mecánica de suelos no saturados, relacionados con los cambios volumétricos, flujo de agua y resistencia al esfuerzo cortante, en el último lustro se ha propuesto el uso de las curvas de laboratorio que relacionan humedad-succión (curva característica suelo agua), permeabilidad-succión y resistencia al esfuerzo cortante-succión. Las investigaciones actuales están encaminadas a encontrar métodos indirectos que permitan obtener la curva característica suelo agua, a partir de las propiedades básicas del suelo, como la relación de vacíos, saturación, gravedad específica, límite líquido, granulometría y densidad seca (Villafañe y Coronado, 2000).

2.6 Métodos de clasificación.

Existen muchos criterios para identificar y clasificar los suelos expansivos, basados principalmente en el valor del límite líquido, el índice de plasticidad, el límite de contracción y el contenido de partículas coloidales. Tradicionalmente la expansión del suelo se ha medido en el laboratorio mediante el ensayo de expansión-consolidación (ASTM D 4546), en el cual se mide el porcentaje de expansión de la muestra al saturarse, y seguidamente la presión requerida para regresarla a su volumen inicial (presión de expansión).

Algunos investigadores han encontrado que el diámetro de las muestras (3"), el confinamiento y la rigidez del oedómetro imponen serias limitaciones a los resultados de estos ensayos, ya que tienden a sobre-estimar el porcentaje de expansión, en magnitudes hasta del 100 %, y la presión de expansión en mayor grado, especialmente en arcillas fisuradas.

Desde 1985, Villafañe y Coronado han venido realizando un ensayo de laboratorio para evaluar el potencial de contracción de las muestras al secarse al aire, el cual han denominado "ensayo de contracción por secado lento". La prueba es de fácil ejecución y económica pues no requiere de equipos especiales. Consiste en registrar el proceso de contracción de las muestras de los tubos Shelby al secarse al aire lentamente. Diariamente se miden sus dimensiones y la pérdida de peso, hasta el límite de contracción (Villafañe y Coronado, 2000).

2.6.1 Método USBR.

Este método fue desarrollado por Holtz y Gibbs, y se basa en consideraciones simultáneas de varias propiedades de los suelos. Se debe tener en cuenta que los resultados de la tabla se basan en pruebas de expansión para solo 45 muestras inalteradas y remoldeadas; por lo tanto, los datos acumulados no son los suficientes para precisar relaciones empíricas entre la expansión medida y las tres pruebas indicativas de la tabla 2.6. De hecho, una consideración importante sería la diferencia entre los estados inalterados y remoldeado de las muestras.

Tabla 2.6. Datos para estimar el cambio de volumen en los suelos expansivos (Chen, 1975).

Datos de pruebas índice			Expansión probable	Grado de Expansión
Contenido coloidal, % menor de 0.001 mm	Índice de plasticidad	Límite de contracción		
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-30	Medio
>15	<18	>15	<10	Bajo

II.6.2 Método de la actividad.

Las características de plasticidad y cambio de volumen que se presentan en los suelos se relacionan con la cantidad de partículas coloidales que controlan las fuerzas en la superficie (electrostáticas y de absorción). Los cambios volumétricos pueden predecirse utilizando el concepto de la 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 (ecuación 2):

$$Actividad = \frac{\text{Índice de Plasticidad}}{(\% a 0.002 mm) - 10} \quad \text{Ecuación (3)}$$

2.6.3 Determinaciones indirectas.

Las determinaciones indirectas del potencial de expansión en suelos expansivos han sido estudiadas por varios investigadores. El método de Ladd y Lambe ayudado por el método del PVC es probablemente el más simple y rápido, mientras que el método de la succión se considera como una nueva herramienta que se relaciona con el potencial y la presencia de expansión.

2.6.3.1 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. La tabla 2.7 muestra la clasificación del suelo de acuerdo con el potencial de cambio volumétrico, establecido por Lambe.

Tabla 2.7.-. Relación entre potencial de cambio de volumen y expansión resultante (Chen, 1975).

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

2.6.3.2 Succión del suelo.

El agua del suelo está sujeta a un cierto número de campos de fuerza que provocan diferencia respecto al agua pura y libre. Estos campos de fuerza resultan de la atracción que ejerce la matriz sólida sobre el agua, así como de la presencia de sales y la acción externa de presión de gas y de la gravedad.

De acuerdo con esto, el potencial total del agua del suelo puede expresarse como la suma de la contribución separada de esos varios factores; tal como lo expresa la ecuación 4:

$$\Psi_t = \psi_g + \psi_m + \psi_o + \dots \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde ψ_t es el potencial total, ψ_g es el potencial gravitacional, ψ_m el potencial de presión (mátrica), ψ_o el potencial osmótico, y los puntos suspensivos significan que es posible teóricamente tener términos adicionales.

La forma de actuar de los diferentes potenciales no es la misma y sus gradientes separados no siempre son igualmente efectivos en la generación de flujo. La ventaja principal del concepto de potencial total es que presenta una medida unificada por la cual es posible evaluar el estado del agua en cualquier momento y lugar dentro del suelo (Zepeda, 1989).

En la ingeniería práctica, la presión capilar de los suelos parcialmente saturados se identifica frecuentemente en términos de succión. El valor de la succión en una muestra saturada es cero; a medida que el suelo se va secando, dicho valor va aumentando; en condiciones muy secas el valor puede llegar a ser de miles de atmósferas. La determinación de la succión predice el cambio de humedad y el equilibrio de humedad que se relaciona con el potencial de expansión.

2.6.4 Método directo.

El método más conveniente y satisfactorio para la determinación del potencial de expansión y presión de expansión de un suelo es el que se evalúa directamente sobre la muestra del suelo. Se lleva a cabo en un consolidómetro unidimensional convencional. La muestra de suelo se coloca dentro de un anillo metálico entre dos piedras porosas, los diámetros del anillo oscilan entre 2 y 4 pulgadas dependiendo del aparato y los espesores de las muestras entre 0.5 y 1 pulgadas. Una vez colocado todo el arreglo mencionado, la muestra se carga con la presión "In situ" para proceder a la saturación en donde la muestra se inunda en agua. La expansión vertical se mide como el porcentaje de la altura inicial de la muestra, valor que se refiere al porcentaje de expansión (López-Lara, 2002).

2.7 Tipología de daños.

Los daños producidos por el fenómeno de las arcillas expansivas son muy variados (figura 2.9), afectando en muchos casos a la funcionalidad y estática de las estructuras llegando en algunos casos a situaciones de ruina. La mayor o menor intensidad del daño está íntimamente ligado al clima. En clima seco, el terreno se encuentra profundamente desecado, la evaporación supera a la precipitación, al construir el edificio cubre el terreno e impide la evaporación, induciendo un aumento de humedad bajo el mismo, siendo mayor en el centro que en los bordes, tardando varios años en manifestarse el problema.

En clima subtropical (húmedo), se produce un movimiento estacional en las superficies descubiertas, ahora la construcción del edificio lo amortigua, pero de forma diferencial. El centro del edificio tiende al equilibrio, pero los bordes y las esquinas, continúan subiendo y bajando coincidiendo con la estación lluviosa y seca. Estos movimientos cíclicos son muy perjudiciales y pueden producir daños al edificio. El levantamiento de los edificios no puede apegarse estrictamente a estos modelos, ya que el clima tiene fuertes variaciones.

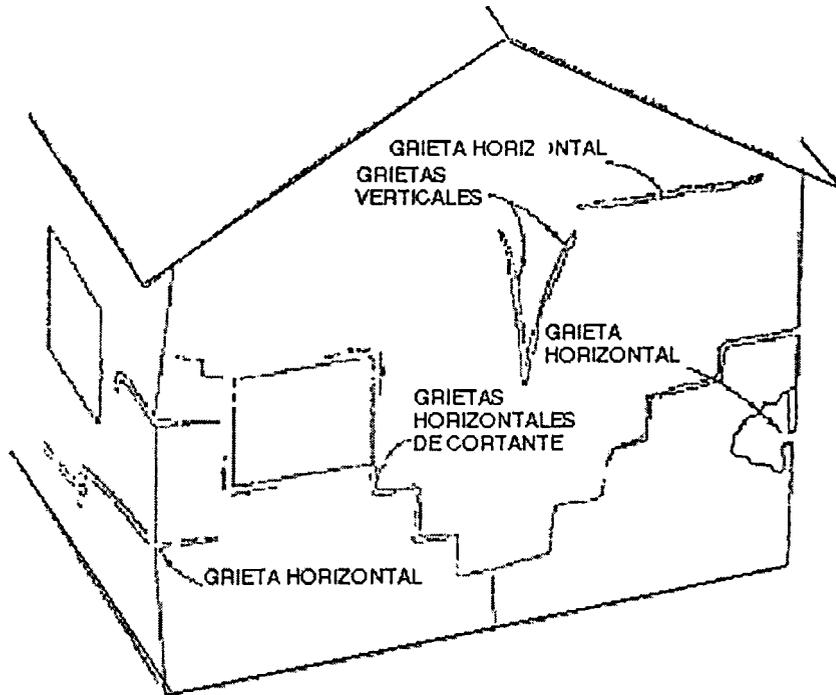


Figura 2.9.- Daños que se presentan en una casa-habitación (Trejo, 1989).

De manera que las consecuencias más perjudiciales de la expansión son más críticas en los lugares áridos y semiáridos, debido a que la humedad del suelo más superficial es generalmente baja a causa de la evaporación. Las circunstancias descritas suelen darse con mayor gravedad en estructuras ligeras, sensibles a movimientos diferenciales, y sobre todo cuando el fenómeno no ha sido previsto estructural ni geotécnicamente.

El tiempo que tardan en aparecer los daños depende de la expansividad del suelo y de la rigidez de la estructura. En suelos muy expansivos el agrietamiento puede aparecer en días, mientras que en estructuras mas pesadas (edificios de 2 a 3 niveles), las fisuras pueden apreciarse en el término de 6 a 12 meses, dependiendo de la época en que se inició la construcción (lluviosa o seca). Los movimientos aumentan linealmente durante los siguientes 5 a 8 años, aunque variaciones particulares del entorno (rotura de tuberías) pueden producir una reactivación e iniciamiento de los daños.

Esta erraticidad en la aparición de los daños hace que los costos, las repercusiones sociales y profesionales sean más importantes que cuando las fallas se pueden reparar durante la construcción. La magnitud y extensión de los daños depende de la rigidez de la estructura, la forma y extensión del edificio, la distribución de cargas, las condiciones del entorno, etc. Entre las causas que producen los daños en las edificaciones, están las siguientes:

- Expansión del subsuelo bajo el edificio por aumento de humedad, al impedirse la evaporación.
- Retracción perimetral del suelo en edificios al final de la época húmeda.
- Profundidad de cimentación muy superficial, desplantada ésta dentro de la zona activa.
- Diseño estructural defectuoso, para absorber movimientos y distorsiones.
- Combinación de zonas flexibles, poco cargadas, con otras masivas y rígidas.
- Excesiva tabiquería y multiplicación de confluencia.
- Contracción del suelo por desecación debido a la absorción de agua por las raíces de los árboles.
- Rotura de tubería de agua y drenaje.
- Defectos de drenaje perimetral.

En general, las viviendas manifiestan daños de diferente magnitud, consistentes en fisuras en dirección horizontal, vertical e inclinada de diferentes aberturas, comprendidas entre 0.5 y 5.00 mm, en el interior de los muros se encuentran huellas de humedad por ascensión capilar, las azoteas cuentan con una impermeabilidad deficiente y con grietas con aberturas de hasta 6.0 mm, por el interior de las casas en algunas zonas de la azotea existen aberturas que durante la temporada de lluvia son fuente de infiltración. En la medida en que aumente la saturación del terreno natural se propiciarán expansiones del subsuelo, transmitiendo presión ascendente en el área de contacto de la cimentación, como el peralte de la cimentación es escaso (losa) y el concreto de baja resistencia con

armado de malla electrosoldada, se tiene una cimentación de comportamiento flexible en tableros grandes y rígido en tableros cortos, de tal forma que la cimentación no es capaz de absorber los movimientos diferenciales ascendentes provocados por las alteraciones de humedad. Las superestructuras son frágiles, tomando en consideración que la colindancia entre casas de interés social está resuelta mediante un muro común para ambas, lo que las hace mas susceptibles al fracturamiento debido a los movimientos diferenciales de la cimentación causados por los cambios volumétricos del subsuelo debido a la alteración de su contenido de humedad (Trejo, 1995).

A manera de resumen en la tabla 2.8 se presenta la variada tipología de daños por cambios de volumen del subsuelo bajo la edificación (Trejo, 1989).

Tabla 2.8.- Tipología de daños por cambio de volumen del subsuelo (Trejo, 1989).

Localización del Daño		Tipo del Daño
Global		Movimiento diferencial entre fachadas. Inclinaciones. Separaciones de zonas o bloques.
Losas		Bufamientos. Grietas en contacto con columnas y muros. Despegue y distorsión de aceras.
Superestructura	Muros de Carga	Grietas diagonales. Grietas verticales. Grietas horizontales.
	Estructura	Fisuración de cortante en nodos. Trabajo en ménsula con grietas. Horizontales o inclinadas.
	Albañilería	Grietas diagonales. Apertura de esquinas y uniones techo-muro. Descuadre de marcos de puertas y ventanas.
Cimentaciones	Superficial	Despegue de zapatas corridas de muros o terreno. Grietas horizontales por empuje. Grietas diagonales por asentamientos diferenciales.
	Losa	Grietas de flexión. Distorsiones.
Muros de sótano		Grietas de empuje.

Ha sido un gran error culpar a los movimientos estructurales solamente por la acción de los suelos expansivos. Muchas losas construidas sobre suelos expansivos se agrietan y levantan debido a un cálculo incorrecto del elemento de concreto. Se sabe que realizar un mal curado del concreto, junto con la carencia de cohesión en las juntas frías, pueden ser las causas de los agrietamientos. Existe un gran número de ejemplos donde aparecen agrietamientos en los muros, los cuales no fueron causados por el empuje de las cimentaciones, pero si por la presión del suelo ejercida sobre su superficie, generalmente combinado con la presión por percolación.

En ocasiones, las grietas de los muros son causadas por descuidos durante la construcción. La deficiente mano de obra o los movimientos del suelo por los equipos, pueden causar grietas verticales y horizontales. A menudo se culpa a los suelos expansivos por el desplome de los muros, cuando en realidad es por un refuerzo deficiente. Mientras exista una gran cantidad de presión por expansión que pueda ser ejercida horizontalmente contra el muro, esta causará daños por expansión lateral.

A veces, los defectos estructurales se confunden por daños causados por los suelos expansivos. Las casas son construidas generalmente con contratraves colocadas a diferentes niveles. Si las contratraves no se refuerzan correctamente, pueden aparecer grietas y movimientos. Aunque el problema de expansión del suelo puede ser el responsable de muchas de las grietas y movimientos de las estructuras, no se deben ignorar otros aspectos de movimientos de la cimentación (Chen, 1975).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

La metodología propuesta comprende dos aspectos de vital importancia en el desarrollo y objetivo de esta investigación, en los cuales se hará énfasis en el presente capítulo. En primer plano la elección y muestreo del área de estudio debe responder a parámetros que puedan ser comparados con investigaciones y reportes anteriores, que independientemente del comportamiento estadístico; servirán de base para correlacionar el comportamiento físico del suelo y determinar las recomendaciones pertinentes.

El segundo aspecto en el cual se hace énfasis en este capítulo, es la descripción del método propuesto para efectuar el ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos, apegado en lo posible a la normatividad actual. Dicho procedimiento menciona las recomendaciones pertinentes en cada paso del ensaye, desde el muestreo en campo hasta el análisis de resultados.

3.1 Trabajo de campo.

Con este fin se seleccionó el fraccionamiento Jurica, donde es sabido que la presencia de arcillas expansivas han causado una gama de daños por la cual se han realizado ya investigaciones para otros fines.

3.1.1 Localización del lugar de muestreo.

El estado de Querétaro de Arteaga se encuentra ubicado en el centro de la república Mexicana, entre los 20°01'16" y 21°35'38" de latitud norte y los 99°00'46" y 100°35'46" de longitud oeste. Es una pequeña entidad, ya que sus 11,269.7 Km² solo rebasan las superficies del Distrito Federal y de los estados de Tlaxcala, Morelos, Colima a Aguascalientes.

