



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias

RELACIÓN DEL CAMBIO VOLUMÉTRICO DE ARCILLAS EXPANSIVAS CON SU GRADO DE SATURACIÓN

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Elizabeth Cabrera Hernández

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

SINODALES

Dra. Teresa López Lara  
Presidente