Querétaro limita al noreste con San Luis Potosí. Al oriente con Hidalgo, al sur con Michoacán y Estado de México, y al poniente con Guanajuato. Dentro del territorio se distinguen tres grandes regiones: en el centro y sur el Eje Neovolcánico, al norte la Sierra Madre oriental y al dentro oeste la Mesa del Centro.

El valle de Querétaro presenta indicaciones de movimientos de la corteza terrestre, que se manifiesta en forma de cambios litológicos, topográficos e hidrológicos. Dentro del valle se observan dos fallas notables, la primera se localiza al noreste del cerro Cimatarío, internándose en el valle en una extensión aproximada de 15 km y en perpendicular a la autopista México-Querétaro. La segunda falla se encuentra atravesando el valle de sur a norte en una longitud aproximada de 25 Km. Estas fallas se encuentran a una distancia considerable del predio en estudio, por lo que se descartan problemas generados por la acción de las fallas.

La ciudad de Querétaro está incluida en la provincia fisiográfica "Franja Volcánica Transmexicana" dentro de la clasificación fisiográfica de la República y en la subprovincia "Llanuras y lomeríos de Querétaro e Hidalgo". Generalmente la ubicación y crecimiento de las ciudades se hace atendiendo a factores tales como el económico, clima, situación geográfica, importancia estratégica y recursos naturales. Parece ser que en la planeación del crecimiento de las ciudades en ningún momento se toma en cuenta el aspecto geotécnico que tiene íntima relación con otros aspectos como lo son el topográfico, hidráulico y edafológico.

El fraccionamiento Jurica, se encuentra ubicado a 20°40.6' de latitud y 100°27.3' de longitud. Con respecto a la estratigrafía, el área que comprende el fraccionamiento está constituida predominantemente por rocas ígneas y aluvión y en proporción mínima por rocas sedimentarias.

En resumen, en la zona predominan los suelos de origen aluvial, constituidos por arcilla, limos, arenas y gravas del reciente que conforman el valle. El valle está rodeado por rocas extrusivas basálticas, en las pendientes de los flancos de todas las elevaciones se encuentran depósitos de talud, producto de alteración de las rocas; éstas se presentan en forma de fragmentos de forma irregular, angulosos variando su tamaño desde unos cuantos centímetros hasta varios metros de diámetro, semiempacados en material areno-arcilloso. La figura 3.1 muestra la ubicación del Fraccionamiento Jurica dentro de la ciudad de Santiago de Querétaro.



Figura 3.1 Ubicación del Fraccionamiento Jurica dentro de la ciudad de Santiago de Querétaro

3.1.2 Muestreo.

El muestreo se llevó a cabo mediante un pozo a cielo abierto en la época de estiaje, con fin de que el suelo se presente en el estado de menor contenido de agua, y de esta forma obtener los valores de porcentaje de expansión máximos para el suelo en estudio.

La profundidad alcanzada fue de 4.0 m. Se obtuvieron muestras inalteradas a distintas profundidades, siendo las de 0.50 y 1.00 m las más representativas para el propósito de esta investigación, debido a que el efecto de los cambios estacionales son mas perceptibles en los estratos mas superficiales.

El terreno del cual se obtuvo la muestra es completamente plano, con vegetación silvestre moderada y sin ningún problema visible en su drenaje natural. La capa vegetal tiene un espesor promedio de 0.25 m, a partir de la cual se observa un estrato de arcilla negra que llega a 3.0 m de profundidad. A esta capa la sobreyace un estrato de arcilla limosa café.

Dado el objetivo de esta investigación, no fue necesario realizar ningún tipo de prueba de campo adicional. Se tuvo especial cuidado en rellenar el pozo inmediatamente después de la extracción de las muestras, con el objeto de reducir el efecto de la alteración en el sitio para futuras investigaciones.

3.2 Procedimiento propuesto para realizar el ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos.

En este apartado se describe de forma sistemática los pasos requeridos para la propuesta del procedimiento de ejecución del ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos, mediante ciclos de humedecimiento – secado. Las recomendaciones incluyen el muestreo, labrado de especímenes y cuidados especiales que el ensaye requiere en cada etapa determinada de su ejecución.

3.2.1 Obtención de la muestra inalterada.

La Norma Mexicana NMX-C-431-ONNCCE-2002 establece el método de prueba para realizar sondeos de pozos a cielo abierto. Define a un pozo a cielo abierto como una excavación superficial, en la cual generalmente se realiza abriendo zanjas o pozos con pico y pala o con ayuda de medios mecánicos, de dimensiones suficientes para que un técnico pueda bajar directamente. El trabajo de excavación se debe realizar bajo dos condiciones ambientales fundamentales:

- a) Cuando no se presenten precipitaciones pluviales en el momento.

- b) Evitar la pérdida de humedad del material a extraerse; dependiendo el análisis y/o estudio.

La excavación se debe realizar por capas. El pozo a cielo abierto debe ser lo suficiente accesible en lo referente a sus dimensiones. Se debe cuidar especialmente los criterios para distinguir la naturaleza del suelo "in situ", y la misma; modificada por la excavación realizada. Se debe llevar un registro completo de campo, indicando las condiciones del subsuelo durante la excavación, hecho por un técnico especializado (NMX-C-431-ONNCCE-2002). La figura 3.2 muestra el perfil de un pozo a cielo abierto y la obtención de una muestra inalterada de suelo.



Figura 3.2.- Obtención de una muestra inalterada.

Si la muestra va a ser obtenida del piso de una excavación o de una superficie prácticamente horizontal, se marca un cuadro de 40 centímetros por lado aproximadamente y con el objeto de labrar un cubo de suelo de las dimensiones mencionadas, se excava alrededor de las marcas con la herramienta apropiada, sin dañar la estructura del material de la muestra ya sea por presión o por impacto; se profundizará lo necesario para efectuar un corte horizontal en la parte inferior de la muestra. Inmediatamente después de haber realizado dicho

corte y sin levantar la muestra, se cubre ésta con manta de cielo recién embebida en una mezcla previamente preparada, de cuatro partes de parafina por una parte de brea, licuadas por medio de calor; la manta así preparada deberá quedar bien adherida a la muestra.

Una vez protegidas las 5 caras descubiertas, se procede a separar la muestra cuidadosamente para no dañarla e inmediatamente después, se cubre su cara inferior con una capa de manta de cielo embebida en la mezcla de brea y parafina, en la forma antes descrita.

A continuación se aplica con una brocha, otra capa de parafina y brea fundidas y aprovechando la temperatura de la mezcla, se fija la tarjeta de identificación en la cara que originalmente estaba en la parte superior. La figura 3.3 muestra el detalle del labrado de las caras laterales y superior de la muestra inalterada a una cierta profundidad.



Figura 3.3.- Detalle del labrado de una muestra inalterada.

Si la muestra va a ser extraída de una pared, se procede a excavar a su alrededor una bóveda, con objeto de facilitar el labrado de las caras superior y laterales del cubo y poder efectuar el corte horizontal en la parte inferior del mismo. Se indicarán las capas o estratos atravesados por éste, con su clasificación correspondiente, formando así un perfil estratigráfico. En caso de aparecer el nivel freático, deberá anotarse su profundidad (SOP, 1981).

Desde hace apenas unos años a la fecha se ha cambiado la forma de cubrir la muestra inalterada, haciendo a un lado la manta cubierta de brea y parafina e introduciendo la aplicación de forrado de la muestra mediante un material plástico. Este procedimiento se utiliza en muestras que serán utilizadas de inmediato y no serán almacenados por un lapso considerable. Esta última consideración responde a la duda de si el material plástico es lo suficientemente rígido e impermeable para proteger la muestra inalterada de pérdidas de humedad, así como protección en su transporte. Un problema serio lo representa que el material plástico se perfora en alguna etapa de la ejecución del muestreo.

3.2.2 Labrado de pastillas para anillos de consolidación.

Se propone utilizar anillos de consolidación, de tal suerte que su labrado no representa nuevas consideraciones a las ya conocidas y dispuestas por los manuales y procedimientos de laboratorio. Para preparar una muestra inalterada es esencial cortar un fragmento cuyo volumen sea el del anillo de consolidación. Para una buena manipulación se recomienda el uso de un aparato cortador adecuado. A fin de evitar la evaporación, es recomendable preparar el espécimen en un cuarto húmedo. El procedimiento detallado para la obtención de una muestra para pruebas de consolidación (en este caso para expansión libre), deberá ajustarse a lo que sigue:

1. Determínese y anótese el peso propio del anillo para confinar la muestra. Hágase lo mismo con el área y la altura del anillo.

2. Colóquese una masa de arcilla inalterada del tamaño apropiado en el anillo de consolidación, y, girando el anillo, córtese la muestra con un cortador hasta sus dimensiones correctas. En arcillas blandas resulta bien hacer girar el anillo manualmente, retirando el material sobrante con ligeros cortes de ajuste; en materiales duros puede hacerse necesario manipular la muestra mecánicamente ajustándola al anillo, después de haber obtenido un cilindro del diámetro apropiado; en este caso debe tenerse cuidado de que la muestra no pierda agua por evaporación.

Conforme el labrado de la muestra progresa, ésta se va presionando hacia dentro del anillo, el lado inferior de la muestra descansa en una base metálica. Continúese el labrado de la muestra hasta que su base sobresalga algo por la cara inferior del anillo.

3. Retírese la porción de la muestra que sobresalga por la cara superior del anillo hasta lograr una superficie continua a nivel; para esto puede usarse una segueta de alambre en muestras suaves, o cuchillo para muestras mas duras, afínese cuidadosamente usando si es preciso una regla metálica.
4. Colóquese una placa de vidrio sobre el anillo, inviértase éste y repítase la remoción del material en la cara inferior. Una vez realizada, colóquese el anillo en su posición original.
5. Usando una balanza, pésese el conjunto muestra - anillo pudiendo auxiliarse de un cristal o cápsula Pétril debidamente pesada anteriormente.
6. Se coloca la extensión inferior del anillo, de la cual se conocerá su peso; hecho esto se coloca bajo la cara inferior de la muestra el papel filtro cortado a la medida y bajo este una piedra porosa completamente seca. De igual forma se coloca la extensión superior del anillo, papel filtro y piedra porosa.

7. Teniendo el conjunto del anillo completo, con cuidado de no perturbar la muestra, se coloca este en el interior de la cazuela que se utilizará para montar el anillo en el consolidómetro (Juárez Badillo, 2002).

Algunos laboratoristas prefieren auxiliarse de la extensión superior e inferior del anillo durante la etapa de labrado de la muestra, lo anterior es para aprovechar la forma cónica de la extensión inferior; la cual define con más exactitud la circunferencia de la muestra. La extensión superior ofrece una mejor área de apoyo al momento de presionar el anillo para inducir una penetración en la muestra. Esto implica que una vez labrada la muestra sea necesario quitar ambas extensiones, una a la vez, para definir las fronteras superior e inferior de la muestra de suelo. La indicación de que las piedras porosas se encuentren totalmente secas se justificará mediante el fundamento de este ensaye propuesto.

3.2.3 Montaje del anillo en el consolidómetro.

El montaje del conjunto de anillo completo en el consolidómetro debe realizarse en un cuarto de temperatura controlada de 20 °C aproximadamente. La forma tradicional de montaje se describe a continuación:

1. Con mucho cuidado, a fin de evitar movimientos en el anillo y de las piedras porosas en la cazuela, se coloca ésta sobre la plataforma del banco de consolidación, centrando la piedra porosa superior bajo el marco de carga.
2. Colóquese sobre la piedra porosa superior el cabezal o placa de carga correspondiente, sobre el cual se apoyará la pequeña esfera metálica (balín) encargada de servir de contacto entre el marco de carga y el cabezal.
3. Balancéese la palanca de carga y ajústese la elevación de la pieza transversal superior del marco de carga, hasta que el marco quede en contacto con la pequeña esfera metálica alojada en la muesca de la placa de carga previamente colocada sobre la piedra porosa superior.

4. La pieza superior del marco de carga deberá quedar horizontal, para lo cual se podrá utilizar un nivel de burbuja como referencia.
5. Colóquese el micrómetro atornillando el puente que lo sostiene y poniéndolo en contacto con el marco de carga; póngase el micrómetro en cero o en su caso en una unidad entera.
6. Se tiene la costumbre de envolver la parte superior de la cazuela con ayuda de una membrana impermeable o plástico lo suficientemente manejable para que se ajuste a la forma de la cazuela. Lo anterior se justifica en el sentido de proteger a la muestra de cambios de humedad excesivos que puedan afectar el resultado del ensaye. Esta consideración puede ser omitida dado que el ensaye consistirá solo en una etapa de saturación, quedando a criterio del personal que ejecute la prueba el colocar o no la membrana.
7. La norma ASTM D 4546-03 recomienda aplicar una carga igual o menor a 1 KPa (0.01 kg/cm^2), esto ayuda a estabilizar la superficie del suelo con la piedra porosa, así como la piedra porosa con el cabezal. Transcurridos 5 minutos se toma la lectura del micrómetro en casa de haber existido algún movimiento y se ajusta la aguja del mismo al punto inicial.

En la mayoría de los ensayos no se desarrolla ningún movimiento en la aguja del micrómetro que indique una pequeña consolidación, sin embargo; dada la humedad inicial del suelo que conforma la pastilla del suelo, puede sufrir una pequeña expansión debido al contacto con la humedad del ambiente. Es conveniente rectificar al menos una vez la horizontalidad del brazo del consolidómetro, para asegurar una correcta nivelación y descartar la posibilidad de posibles cargas adicionales inducidas por un error en la nivelación. La figura 3.4 muestra el conjunto del anillo de consolidación, extensiones, cazuela, piedras porosas y cabezal debidamente montado y nivelado sobre el consolidómetro.



Figura 3.4 - Anillo de consolidación debidamente montado en el consolidómetro.

3.2.4 Saturación y lectura de la expansión.

Una vez montado el espécimen sobre el consolidómetro, se encuentra en condiciones de iniciar la saturación de la muestra utilizando para esto agua previamente destilada y dispuesta en un envase que permita inundar la cazuela de forma cercana a un flujo laminar, por lo que una pipeta cumple perfectamente con esta indicación.

Existen dos criterios para tomar el tiempo de inicio de la prueba. El primero indica que la prueba comienza justo en el momento de derramar sobre la cazuela la primera gota de agua destilada, sin embargo; al colocar previamente las piedras porosas en estado seco se pierde un tiempo en el que la piedra porosa inferior se satura y permite el contacto del agua con el suelo. El segundo criterio indica que la prueba arranca con el primer movimiento de la aguja del micrómetro, de esta forma se asegura que el arranque de la prueba correspondió al instante en que el suelo sufre la primera expansión por contacto superficial con el agua. Para los fines de esta investigación se ha adoptado el segundo criterio, que refleja las condiciones ideales para comenzar el cambio de humedad de la muestra y por tanto la expansión.

El tiempo que transcurre entre la primera gota y el primer movimiento de la aguja del micrómetro varía de 20 a 30 segundos. Inicialmente se inundará la cazuela hasta un nivel inferior a la unión entre el anillo y su extensión inferior. La figura 3.5 muestra en detalle el anillo y sus extensiones.

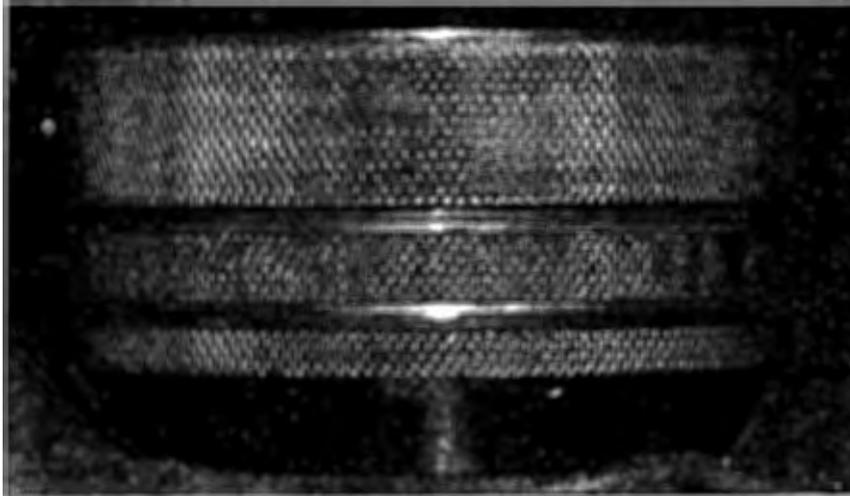


Figura 3.5 Anillo de consolidación unido a sus extensiones inferior y superior.

Esto responde a que el agua debe llegar a la muestra de suelo mediante una absorción ascendente; si la cazuela se inundara a un nivel mayor que el descrito anteriormente, se correría el riesgo de que al permitir la entrada del agua por ambas caras de la muestra de suelo, algunas pequeñas burbujas de aire quedasen atrapadas en el interior de la muestra; siendo que el objetivo de este ensaye lograr la mayor saturación posible de la muestra.

Se tomarán lecturas del micrómetro en intervalos de tiempo que resulten adecuados. La norma ASTM D 4546-03 describe unos tiempos similares a la prueba de consolidación, aunque estos pueden variar de acuerdo al criterio de personal encargado del ensaye, siempre y cuando permitan obtener un control de la expansión y una gráfica que muestre correctamente el comportamiento de la expansión.

De acuerdo a lo anterior, para la realización del ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos en su etapa de humedecimiento; se optó por tomar lecturas del micrómetro en la secuencia de intervalos siguiente: 0 seg, 15 seg, 30 seg, 1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 8 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 hr, 2 hr, 4 hr, 8 hr, 15 hr, 24, hr, 48 hr y 72 hr. En realidad no es una secuencia que hay que seguir estrictamente, pero sí es medir correctamente el tiempo transcurrido desde el principio hasta el instante en que se hace cada lectura.

El tiempo necesario para que la muestra de suelo alcance el mayor grado de saturación posible varía de acuerdo a las características del mismo suelo, siendo en nuestro caso las arcillas un material con una permeabilidad baja, requiriendo para esto un tiempo importante para el objetivo de este ensaye. Sin embargo, el porcentaje de expansión que ocurre en las primeras dos horas representa en la mayoría de los casos mas del 75 % de la expansión total, y la expansión entre un periodo de saturación de 24 a 72 horas es mínimo. Teóricamente se recomienda dejar la etapa de saturación hasta que la curva de deformación versus tiempo logre una recta horizontal, es decir; que el aumento sea mínimo. Para lograr lo anterior se requieren de un periodo de saturación de varios días (6 o 7 días), que resultaría un tiempo total muy grande pensando en los ciclos de saturación – secado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el primer ensaye de fatiga de expansión se optó inicialmente por un periodo de saturación de 72 a 96 horas (tres a cuatro días), sin embargo; al observar que el aumento de la expansión es mínimo posterior al lapso de 48 horas (aún sin definirse una recta en la gráfica de deformación versus tiempo), se recomienda despreciar este aumento y reducir el tiempo de saturación a 48 horas (2 días); quedando a criterio del encargado del ensaye la conveniencia de dar un mayor tiempo de saturación de acuerdo a las características del suelo y propósitos del estudio. La figura 3.6 ejemplifica el estado de la pastilla de suelo una vez terminado el proceso de humedecimiento.

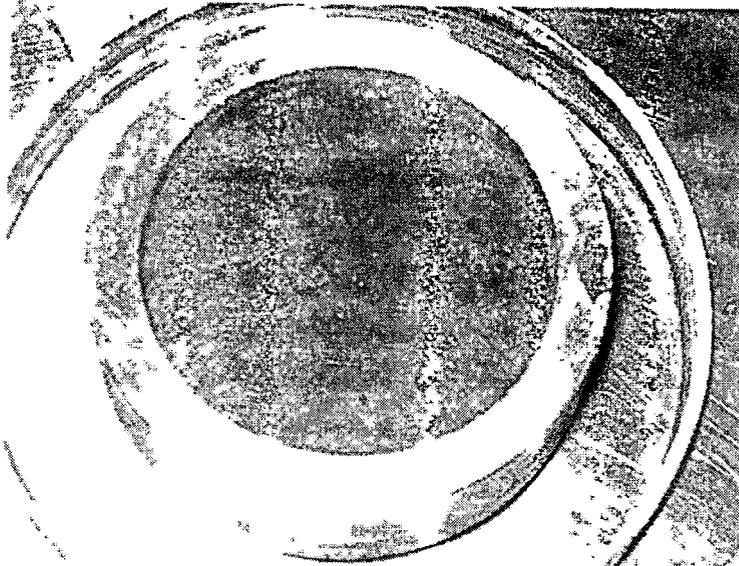


Figura 3.6 Pastilla de suelo una vez terminado el proceso de humedecimiento.

3.2.5 Secado de la muestra

La propuesta teórica del concepto de fatiga de expansión se basa en ciclos de humedecimiento – secado, siendo el procedimiento de secado una condición que es necesario analizar desde varios puntos de vista, en nuestro caso se pretende llevar la muestra de suelo a la humedad inicial antes de la primera saturación.

Ordinariamente en pruebas de consolidación o de presión de expansión, la muestra de suelo se somete a un proceso de secado para obtener la humedad final y mediante ello establecer el grado de saturación que ha alcanzado. Esto se realiza mediante la norma ASTM correspondiente, que especifica una temperatura de secado de 105 ± 5 °C en un periodo de 18 a 24 horas.

Sin embargo; de esta forma se seca completamente el suelo perdiendo su humedad natural por lo que se requeriría de un control estricto en el tiempo de secado para sacar del horno la pastilla de suelo.

Por otro lado, al someter a un secado rápido a una temperatura elevada, el suelo sufre un proceso de contracción volumétrica que se reflejaría en una disminución del área y volumen de la muestra de suelo, además de un agrietamiento brusco; quedando un espacio vacío entre el suelo y la cara interior del anillo de consolidación (figura 3.7).

Lo anterior representa un problema para los fines de este ensaye, dado que se pretende someter la muestra de suelo a ciclos de humedecimiento – secado, y si la muestra se contrae en cualquiera de sus dimensiones (fundamentalmente el diámetro), se corre el riesgo de no ser representativo el porcentaje de expansión de un ciclo a otro.

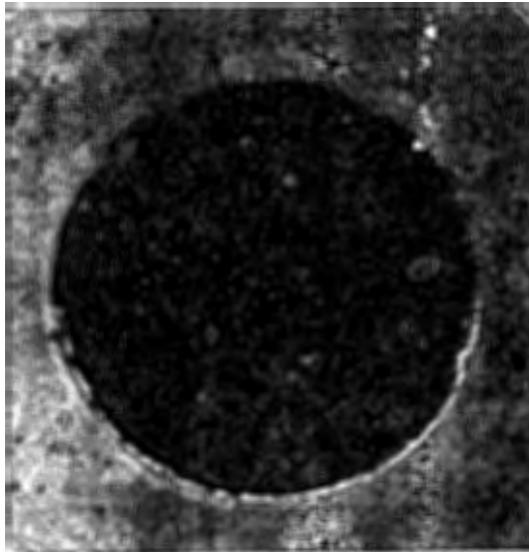


Figura 3.7 Pastilla de suelo secada en horno a 100 ± 5 °C. Se observa un excesivo agrietamiento

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y en un intento de recrear la temperatura a la cual la masa del suelo se seca en campo, se propuso en un principio precalentar el horno de secado a una temperatura constante de 25 °C. Lo anterior responde a datos descritos por INEGI (2000), en donde describe el centro del estado de Querétaro como un clima seco a semiseco, donde la temperatura media anual oscila entre 7 y 25.1 °C.

De esta forma al someter a la muestra de suelo a un proceso de secado en una temperatura de 25 °C se representa la máxima anual de la zona climática. Antes de iniciar el secado se pesa la muestra humedecida por el efecto de la saturación, y dicho peso se compara con el peso inicial del espécimen de suelo para tener el dato de la cantidad de peso en agua que será necesario retirar de la muestra. Teniendo este dato, se coloca la muestra en el horno pudiendo auxiliarse de un cristal o una cápsula petri de un tamaño adecuado.

Se recomienda introducir la muestra del suelo dentro del anillo sin quitar las extensiones del mismo, dado que al encontrarse expandida la muestra esta tiene una altura mayor a la inicial y al quitar las extensiones del anillo se puede someter la muestra de suelo a un fenómeno de abrasión y torsión que puede poner en riesgo la estabilidad de la pastilla.

El proceso de secado se realizó sin ningún contratiempo y a periodos de tiempo establecidos se tomaron lecturas del peso de la muestra para evitar secar más de lo debido y reducir el peso final del secado a un valor menor que el del peso inicial del ensaye. En este proceso el horno se comportó de una forma diferente y no mantuvo una temperatura interna establecida. Según se pudo deducir mediante la observación del funcionamiento del horno, este guarda una relación directa con la temperatura del ambiente externo.

Cuando la temperatura ambiente excede la programada en el horno, este tiende a alcanzarla dado que el termostato no es capaz de “enfriar” la temperatura interna según la programada. Las variaciones alcanzaron hasta 34 °C en los meses de junio a agosto, por lo que se tomó la decisión de aumentar la temperatura del horno a 30 °C para generar un desequilibrio de temperaturas menor en el transcurso del periodo de secado. Este aumento de temperatura tuvo un decremento muy pequeño en el tiempo de secado de la muestra, reduciendo este tiempo en solo algunas horas.

Cabe destacar que en cualquiera de los ciclos no se permitió llegar a un peso menor que el inicial, en cambio se permitió una tolerancia de +2 gr de diferencia con el peso deseado, misma diferencia que podría perderse al momento de colocar de nuevo la muestra de suelo en la cazuela y el proceso de montaje. La figura 3.8 muestra la pérdida de peso de la muestra de suelo en el proceso de secado a una temperatura constante de 30 °C, de acuerdo al peso de la misma tomado en intervalos de tiempo convenientes conforme el tiempo de secado transcurre, hasta alcanzar el peso inicial de la muestra.

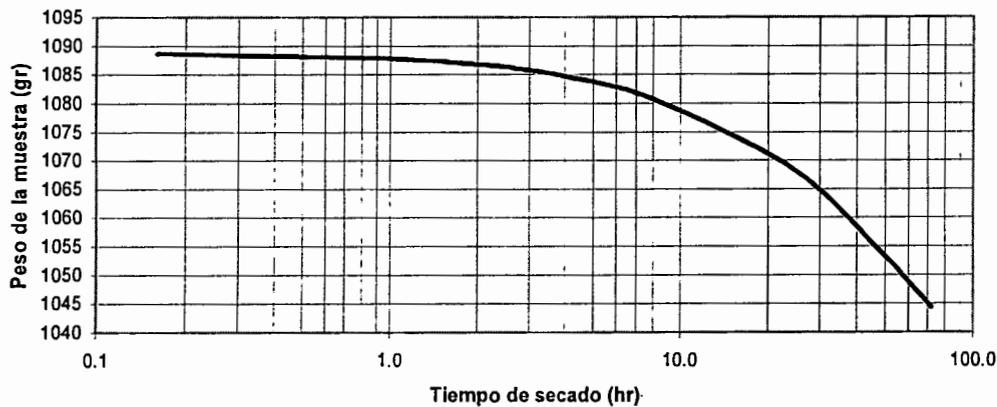


Figura 3.8.- Proceso de secado de una muestra de suelo a 30 °C después de someterla al proceso de humedecimiento.

A pesar de realizar el secado a una temperatura comparable con la ambiental en campo, no se pudo evitar una contracción volumétrica de la pastilla, siendo de importancia este detalle, dado que se pretende comparar la expansión libre de cada ciclo. Al continuar el número de ciclos humedecimiento – secado se tomó nota del área y volumen final después de cada ciclo de secado para relacionarlo con la expansión final del siguiente ciclo.

Dichas mediciones se realizaron con ayuda de un vernier electrónico debidamente calibrado con aproximación al centésimo de milímetro. En relación al área original de la pastilla (condiciones naturales), se observa una reducción de la misma que corresponde a un valor de $13 \pm 2\%$.

Y en lo que respecta al volumen se observa un aumento promedio del $6 \pm 2\%$ en relación al valor inicial de la muestra. Este comportamiento se presentó de forma semejante en todos los ciclos, por consiguiente; se considera igual y estable en todos los ciclos del ensaye, por lo que los resultados de la expansión se pueden comparar entre si, dado que parten de las mismas condiciones iniciales del ciclo inmediato anterior.

La figura 3.9 muestra la pastilla de suelo en el interior del horno a temperatura constante de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde se observan los primeros signos de contracción en la pastilla de suelo.

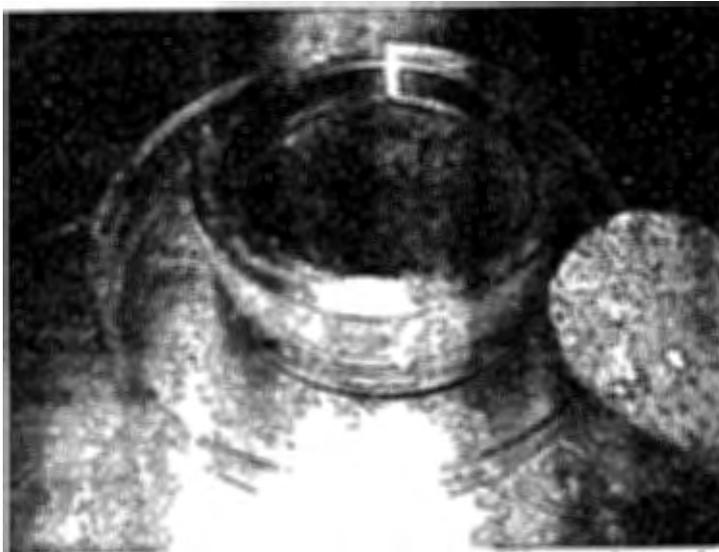


Figura 3.9.- Pastilla de suelo en el interior del horno durante el proceso de secado. Se observan los primeros signos de contracción.

3.2.6 Ciclos posteriores.

El tratamiento que se da a la pastilla de suelo para iniciar un nuevo ciclo de saturación – humedecimiento responde a las consideraciones mencionadas en cada paso de este procedimiento propuesto. Se debe tener un especial cuidado al momento de terminar el secado y la medición de diámetro y altura de la pastilla, porque cualquier tipo de rotura pone en riesgo el desarrollo del ensaye de fatiga de expansión.

Al colocar la muestra en el horno puede dejarse el papel filtro junto a la muestra dado que el mismo papel ha absorbido agua en el proceso de humedecimiento y es preciso no tomarlo en cuenta para los cálculos del peso de la muestra.

Conforme el número de ciclos aumente se puede tener una pérdida de material en el proceso de pesado y medición, sin embargo; la cantidad de material que puede desprenderse de la pastilla es relativamente pequeña por lo que se puede desprestigiar esta pérdida siempre y cuando los movimientos se realicen con el mayor cuidado y atención posible.

Se recomienda renovar el papel filtro en cada ciclo de humedecimiento, porque el secado del mismo tiende a restar su capacidad de filtración creando algunas pequeñas fisuras o incluso pequeñas áreas que difícilmente permiten el paso libre del agua. No debe olvidarse tomar el peso del papel filtro superior e inferior antes del proceso de humedecimiento y después del mismo, para compararlo con el peso correspondiente después del secado de la muestra. Aunque su variación puede ser mínima, no está de más tomarlo en cuenta para los fines de este ensaye de fatiga de expansión.

Aunque las piedras porosas soportan el secado del horno a la temperatura establecida en esta propuesta, se recomienda secar éstas al aire, tal como lo menciona la norma ASTM D 4546-03, considerando que un periodo de 3 días será suficiente para que se encuentren secas y preparadas para un nuevo ciclo de humedecimiento.

Es importante que al desmontar el anillo del consolidómetro y colocar el anillo con sus extensiones y muestra de suelo en el horno, la cazuela y piedras porosas sean lavadas con agua para eliminar residuos de material fino que haya podido entrar en suspensión durante el humedecimiento.

La medición del diámetro y altura de la pastilla después del secado deberá realizarse con ayuda de un aditamento que permita realizar este paso con facilidad y sin riesgo de desmoronar o afectar de otra forma la estructura de la pastilla. Se recomienda la utilización de un vernier digital, para conocer las fracciones de milímetros y poder calcular un porcentaje de expansión más aproximado. La figura 3.10 muestra en detalle la medición del diámetro de una pastilla de suelo posterior al proceso de secado y mediante un vernier digital.

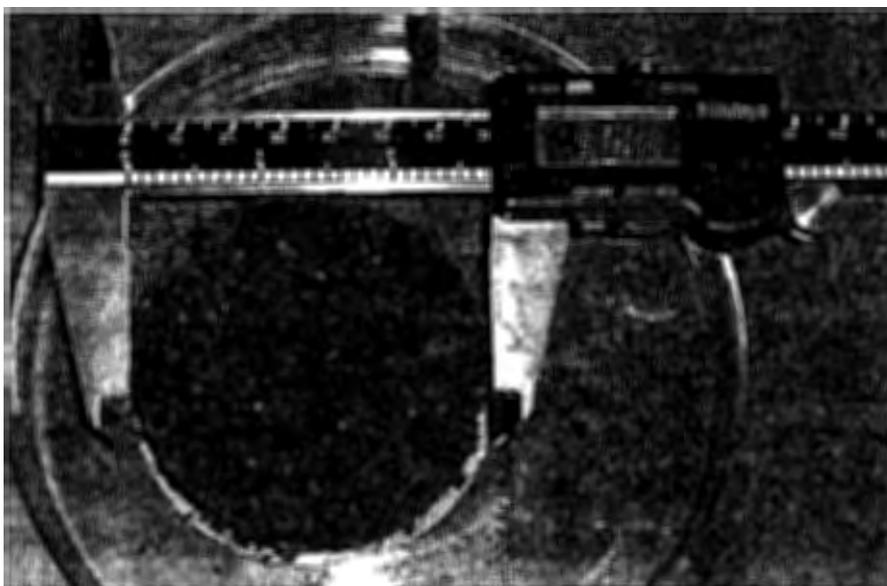


Figura 3.10 Medición del diámetro de una pastilla de suelo mediante un vernier digital.

3.2.7 Cálculo del porcentaje de expansión.

El cálculo de la expansión libre para cada ciclo individual se realizará mediante la ecuación dispuesta, la cual toma en cuenta la altura de la muestra de suelo antes y después de la etapa de humedecimiento. Para esto se llevará un registro de las deformaciones (expansión) mediante las lecturas del micrómetro, las cuales se convertirán a una unidad de medición conocida y de fácil manejo. Para los propósitos de este ensaye se sugiere en milímetros. Algunos micrómetros están graduados en fracciones de pulgada, pero si se precisa, una conversión de unidades soluciona este detalle.

La propuesta de este ensaye desprecia la contracción en el área de la pastilla con fundamento en que dicha contracción es prácticamente similar en cada ciclo de secado y por tanto los valores de expansión podrán ser comparados bajo esta consideración. Sin embargo; al tener la precaución de tomar nota de los valores de diámetro y altura de la pastilla en cada ciclo, (antes y después del proceso de humedecimiento), permite crear un criterio alternativo para evaluar la fatiga de expansión en términos del volumen inicial y final de la pastilla. Este segundo criterio permitirá un conocimiento más acertado del comportamiento de la muestra de suelo, sin embargo; el criterio original basado en la diferencia de alturas sigue siendo la prioridad de este método propuesto dado que parte del objetivo es recrear las condiciones que pudo haber utilizado Chen durante su experimentación al notar el fenómeno de la fatiga de expansión.

Los esfuerzos por mantener la regularidad del ensaye permitirán una continuidad sobre el comportamiento del suelo, permitiendo que la única variable sea la expansión lograda por la naturaleza del suelo que se este estudiando. La figura 3.11 describe gráficamente el desarrollo de las deformaciones causadas a la pastilla de suelo por la acción del humedecimiento a través del tiempo.

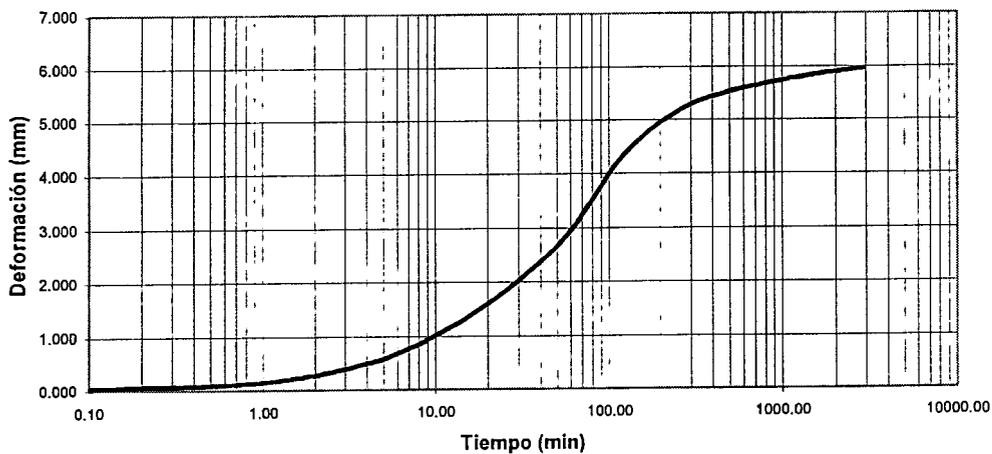


Figura 3.11.- Gráfica típica de las deformaciones (expansión), de una muestra de suelo durante el proceso de humedecimiento.

3.2.8 Observaciones

Conforme el número de ciclos aumenta, el procedimiento se convierte en una rutina en donde es poco probable cometer un error que ponga en peligro la continuidad del ensaye, sin embargo la pericia del operador sigue siendo un factor determinante en el proceso de cada ensaye. Se recomienda que para una muestra de suelo dado, se utilicen siempre las mismas piedras porosas, cazuela, cabezal, balín, consolidómetro y micrómetro. De esta forma se somete el espécimen a las mismas condiciones en cada ciclo creando así condiciones constantes en cada ciclo.

Durante la etapa experimental de este procedimiento propuesto, se observa que conforme el número de ciclos aumenta, aparecen grietas superficiales en ambas caras de la pastilla de suelo. Estas no ponen en riesgo en ningún momento la estructura del suelo y su posible única influencia en algún paso del procedimiento se observa en el proceso de humedecimiento, retardando unos cuantos segundos más el primer movimiento de la aguja del micrómetro. Al finalizar el humedecimiento estas grietas tienden a desaparecer por el mismo proceso de expansión. Este fenómeno ocurre en campo, así que podría pensarse en un acierto el crear las condiciones reales del suelo.

Finalmente, los valores del porcentaje de expansión se grafican versus el número de ciclo correspondiente para de esta forma observar el comportamiento de la expansión conforme el número de ciclos se desarrolla. Esta gráfica se observa con detenimiento en los resultados que se mencionan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Tras establecer el procedimiento adecuado para los ensayos de fatiga de expansión en un suelo arcilloso, que para el caso de esta investigación se conformaron con muestras obtenidas del fraccionamiento de Jurica en Querétaro, se procedió con los ensayos correspondientes. En este capítulo se muestran los resultados de los ensayos de así como las observaciones pertinentes para cada caso en particular.

Los 6 ensayos que se presentan pertenecen al mismo tipo de suelo en dos diferentes profundidades (ensayos No. 1 a 5 a 0.5 m y ensaye No. 6 a 1.0 m), reduciendo el tiempo de ejecución dado el procedimiento de laboratorio propuesto. Lo anterior se llevo a cabo observando que la disminución del tiempo de saturación no afecta sustancialmente el desarrollo de la expansión máxima.

Cumpliendo el objetivo de la metodología descrita en el capítulo anterior, cabe destacar que dichos ensayos se realizaron con un énfasis en crear las mismas condiciones en cada ciclo de humedecimiento – secado.

4.1 Propiedades índice del suelo utilizado en los ensayos.

En la tabla 4.1 se muestra las características del suelo utilizado a las dos diferentes profundidades propuestas en que se practicó el ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos.

Tabla 4.1 Propiedades índice del suelo en estudio.

Prof. (m)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)	Límite de Contracción (%)	Densidad de sólidos -	Humedad (%)	Peso Volumétrico (ton/m ³)
0.50	82.50	33.16	49.34	16.00	2.49	18.18	1.78
1.00	78.25	36.49	41.76	14.00	2.77	21.15	1.72

Los datos anteriores nos indican que se está tratando con un suelo CH, que de acuerdo a la clasificación general del SUCS corresponde a una arcilla de alta compresibilidad, de consistencia firme, con presencia de grietas y materia orgánica dentro de los primeros 3.0 metros de profundidad. Investigaciones anteriores en el mismo fraccionamiento (Pérez, 1993), indican un valor máximo de presión de expansión de 36.5 kg/cm^2 y expansión volumétrica de 30.0 % a 0.5 m de profundidad. Estos valores disminuyen a una presión de expansión de 28.80 kg/cm^2 y una expansión volumétrica de 25.20% en la profundidad de 1.0 m.

A continuación se describen los 6 ensayos de fatiga de expansión realizados en este trabajo; cada ensaye consiste de 7 a 10 ciclos de humedecimiento secado. El comportamiento particular de cada ensaye y las observaciones correspondientes se presentan en cada descripción.

4.2 Ensaye de fatiga de expansión No. 1.

Los primeros ciclos de humedecimiento se realizaron en un tiempo de 72 horas, sin embargo; al notar que la diferencia en la deformación alcanzada entre el periodo de 48 a 72 horas se puede considerar mínima en relación a la expansión total, se asumió fijar a 48 horas el periodo de humedecimiento de la muestra para los ciclos subsecuentes de este y los demás ensayos de fatiga de expansión. Así mismo, se fijó la temperatura de secado al horno en $30 \text{ }^\circ\text{C}$, dadas las condiciones descritas en el procedimiento propuesto para el ensaye de fatiga de expansión presentado en el capítulo anterior.

En los primeros ciclos de secado se realizaron lecturas de pérdida de peso de la muestra en función del tiempo transcurrido del secado, mismas que sirvieron para comprobar un comportamiento que puede considerarse estable en todo el proceso de secado, comportándose este como una curva logarítmica inversa al proceso de expansión por saturación.

La tabla 4.2 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional en cada uno de los 10 ciclos que corresponden al ensaye de fatiga de expansión No. 1. Es de hacerse notar que al existir datos con valor negativo, estos no afectan en el resultado final del ciclo de humedecimiento correspondiente. El que el espécimen de suelo pierda altura en los primeros minutos del humedecimiento se debe a que el suelo se reacomoda en su sentido horizontal, perdiendo inicialmente un valor relativamente pequeño de su altura, mismo que recupera conforme el tiempo transcurre y el humedecimiento genera la expansión del espécimen.

Tabla 4.2 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 1.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.10	-0.27	0.02	-0.74	0.27	-0.32	0.16	-0.44	0.30	0.19
0.25	0.21	-0.31	0.06	-1.38	0.41	-0.23	0.27	-0.55	0.42	0.35
0.50	0.26	-0.36	0.05	-2.22	0.54	-0.10	0.43	-0.54	0.52	0.47
1.00	0.57	-0.35	0.23	-2.66	0.86	0.23	0.65	-0.54	0.91	0.80
2.00	0.94	-0.20	1.04	-2.91	1.42	0.84	1.13	-0.33	1.61	1.37
3.00	1.13	-0.04	1.57	-2.75	1.96	1.39	1.50	0.03	2.42	2.07
4.00	1.41	0.10	3.17	-2.53	2.47	1.90	1.91	0.45	3.08	2.71
5.00	1.65	0.39	4.02	-2.27	3.00	2.43	2.16	0.87	3.71	3.47
8.00	2.24	0.90	5.44	-1.53	3.91	3.62	3.06	1.98	4.96	4.89
10.00	2.81	1.43	6.14	-1.14	5.38	4.22	3.60	2.42	5.66	5.58
15.00	3.30	1.89	7.28	0.66	7.15	5.53	4.71	3.64	6.73	6.41
30.00	4.95	2.79	9.22	4.90	9.47	7.58	6.69	6.10	7.34	7.06
60.00	7.86	4.22	9.78	6.61	9.90	8.27	8.45	7.03	7.60	7.55
120.00	11.20	5.40	10.24	6.83	10.74	8.59	9.04	7.47	7.86	7.74
240.00	13.36	5.65	10.67	7.09	10.89	8.84	9.31	7.57	8.08	7.96
480.00	13.75	5.78	11.01	7.26	11.06	9.79	9.53	7.71	8.37	8.15
1440.00	14.32	5.94	11.49	7.39	11.11	9.84	9.63	7.89	8.66	8.39
2880.00	14.63	6.25	11.92	7.48	11.23	9.94	9.65	8.04	8.86	8.42

La figura 4.1 muestra gráficamente el valor del porcentaje de expansión alcanzado conforme el tiempo transcurre en la etapa de humedecimiento de cada ciclo. Esto permite visualizar de una forma más legible los datos que se presentan en la tabla 4.2. Se observa el comportamiento del porcentaje de expansión unidimensional en función del ciclo correspondiente.

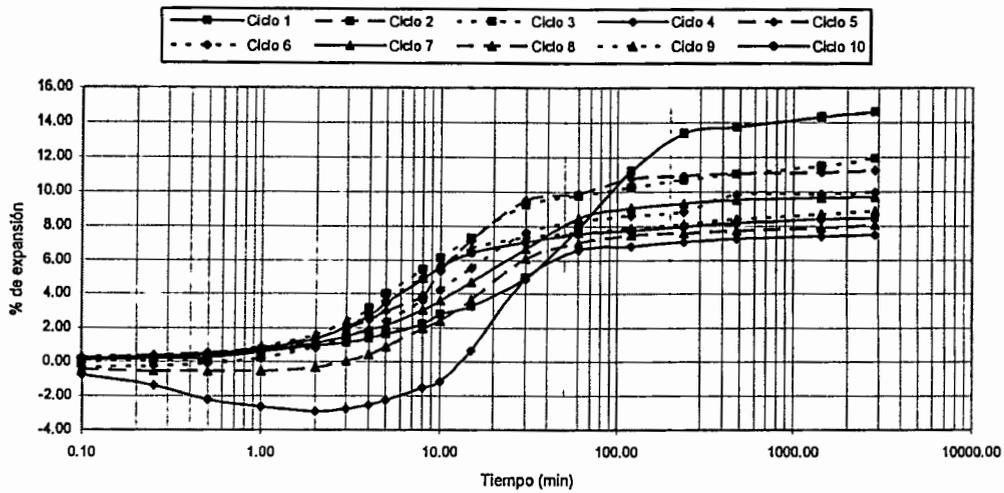


Figura 4.1 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.1

Bajo otro enfoque, la figura 4.2 muestra el comportamiento del volumen inicial y final en cada ciclo de secado – humedecimiento del ensaye de fatiga de expansión, mediante el cual se puede observar un comportamiento lineal en ambas condiciones (inicial y final), que permiten mantener un cierto control de lo que sucede con el espécimen conforme el número de ciclos aumenta.

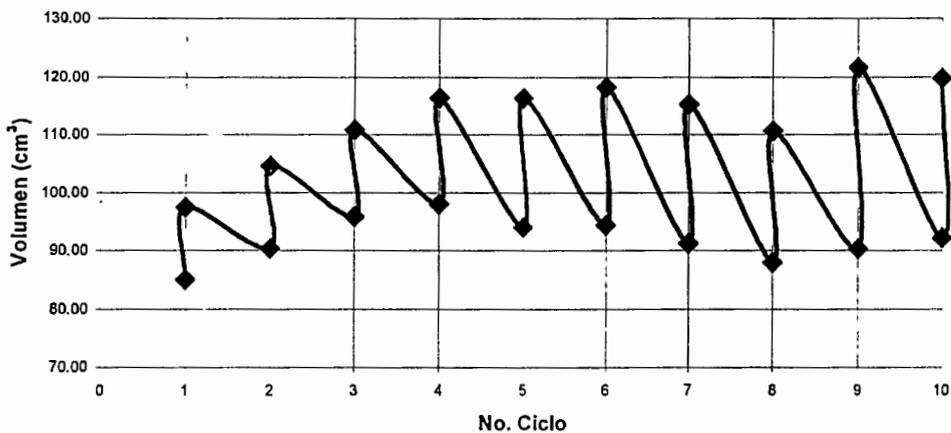


Figura 4. 2 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.1.

El criterio de Chen (1975) parte de una gráfica en la cual relaciona el valor del porcentaje de expansión unidimensional en cada ciclo de humedecimiento secado. La figura 4.3 muestra el arreglo de estos valores de la forma descrita anteriormente, de las cuales su puede mencionar que la línea de tendencia (logarítmica) que se genera, muestra un comportamiento mediante el cual se disminuye el valor de la expansión unidimensional conforme se aumenta el número de ciclos de humedecimiento – secado de la muestra de suelo.

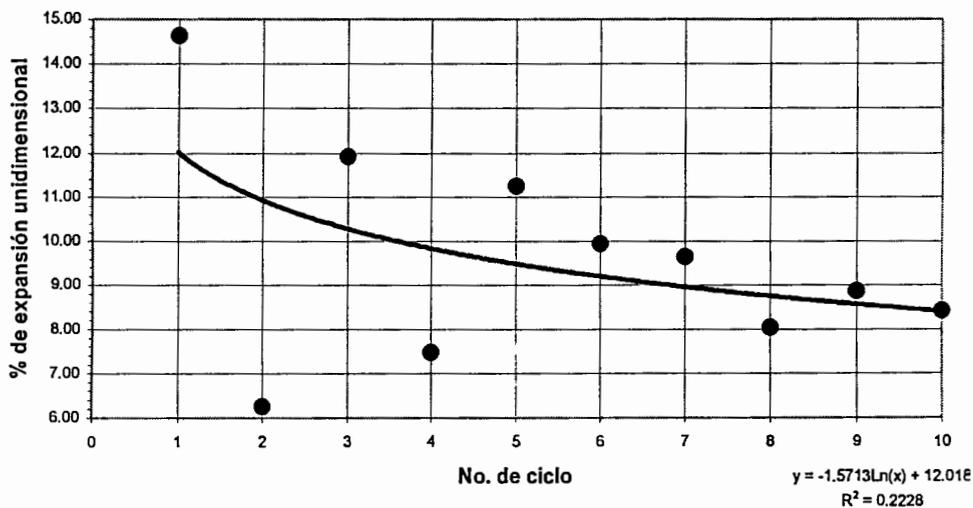


Figura 4.3 Ensayo de fatiga de expansión No. 1

Es de hacerse notar que existe una cierta inconsistencia en los valores de expansión de acuerdo al ajuste de la línea de tendencia, es decir; el porcentaje de expansión puede aumentar ligeramente en relación al porcentaje obtenido en el ciclo inmediato anterior. Sin embargo; el ciclo subsecuente disminuye su valor, definiendo de esta manera la línea de tendencia que muestra la gráfica.

Originalmente se planeó realizar solo 6 ciclos de humedecimiento – secado, tal como lo muestra la curva de fatiga de expansión reportada por Chen (1975). Sin embargo; al observar el particular comportamiento del suelo en estudio se tomó la decisión de someterlo a 4 ciclos mas, llegando así a un total de 10 ciclos para el ensayo de fatiga de expansión.

Los resultados gráficos se consideran aceptables con fundamento en el desarrollo experimental de la prueba y la línea de tendencia define el comportamiento de fatiga por expansión esperado en el suelo.

La razón por la cual el punto correspondiente al segundo ciclo toma un valor pequeño en relación al resto de los ciclos subsecuentes se debe a un posible error en la lectura del micrómetro durante la etapa de humedecimiento del espécimen. Sin embargo; esto no afecta la continuidad del ensaye pudiendo así realizar los ciclos subsecuentes.

Este primer ensaye sirvió de base para desarrollar las posibilidades en la ejecución de la prueba fijando así el procedimiento propuesto, mismo que se utilizó sigilosamente en los demás ensayes de fatiga de expansión.

4.3 Ensaye de fatiga de expansión No. 2.

Ya con el antecedente inmediato del ensaye No. 1 se procedió a realizar este segundo ensaye tomando en cuenta las consideraciones que el primero arrojó en su ejecución. Los ciclos de humedecimiento – secado se realizaron sin ningún contratiempo u observación que se precise mencionar. La tabla 4.3 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional en cada ciclo correspondiente al ensaye de fatiga de expansión No. 2.

No se presenta un valor de porcentaje de expansión unidimensional total para el segundo ciclo dado que al realizar la saturación se presentaron algunos problemas para su control de lecturas, sin embargo; el tiempo de humedecimiento corresponde al sugerido en el procedimiento propuesto para el ensaye.

De esta forma se pudo mantener la continuidad de la muestra, sin afectar esto el resultado de los ciclos subsecuentes.

Tabla 4.3 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 2.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.11	0.11	0.02	0.20	0.33	0.35	0.17	0.17	0.19	0.16
0.25	0.13	0.15	0.02	0.32	0.53	0.63	0.35	0.27	0.25	0.23
0.50	0.16	0.27	0.20	0.47	0.69	0.91	0.61	0.36	0.47	0.42
1.00	0.27	0.59	0.88	0.70	0.97	1.26	0.97	0.50	0.76	0.70
2.00	0.80	1.06	2.00	1.13	1.34	1.75	1.73	0.80	1.27	1.23
3.00	1.34	1.54	2.74	1.52	1.73	2.24	2.83	1.13	1.73	1.58
4.00	1.87	2.00	3.38	1.87	2.14	2.88	3.73	1.45	2.20	2.15
5.00	2.62	2.40	4.02	2.17	2.57	3.46	4.38	1.76	2.71	2.52
8.00	3.49	2.83	5.27	2.78	3.72	4.59	6.10	3.02	4.19	4.03
10.00	4.20	3.31	5.86	3.17	4.32	5.11	7.00	3.88	5.16	5.11
15.00	5.35	3.69	7.04	4.36	5.92	6.44	8.59	5.75	7.61	7.24
30.00	7.75	4.57	8.89	8.11	10.02	9.18	10.65	8.64	11.76	11.13
60.00	11.55	4.97	9.05	9.84	10.39	10.01	10.86	10.05	11.81	11.29
120.00	18.72	5.48	9.15	10.08	10.48	10.38	10.92	10.61	11.84	11.53
240.00	23.93	5.89	9.30	10.18	10.50	10.64	11.09	10.72	11.92	11.61
480.00	24.20	-	9.34	10.23	10.51	10.75	11.13	10.86	11.93	11.66
1440.00	25.24	-	9.36	10.25	10.61	10.79	11.13	11.06	11.95	11.68
2880.00	25.53	-	9.37	10.25	10.62	10.83	11.13	11.07	11.97	11.69

La figura 4.4 muestra el valor del porcentaje de expansión conforme el tiempo transcurre en la etapa de humedecimiento correspondiente a cada ciclo. Se observa el comportamiento del porcentaje de expansión unidimensional en función del ciclo correspondiente, pudiendo compararse entre si los ciclos.

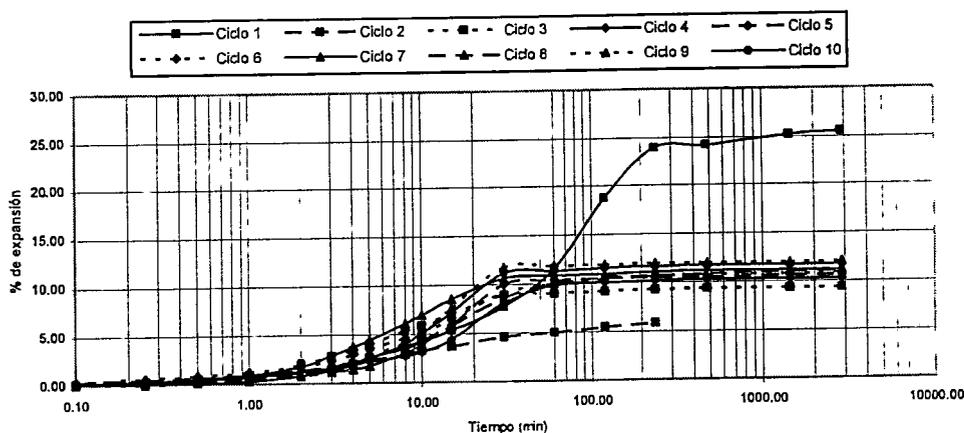


Figura 4.4 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.2

La figura 4.5 muestra el comportamiento del volumen inicial y final en cada ciclo de secado – humedecimiento del ensaye de fatiga de expansión, de esta forma se observa que el volumen inicial en cada ciclo es relativamente constante, en tanto que existe un pequeño aumento en el volumen final de cada ciclo que resulta en una curva con una tendencia ascendente.

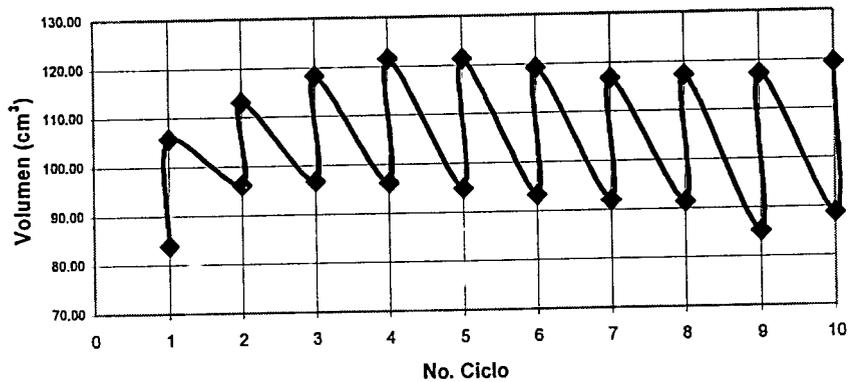


Figura 4. 5 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 2.

De acuerdo al criterio propuesto por Chen (1975), mismo que se utiliza en el presente documento, la figura 4.6 muestra los valores de la expansión unidimensional correspondiente a cada ciclo, determinando de esta forma la línea de tendencia general.

Aunque el comportamiento del porcentaje de expansión unidimensional conforme aumenta el número de ciclos no es tan claro como sucede en el primer ensaye de fatiga de expansión, la línea de tendencia muestra un comportamiento de disminución de la expansión a través del paso de los ciclos.

Se recuerda que el valor del porcentaje de expansión correspondiente al segundo ciclo no se presenta, debido a que no se completaron las lecturas del micrómetro en la etapa de humedecimiento.

En este ensaye en particular el valor del porcentaje de expansión correspondiente al primer ciclo se dispara en relación a los ciclos subsecuentes, fenómeno que puede ser asociado por la liberación de esfuerzos internos de la muestra de suelo, mismo que llega a un estado cercano al equilibrio conforme se continúa ejecutando los ciclos de humedecimiento – secado.

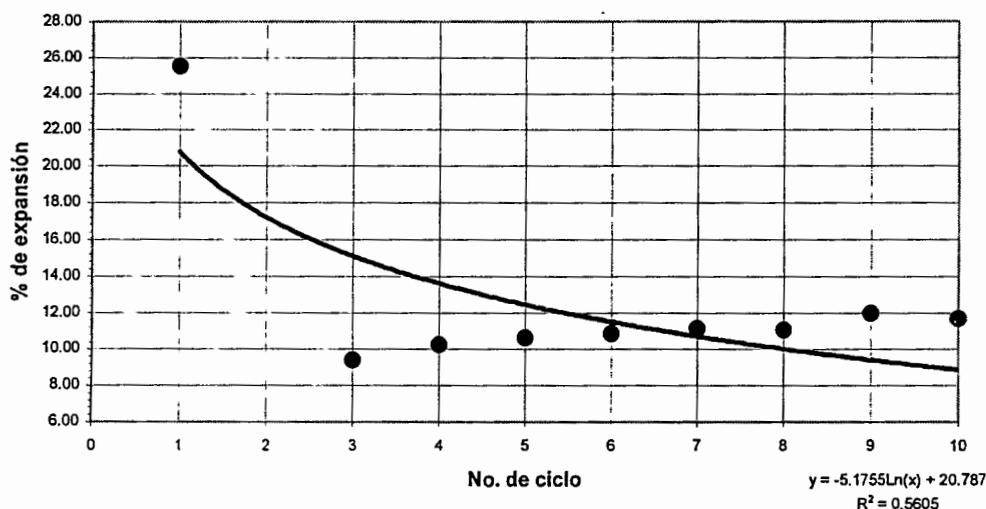


Figura 4.6 Ensaye de fatiga de expansión No. 2

4.4 Ensaye de fatiga de expansión No. 3

Este ensaye se realizó con mucha continuidad, situación que permitió poner a prueba la relación entre los dos ensayes descritos anteriormente y el presente, de acuerdo al tiempo de ejecución del total de ciclos, que en este caso fue prácticamente sin interrupciones. La tabla 4.4 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional conforme el periodo de humedecimiento transcurre en cada uno de los ciclos.

Al igual que en el ensaye No. 1, se presentan valores negativos de porcentaje de expansión en los primeros minutos de ciertos ciclos. Como se mencionó anteriormente, este fenómeno se asocia a un reacomodo de la estructura del suelo que conforma el espécimen.

Conforme el tiempo sigue transcurriendo, la altura inicial se recupera dando lugar a valores positivos de expansión. De acuerdo a los valores que proporciona la tabla 4.4, se traza la figura 4.7 definiendo por medio de líneas el valor del porcentaje de expansión en función del tiempo para cada ciclo del ensaye.

Tabla 4.4 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 3.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.26	0.20	0.43	0.20	-0.19	0.12	0.12	0.06	0.21	-0.25
0.25	0.37	0.24	0.64	0.21	-0.29	0.12	0.17	0.09	0.36	-0.79
0.50	0.52	0.33	0.76	0.26	-0.39	0.15	0.29	0.13	0.51	-0.94
1.00	0.79	0.44	0.93	0.37	-0.48	0.18	0.40	0.20	0.79	-0.95
2.00	1.47	0.71	1.24	0.60	-0.58	0.27	0.70	0.30	1.12	-0.77
3.00	2.06	1.09	1.41	0.91	-0.59	0.29	0.88	0.38	1.33	-0.49
4.00	2.61	1.45	1.51	1.01	-0.59	0.33	1.09	0.49	1.54	-0.44
5.00	3.04	1.87	1.62	1.21	-0.58	0.39	1.27	0.58	1.78	-0.28
8.00	4.45	2.88	1.95	1.84	-0.33	0.67	1.71	0.79	2.55	0.30
10.00	5.29	3.47	2.21	2.21	-0.09	0.96	2.00	0.91	3.08	0.97
15.00	7.00	4.67	2.99	2.91	0.67	1.84	2.78	1.30	4.76	2.27
30.00	10.58	6.95	5.39	4.71	2.41	3.94	4.45	2.55	5.72	4.03
60.00	15.36	9.68	8.00	7.02	3.93	5.53	5.89	5.40	6.71	5.12
120.00	22.52	12.42	9.27	9.33	5.11	6.24	6.78	7.49	7.19	5.64
240.00	26.66	15.04	10.03	10.83	5.81	6.53	7.01	7.88	7.50	5.84
480.00	28.72	15.75	10.15	11.24	6.01	6.63	7.10	8.03	7.73	6.01
1440.00	30.39	16.11	10.23	11.42	6.12	6.78	7.19	8.26	8.00	6.14
2880.00	31.05	16.32	10.37	11.53	6.24	6.84	7.29	8.35	-	6.31

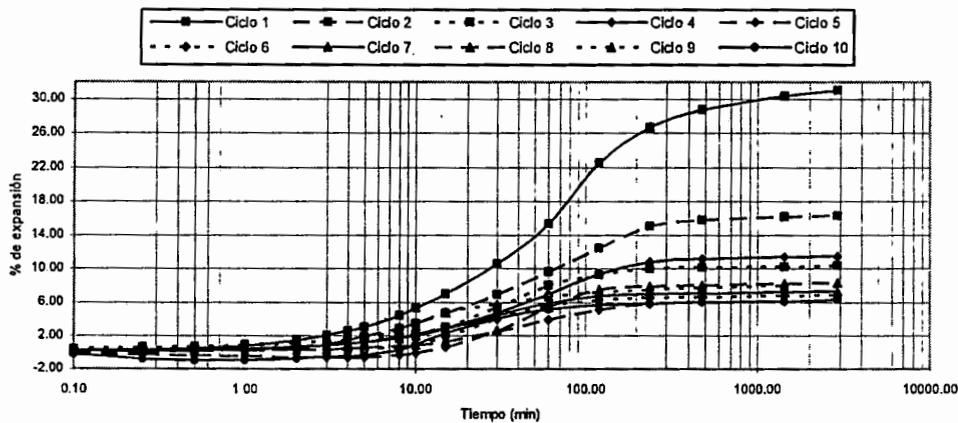


Figura 4.7 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No.3

Continuando con el análisis dispuesto en los ensayos descritos anteriormente, la figura 4.8 muestra el comportamiento del volumen inicial y final en cada ciclo de secado – humedecimiento. Esta gráfica describe un comportamiento linealmente ascendente para el volumen inicial y final conforme el número de ciclos aumenta. Aunque dicho aumento es pequeño, no deja de llamar la atención dado el comportamiento de las expansiones de cada ciclo, en donde el cambio de volumen se observa casi constante en cada ciclo.

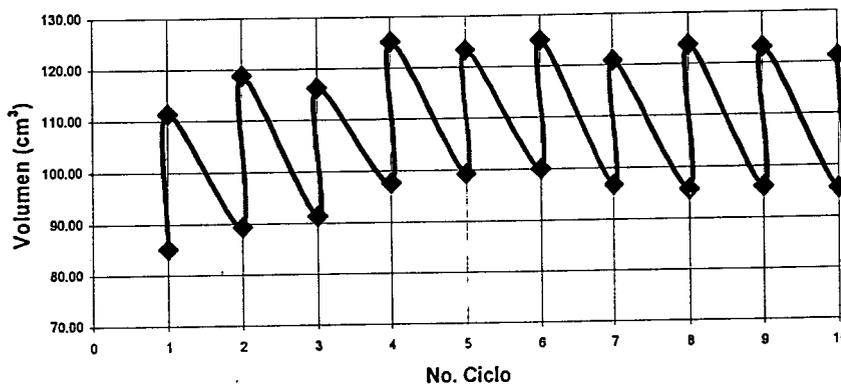


Figura 4. 8 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensayo de fatiga de expansión No. 3.

El comportamiento del porcentaje de expansión unidimensional en este ensayo se define gráficamente como lo muestra la figura 4.9. El valor correspondiente al primer ciclo se continúa separando del resto de los ciclos, sin embargo; aún sin considerar la influencia del valor del primer ciclo de este ensayo, la línea de tendencia que los puntos generan define un comportamiento asintótico conforme el número de ciclos va en aumento.

En este ensayo el valor máximo alcanzado en términos del porcentaje de expansión unidimensional es de 31.05 % (primer ciclo), y el valor menor es de 6.32 % (décimo ciclo). Los puntos en la gráfica muestran un comportamiento que define en plenitud la fatiga por expansión de la muestra de suelo, a pesar de pequeños aumentos en el porcentaje de expansión en ciclos cercanos.

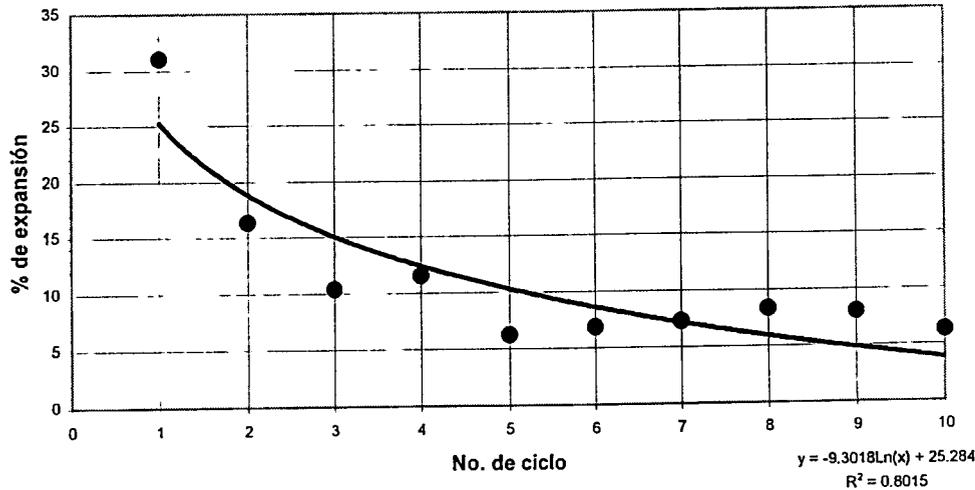


Figura 4.9. Ensaye de fatiga de expansión No. 3

4.5 Ensaye de fatiga de expansión No. 4

Este ensaye se realizó a la par que el ensaye No. 3, permaneciendo las mismas condiciones de continuidad en cada ciclo. La tabla 4.5 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional a cada determinado lapso de tiempo en cada uno de los 10 ciclos que corresponden al ensaye de fatiga de expansión.

El ciclo No. 9 de este ensaye de fatiga de expansión no presenta lectura en el lapso correspondiente a 48 horas dado que la lectura observada se consideró errónea, pudiendo haber ocurrido algún movimiento accidental en el brazo del consolidómetro generando esto que el contacto entre la esfera metálica y el vástago que comunica al micrómetro. El tiempo de humedecimiento se cumplió satisfactoriamente, pudiendo continuar con el procedimiento del ensaye para su siguiente ciclo.

Con los valores que proporciona la tabla 4.5, se traza la figura 4.10 que define el desarrollo del porcentaje de expansión unidimensional en cada ciclo de humedecimiento, de esta forma se puede observar el comportamiento global del ensaye en un punto en particular.

Tabla 4.5 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 4.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.32	0.13	0.21	0.14	0.24	0.10	0.07	0.04	0.04	-0.08
0.25	0.58	0.20	0.51	0.21	0.53	0.13	0.16	0.05	0.08	-0.09
0.50	0.95	0.31	0.77	0.33	0.71	0.20	0.37	0.12	0.16	-0.09
1.00	1.58	0.57	1.05	0.45	1.02	0.28	0.52	0.21	0.28	-0.09
2.00	2.58	1.18	1.37	0.68	1.42	0.40	0.94	0.34	0.44	-0.10
3.00	3.32	1.86	1.59	0.87	1.73	0.55	1.30	0.45	0.60	0.15
4.00	3.89	2.53	1.78	1.00	1.98	0.81	1.71	0.56	0.74	0.41
5.00	4.42	3.23	1.96	1.14	2.21	1.03	2.15	0.67	0.86	0.66
8.00	5.53	4.94	2.81	1.47	2.93	1.66	3.40	0.91	1.36	1.36
10.00	6.12	5.91	3.43	1.69	3.44	2.20	4.05	1.07	1.71	1.76
15.00	7.26	7.82	4.99	2.19	4.80	3.40	5.44	1.44	2.94	2.75
30.00	9.67	10.75	8.58	6.24	8.53	5.94	8.17	2.85	5.88	6.41
60.00	15.26	12.59	11.09	10.82	10.74	9.56	9.74	5.50	7.79	8.36
120.00	16.68	13.29	11.51	12.64	11.09	10.70	10.70	7.88	8.29	9.17
240.00	17.69	13.75	11.67	12.86	11.17	11.14	10.92	12.13	8.89	9.50
480.00	17.96	13.93	11.69	12.89	11.22	11.30	11.06	12.24	9.19	9.77
1440.00	18.13	13.95	11.73	12.93	11.25	11.63	11.21	12.33	9.56	10.07
2880.00	18.21	13.98	11.82	12.95	11.28	11.72	11.30	12.37	-	12.45

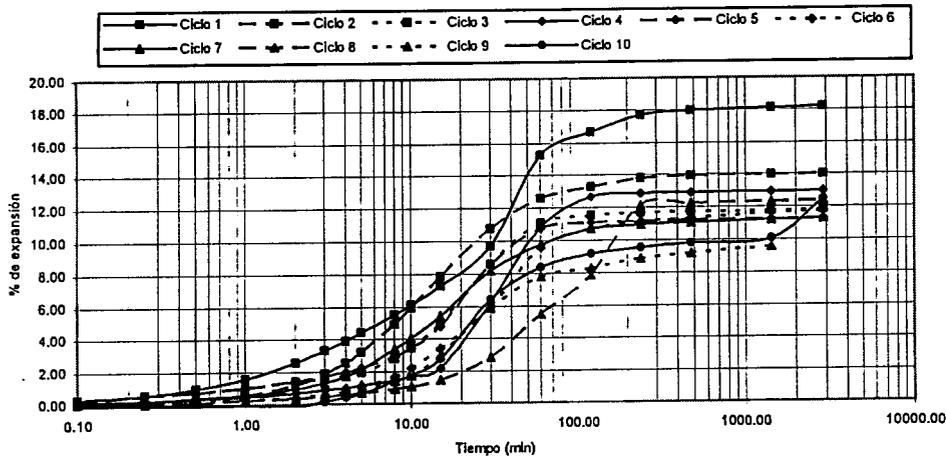


Figura 4.10 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 4.

La medición del volumen inicial del espécimen en cada ciclo del ensaye, indica un pequeño aumento del mismo conforme se realizan los ciclos correspondientes. Esto indica que en este ensaye no se recuperó el volumen inicial del espécimen, a pesar de llegar al contenido de agua inicial después del

proceso de secado. El volumen del espécimen una vez transcurrido el tiempo de humedecimiento también indica un ligero incremento conforme el número de ciclos se incrementa. La figura 4.11 muestra este comportamiento.

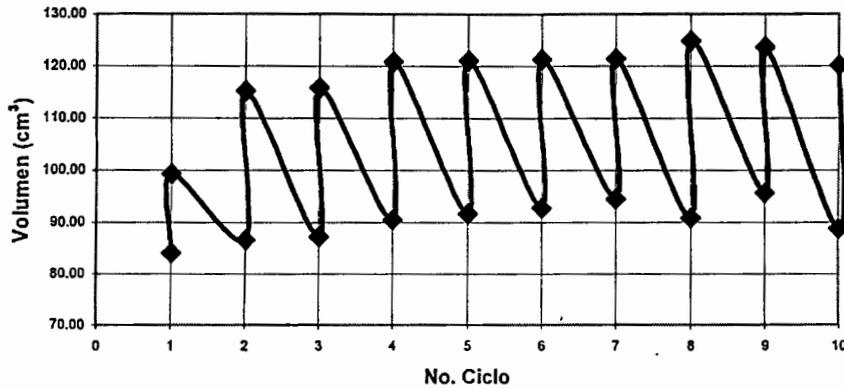


Figura 4. 11 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 4.

La figura 4.12 muestra el formato para representar el porcentaje de expansión de la muestra de suelo de acuerdo al número de ciclo correspondiente. Al igual que los ensayos anteriores, la línea de tendencia define un comportamiento que tiende a disminuir el valor del porcentaje de expansión unidimensional conforme aumenta el número de ciclos.

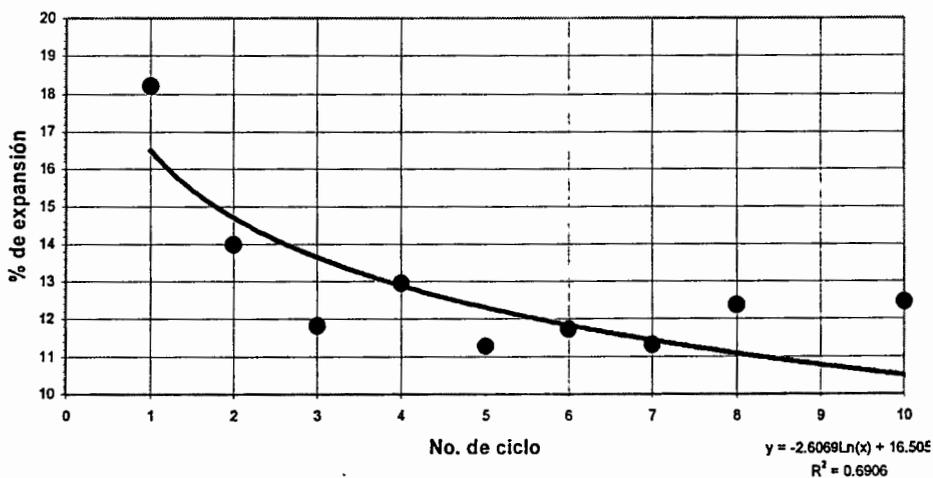


Figura 4.12. Ensaye de fatiga de expansión No. 4.

El comportamiento de los puntos que definen la gráfica se considera relativamente estable en relación a la línea de tendencia. El comportamiento descrito por Chen (1975) se torna con una menor desviación, lo que hace pensar nuevamente en que en su estudio pudo haber utilizado un tipo de suelo que no necesariamente fue una arcilla franca. La diferencia de porcentaje de expansión entre primer y segundo ciclo resulta menor en relación a los ensayos anteriores, y los valores de los ciclos subsecuentes son muy cercanos entre sí.

4.6 Ensaye de fatiga de expansión No. 5

Aunque la continuidad del ensaye se realizó de manera precisa, este ensaye se interrumpió tras culminar su séptimo ciclo. Esta decisión se justifica por el valor del porcentaje de expansión obtenido en cada ciclo y el resultado que en conjunto se obtiene. La tabla 4.6 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional en cada ciclo correspondiente al ensaye No. 5. Con estos valores se traza la figura 4.13 que define el porcentaje de expansión unidimensional con respecto al tiempo en cada ciclo de humedecimiento de este ensaye.

Tabla 4.6 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 5.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.25	0.28	0.11	0.19	0.09	0.17	0.02
0.25	0.32	0.56	0.28	0.32	0.20	0.26	0.10
0.50	0.41	0.96	0.29	0.49	0.33	0.40	0.18
1.00	0.62	1.76	0.39	0.76	0.56	0.60	0.35
2.00	1.82	3.27	0.59	1.24	0.93	0.96	0.66
3.00	2.93	4.66	0.76	1.62	1.30	1.28	0.95
4.00	3.52	5.83	0.98	1.98	1.56	1.50	1.21
5.00	4.04	6.82	1.23	2.30	2.00	2.10	1.61
8.00	5.27	9.10	2.08	3.14	2.85	2.80	2.46
10.00	6.01	10.15	2.71	3.55	3.45	3.32	2.59
15.00	7.35	12.03	3.85	4.46	4.71	4.38	3.66
30.00	10.08	12.95	5.82	6.37	7.71	7.27	6.16
60.00	13.89	13.19	10.14	8.97	9.83	9.60	8.83
120.00	15.28	13.49	11.43	9.90	9.94	9.78	9.47
240.00	17.06	13.96	11.66	10.23	10.02	9.80	9.56
480.00	17.89	14.43	11.70	10.39	10.04	9.82	9.89
1440.00	17.95	14.47	11.75	10.72	10.04	9.83	9.90
2880.00	17.98	14.51	11.88	10.92	10.05	9.83	9.91

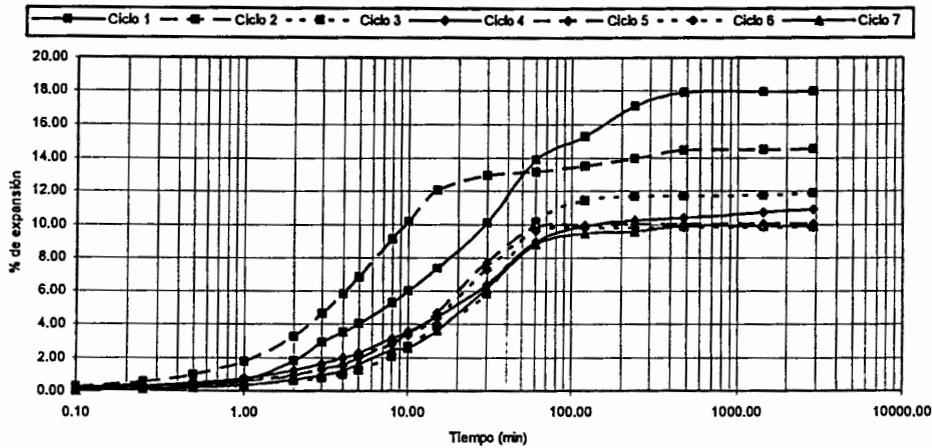


Figura 4.13 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 5.

Al igual que en los ensayos anteriores, las mediciones del volumen inicial del espécimen en cada ciclo del ensaye indican un aumento conforme se realizan los ciclos. Así mismo, el volumen del espécimen una vez transcurrido el tiempo de humedecimiento (final), indica un incremento conforme el número de ciclos aumenta. La figura 4.14 muestra gráficamente este comportamiento.

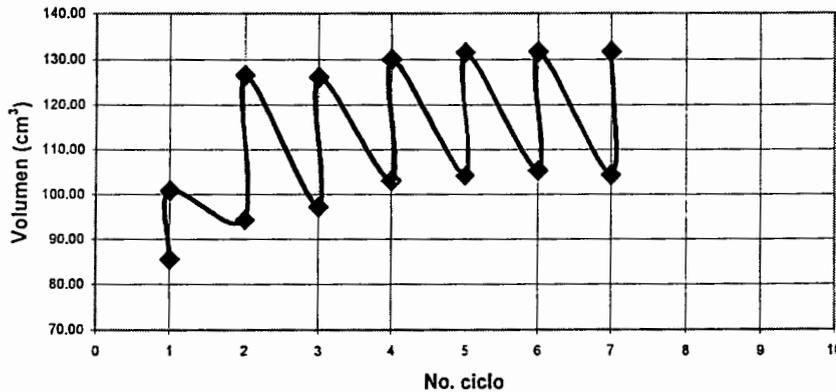


Figura 4. 14 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 5.

El formato que representa el porcentaje de expansión de la muestra de suelo de acuerdo al número de ciclo correspondiente se muestra en la figura 4.15. Al igual que los ensayos anteriores, la línea de tendencia define un

comportamiento que tiende a disminuir el valor del porcentaje de expansión unidimensional conforme aumenta el número de ciclos.

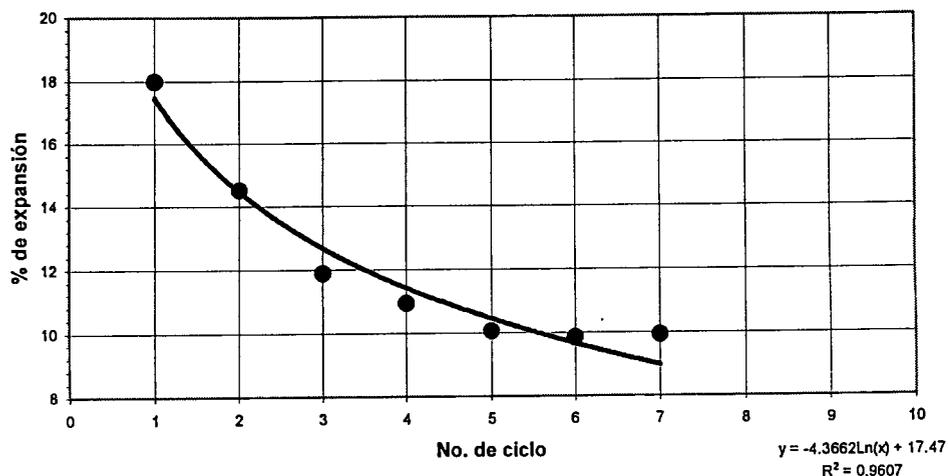


Figura 4.15. Ensaye de fatiga de expansión No. 5.

Con un comportamiento más regular que los ensayos anteriores, el fenómeno de fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento – secado se muestra palpable en este ensaye. La línea de tendencia describe un comportamiento cercano a una asíntota para el valor porcentual de los últimos ciclos.

4.7 Ensaye de fatiga de expansión No. 6

La profundidad de la muestra de suelo utilizada corresponde a 1.0 m. Por las mismas condiciones que el ensaye No. 5, este ensaye se interrumpió tras culminar su séptimo ciclo. Esta decisión se justifica igualmente por el valor del porcentaje de expansión obtenido en cada ciclo y el resultado que en conjunto se obtiene.

La tabla 4.7 muestra el valor del porcentaje de expansión unidimensional en cada uno de los ciclos correspondientes al ensaye No. 6.

Tabla 4.7 Porcentaje de expansión unidimensional versus tiempo del ensaye de fatiga de expansión No. 6.

Tiempo (min)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.19	0.14	0.07	0.10	0.13	0.33	0.21
0.25	0.29	0.19	0.13	0.17	0.14	0.44	0.39
0.50	0.53	0.23	0.20	0.30	0.17	0.66	0.55
1.00	0.87	0.35	0.29	0.36	0.20	0.99	0.87
2.00	1.58	0.58	0.47	0.56	0.48	1.49	1.31
3.00	2.17	0.87	0.60	0.91	0.83	1.89	1.76
4.00	2.67	1.19	0.91	1.27	1.23	2.20	2.07
5.00	3.14	1.58	1.13	1.77	1.70	2.53	2.42
8.00	4.17	3.04	1.45	2.59	2.48	3.32	3.05
10.00	4.83	3.84	3.15	3.20	2.97	3.98	3.77
15.00	6.15	5.47	4.15	4.44	4.16	5.06	4.68
30.00	8.85	10.61	6.45	8.48	7.34	8.26	7.95
60.00	11.91	14.89	10.28	10.21	9.75	10.62	9.80
120.00	15.80	17.00	11.79	12.02	10.88	11.56	10.81
240.00	21.66	17.57	14.41	12.38	11.16	11.76	11.41
480.00	25.53	17.76	15.73	12.85	11.28	11.81	11.55
1440.00	26.59	18.17	15.92	13.01	11.49	12.00	11.59
2880.00	27.39	18.29	16.01	13.18	11.73	12.08	11.61

Con estos valores se traza la figura 4.16, la cual define por medio de líneas continuas el desarrollo del porcentaje de expansión unidimensional con respecto al tiempo en cada ciclo de humedecimiento de este ensaye.

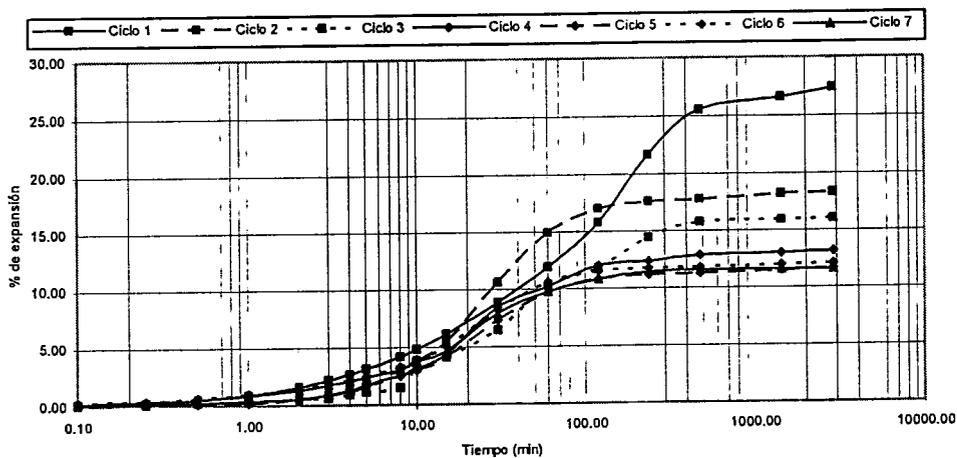


Figura 4.16 Porcentaje de expansión en cada ciclo del ensaye de fatiga de expansión No. 6.

Aunque en menor grado que en los ensayos anteriores, la medición del volumen inicial del espécimen en cada ciclo indica un aumento conforme se realizan los ciclos. Así mismo, el volumen final una vez transcurrido el tiempo de humedecimiento, indica un incremento conforme el número de ciclos aumenta. La figura 4.17 muestra gráficamente este comportamiento.

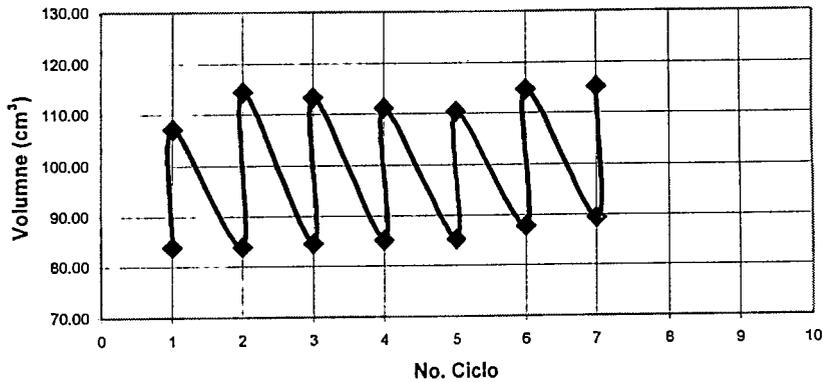


Figura 4. 17 Comportamiento del volumen inicial y final del espécimen en cada ciclo del ensayo de fatiga de expansión No. 6.

La figura 4.18 muestra el formato de gráfica para representar el fenómeno de fatiga de expansión. La línea de tendencia define un comportamiento que tiende a disminuir el valor del porcentaje de expansión conforme aumenta el número de ciclos.

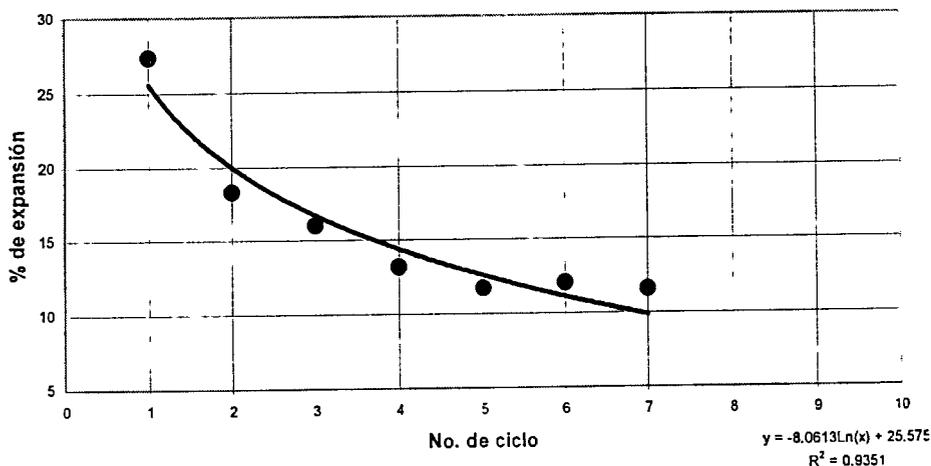


Figura 4.18. Ensayo de fatiga de expansión No. 6.

Muy comparable con el ensaye No. 5, el fenómeno de fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento – secado se muestra visiblemente en este ensaye. La línea de tendencia describe un comportamiento cercano a una asíntota para el valor porcentual de los últimos ciclos.

4.8 Resumen de ensayes de fatiga de expansión.

A manera de resumen se presenta la figura 4.19, donde se han concentrado los 6 ensayes realizados en el presente trabajo y de los cuales se destaca solamente la línea de tendencia de cada ensaye, mediante la cual se puede observar el comportamiento general de disminución del porcentaje de expansión conforme aumenta el número de ciclos de humedecimiento y secado.

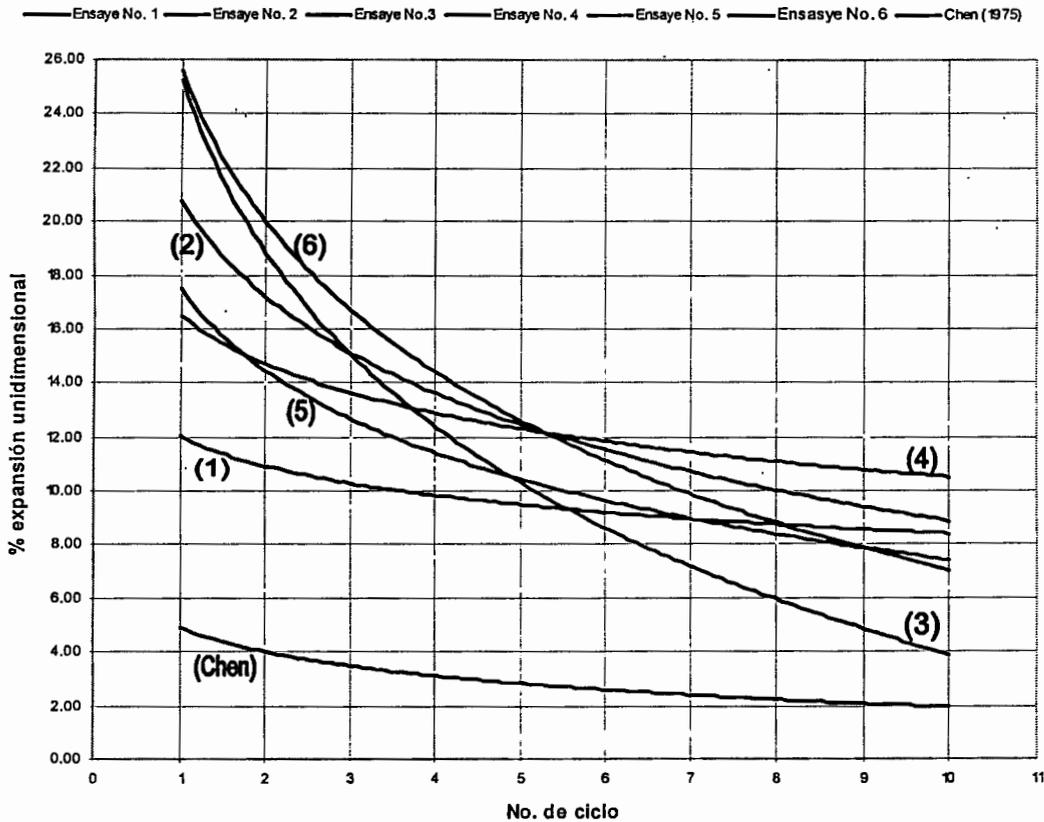


Figura 4.19 Resumen de la tendencia de los ensayes de fatiga de expansión.

Además, se han integrado los valores correspondientes a los reportados por Chen (1975), con el fin observar la diferencia de valores de expansión de este trabajo con los obtenidos por Chen, pese a utilizar un suelo remoldeado.

4.9. Comportamiento de la trayectoria de esfuerzos.

Al realizar el muestreo de un suelo, las condiciones de esfuerzo in situ pueden corresponder a una etapa de desecación o de humedecimiento. Evidentemente la historia de esfuerzos del suelo in situ corresponde a una infinidad de ciclos de secado y humedecimiento, pero en el momento de muestreo al material le corresponde una cierta succión y presión total.

En el caso del muestreo en el suelo del Fraccionamiento Jurica, éste se realizó antes de la temporada de lluvias cuando el suelo presenta una desecación máxima. Fredlund (1993) sugiere mantener un cuidado especial para la determinación del estado de esfuerzos in situ, llevando a cabo la corrección de resultados a causa de la alteración que produce el muestreo. Dicha alteración se genera por la pérdida de contenido de agua del suelo en el momento de labrar la muestra, y sumado a esto; el efecto del alivio de esfuerzos que ocurre en la muestra al perder el confinamiento y la carga del suelo que se encontraba arriba del nivel de la muestra.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los seis ensayos que corresponden a este trabajo, el comportamiento general corresponde a la disminución del porcentaje de expansión conforme se incrementa el número de ciclos de humedecimiento y secado. Se observa una diferencia importante del valor alcanzado en porcentaje de expansión entre el primer ciclo y el resto del ensayo. La figura 4.20 representa gráficamente el comportamiento del estado de esfuerzos que ocurre en el ensayo de fatiga de expansión. Es de aclarar que el movimiento ocurre solamente en el plano relación de vacíos versus succión ($u_a - u_w$), dado que al no utilizar sobrecargas durante el ensayo, la trayectoria de esfuerzos no genera movimientos en el plano relación de vacíos versus presión

total ($\sigma-u_a$). El punto (1) corresponde al valor de succión de la muestra de suelo antes de someter el espécimen al primer ciclo de saturación. Una vez que el suelo se humedece y se alcanza un grado casi total de saturación, la trayectoria de esfuerzos se dirige al punto (2), generando un decremento en la relación de vacíos (Δe_1). Al realizar la etapa de secado la trayectoria se traslada hacia el punto (3) donde se logra la humedad inicial del espécimen.

Al continuar con nuevos ciclos de humedecimiento y secado lo que se logra es retomar prácticamente los mismos valores, creando incrementos y decrementos de la relación de vacíos (Δe_n), en donde la trayectoria de esfuerzos se sobreescribe sobre la anterior, fenómeno que describe el concepto de fatiga de expansión.

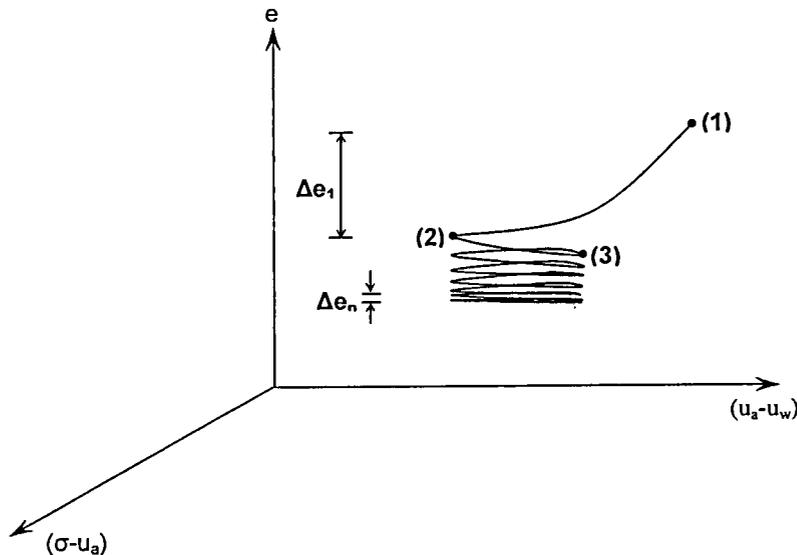


Figura 4.20 Trayectoria de esfuerzos correspondiente a diversos ciclos de secado e hidratación.

Ahora bien, retomando la sugerencia de Fredlund (1993); se puede asumir que Δe_1 corresponde a un valor alto dadas las condiciones de alteración de la muestra, y conforme el número de ciclos aumenta el suelo va retomando las condiciones que originalmente presenta in situ. Por tanto, el porcentaje de expansión obtenido en los últimos ciclos del ensaye (Δe_n) de fatiga podría

corresponder a la expansión que el suelo in situ presentaría si llegar a tener las condiciones de humedecimiento generadas en laboratorio, las cuales corresponderían a un largo periodo de inundación. Esto describe que el suelo in situ se encuentra parcialmente "fatigado" por la infinidad de ciclos de humedecimiento y secado a los cuales se ha sometido durante toda su historia geológica.

En relación al fenómeno de la histéresis, la Mecánica de Suelos no Saturados indica que la expansión o contracción provoca cambios diferenciales en la estructura del suelo, dependiendo de la historia de humedecimiento y secado en el suelo. Para el caso del ensaye de fatiga de expansión en suelos arcillosos, al someter el espécimen de suelo a ciclos de secado y humedecimiento, existen posibilidades de que para una cierta humedad (inicial en cada ciclo), correspondan diferentes valores de succión ocurriendo de esta forma la histéresis. Sin embargo; al fijar las variables del ensaye y controlar el desarrollo de las etapas de cada ciclo mediante el valor del contenido de agua, se desprecia el efecto que este fenómeno pueda afectar al resultado.

La predicción de las expansiones o asentamientos de un suelo, requiere el conocimiento de las condiciones de esfuerzo presentes in situ y de las que se tendrán en el futuro. La diferencia entre ambas dará como resultado el cambio de volumen que podrá ocurrir, de ahí la relevancia de conocer apropiadamente las condiciones del estado de esfuerzos prevaleciente en un momento dado in situ (Zepeda, 2004).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Originalmente el concepto de fatiga de expansión estudiado por Chen (1975) se refiere a material remoldeado y compactado. Dado lo anterior, la aplicación de sus resultados ha podido tener utilidad en terraplenes construidos con arcillas expansivas. Evidentemente, en campo el suelo inalterado ha estado sujeto a miles de ciclos de expansión y contracción en función de las condiciones estacionales. En la presente investigación se utilizó material en estado inalterado, el cual se sometió a ciclos de humedecimiento – secado bajo condiciones controladas, permitiendo la libre expansión vertical; este ensaye se realizó utilizando los anillos con extensiones de la prueba de consolidación.

Las gráficas obtenidas indican un comportamiento de fatiga de expansión por ciclos de humedecimiento – secado, similar al reportado por Chen (1975). En los ensayos realizados, el primer ciclo reporta un valor máximo de porcentaje de expansión mayor que el resto de los ciclos subsecuentes. Esto bien puede ser causado por un estado de alivio de esfuerzos internos, en tanto que el porcentaje de expansión disminuye conforme el número de ciclos se desarrolla.

Partiendo de lo mencionado en el párrafo anterior, y de acuerdo al mecanismo de humedecimiento – secado que se da en campo, se puede deducir que el suelo en estado natural si esta sujeto a un proceso de fatiga de expansión, sin embargo; esto se realiza mediante un seguimiento continuo de ciclos que parten desde el inicio de la historia geológica del suelo. Es decir, en campo el suelo superficial se humedece por la acción de las precipitaciones y el proceso de secado se realiza todos los días con el aumento de la temperatura ambiental al reflejarse esta sobre la superficie del suelo.

Lo anterior, que podemos llamarlo como "proceso de humedecimiento – secado natural" afecta un pequeño espesor del suelo, sin embargo; la superficie del suelo de hoy, no existía antes. El suelo arcilloso formado hace miles de años, pudo estar expuesto a condiciones ambientales. Con esto se puede deducir que la influencia de la fatiga de expansión en campo requiere un lapso de tiempo muy grande para poder medir un valor representativo de este fenómeno.

Dicho esto, el suelo en estado inalterado no puede llevarse a un estado de fatiga de expansión, puesto que ya se encuentra en él. El que los primeros ciclos de los ensayos de fatiga expresen valores mayores de expansión a los ciclos finales, refleja la alteración de la muestra por el alivio de esfuerzos causados durante el muestreo y labrado de los especímenes en laboratorio. El valor de expansión obtenido en los últimos ciclos corresponde al valor máximo que se podría obtener in situ, si se llegaran a tener las condiciones extremas de secado y humedecimiento generadas en laboratorio.

Al comparar los resultados de los ensayos de expansión del presente trabajo con los reportados por Chen (1975), hacen pensar que utilizó suelos con un contenido importante de limos, dado que el porcentaje de expansión que se maneja en la gráfica de fatiga de expansión oscila entre un máximo de 5.0 % y un mínimo de 2.0 %. En cambio, los valores de porcentaje de expansión obtenidos en la presente investigación oscilan en un rango de entre 25.0 y 8.0 %. Estas diferencias en los valores de la expansión se justifican por haber utilizado una arcilla "franca", característica de la ciudad de Querétaro, México.

En general, el ensayo de fatiga de expansión en suelos arcillosos da como resultado la disminución de la expansión del suelo, sin embargo; el valor de la expansión unidimensional tras 10 ciclos de humedecimiento – secado es aún lo suficientemente alto (entre 8.0 y 12.0 %), pensando en los daños que pudiera ocasionar sobre estructuras ligeras. Dicho de otra forma, el suelo "fatigado" aún es expansivo. Dado lo anterior, se afirma que la fatiga de expansión en suelos

arcillosos existe en condiciones naturales, sin embargo; la medición de la fatiga de expansión en campo requiere un método específico que permita controlar las deformaciones de una masa de suelo conocida en condiciones naturales. Para lograr esto se tendrán que desarrollar aditamentos capaces de captar pequeñas deformaciones en campo, conforme los cambios estacionales ocurran.

En lo que respecta al método propuesto para el ensaye de fatiga de expansión, se considera de fácil comprensión dado que obedece al sentido común con apego a la normatividad que se dispone actualmente. Los resultados de los ensayes son comparables entre si, lo que hace pensar que si se realizan ensayes de fatiga de expansión con este procedimiento en otro tipo de suelo, los resultados serán racionales y comparables entre si.

Al momento de intentar llevar el criterio de fatiga de expansión en una escala real, se puede deducir que cada ciclo corresponde a la acción estacional en el periodo de un año. Sin embargo; al humedecer el espécimen de suelo mediante un proceso de saturación por capilaridad en un periodo de 48 horas, se presentan condiciones de campo en las cuales el suelo tendría que alcanzar su máximo grado de saturación. Hasta hoy, en laboratorio no ha sido posible saturar totalmente las muestras de suelo, situación que en campo se repite dada la naturaleza de cada suelo y en específico en las arcillas debido a su poca permeabilidad.

Los resultados del presente trabajo expresan que el fenómeno de fatiga de expansión en suelos arcillosos existe, tal como lo expresó anteriormente Chen (1975) y Pérez (1999). Se destaca la metodología utilizada durante el proceso mediante la descripción de la propuesta de un método para la ejecución de este criterio; que hasta hoy solo se describía de una forma muy general. Dentro del procedimiento propuesto se realizó un énfasis en el proceso de secado, mediante la idealización de recrear las condiciones naturales de campo, intentando así aumentar la representatividad del ensaye.

Si el ensaye de fatiga de expansión se realiza con aplicación de una carga conocida (como puede ser la de sitio o la de la estructura que se pretenda construir), el porcentaje de expansión disminuirá en relación a los resultados obtenidos en el desarrollo experimental de este trabajo. Esto se debe al cambio del estado de esfuerzos al cual se estaría sometiendo el suelo, semejante a lo que ocurre en campo entre la interacción del suelo y la estructura.

Al someter al espécimen de suelo a una condición extraordinaria de secado y humedecimiento, se obtiene el máximo porcentaje de expansión que puede alcanzar el suelo in situ. Este parámetro representa un valor del potencial de expansión que puede dar una idea del criterio que será necesario utilizar para el cálculo de una cimentación que se pretenda proyectar sobre un suelo expansivo.

5.2 Recomendaciones

A pesar de controlar la temperatura de secado a un régimen establecido de 30 °C, no fue posible evitar la contracción de la pastilla de suelo. Tras analizar desde otra perspectiva la solución a este problema, se propone utilizar anillos de diámetros que decrezcan conforme el número de ciclos aumente.

Lo anterior pretende que tras realizar el secado del primer ciclo, se labre una pastilla de menor diámetro que la inicial con ayuda de un anillo metálico de menor diámetro. De esta forma se elimina la posibilidad de pérdida de expansión vertical por reacomodo horizontal del espécimen. Esta operación sería necesaria para cada ciclo que se pretenda realizar. Un inconveniente de lo anterior, es que se requiere un anillo de diferente medida para cada ciclo individual, lo que encarece la prueba. Además, conforme el número de ciclos aumenta, el espécimen presenta agrietamientos que ponen en riesgo la rigidez de la pastilla de suelo al momento de labrar un espécimen de menor diámetro.

Sin embargo; de los resultados de esta investigación, la pérdida de confinamiento en el espécimen de suelo no afecta el comportamiento y continuidad del ensaye. En campo, el suelo expansivo pierde confinamiento una vez que se generan los agrietamientos en la época de estiaje, mismo que se recupera en la temporada de lluvias por medio de la expansión del suelo y recupera así su propio confinamiento. Dicho fenómeno se cumple en los ciclos de humedecimiento y secado del ensaye de fatiga de expansión.

Resulta interesante también, aplicar el ensaye de fatiga de expansión a una muestra de suelo obtenida de una zona cubierta. En teoría un suelo que se encuentre cubierto en un largo periodo de tiempo, ha estado exento de cambios importantes de humedad. Dadas las condiciones anteriores se podría evaluar el porcentaje de expansión de un suelo que se ha presentado estable, a diferencia del suelo en zonas descubiertas utilizado en este trabajo.

La continuidad de esta investigación, consistiría en realizar el ensaye de fatiga de expansión controlando el grado de saturación alcanzado por la pastilla de suelo, de forma tal que se detenga la etapa de saturación una vez que se ha logrado la saturación que se tiene en campo durante la temporada de lluvias. El resultado de utilizar este criterio, podría aumentar la representatividad del ensaye de fatiga de expansión descrito en la presente investigación

REFERENCIAS

- Barbeta Isola, Gabriel (2002). "Mejora de la tierra estabilizada en el desarrollo de una arquitectura sostenible hacia el siglo XXI". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. España.
- Chen Fu, Hua (1975). "Foundation on expansive soil". Elsevier Scientific Company, New York.
- Fredlund, D. G. y Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils" John Wiley & Sons, Inc.
- INEGI (2000). Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. XII Censo General de Población y Vivienda. México
- Juárez Badillo Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso (2002). "Mecánica de Suelos" Tomo 1. Ed. Limusa, México 2002.
- López-Lara, Teresa (2002). "Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos expansivos". Doctorado en ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. México.
- López-Lara, Teresa (1995). "Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica, Querétaro". Posgrado en Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México
- Luna Rodríguez, Julio (1988). "Losas apoyadas en suelos expansivos". Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Qro.
- Meehan, R. y Karp, L. (1994). "California housing damage related to expansive soils". Journal of performance of constructed facilities. No. 2.
- Norma Mexicana NMX-C-431-ONNCCE-2002. Industria de la construcción, Geotécnica, cimentaciones, Toma de muestras alterada e inalterada, métodos de prueba.
- Pérez Rea M. L. y Castañón A. (1999). "Evaluación en el laboratorio de la fatiga de expansión de un suelo de Querétaro". XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz do Iguazú, Brazil.
- Pérez Rea M. L. (1993). "Succión y comportamiento esfuerzo –deformación en suelos expansivos de Jurica y Tejada, Qro." Querétaro, México.

- Pousada Presa, Erundino (1984). "Deformabilidad de las arcillas bajo succión controlada". Tesis Doctoral. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.
- Sánchez Naveda Freddy Edilio (1979). "Estudio de un suelo expansivo de Coro, Venezuela". Tesis de Maestría. UNAM.
- SOP (1981). Secretaria de Obras Públicas, Instructivo para efectuar pruebas en suelos. Apoyo didáctico, Volumen 1. México.
- Trejo Moedano Ángel (1995). "Patología de las cimentaciones sobre suelos expansivos". X Congreso panamericano de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones. México.
- Trejo Moedano Ángel (1989). "Los suelos expansivos y su problemática". Academia mexicana de ingeniería a alternativas tecnológicas 29 mesas redondas sobre los suelos expansivos y su problemática. México.
- Vallejos Horacio R. (2000). "Suelos expansivos y su relación con las obras viales". XIII Congreso de Vialidad y Tránsito. Argentina.
- Villafañe German y Coronado Carlos (2000). "Cimentaciones en suelos expansivos: práctica local". VIII Congreso Colombiano de Geotécnica. Colombia.,
- Zepeda G., J. A. (2004). "Mecánica de Suelos no Saturados". Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A. C. Universidad Autónoma de Querétaro. México.
- Zepeda G., J. A. y Flores F., M. (2002). "Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas". II Congreso Panamericano de Enseñanza de la Mecánica de Suelos. Guayaquil, Ecuador.
- Zepeda G., J. A. y Castañeda, A. H. (1989). "Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana". ". Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos. J. Alfredo Zepeda Garrido. México.
- Zepeda G., J. A. (1989). "Propiedades mecánicas e hidráulicas en suelos no saturados, succión". ". Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos. J. Alfredo Zepeda Garrido. México-
- Zepeda G., J. A. y Castañeda, A. H. (1986). "Cimentaciones con pilotes y pilas". Cimentaciones sobre arcillas expansivas. México.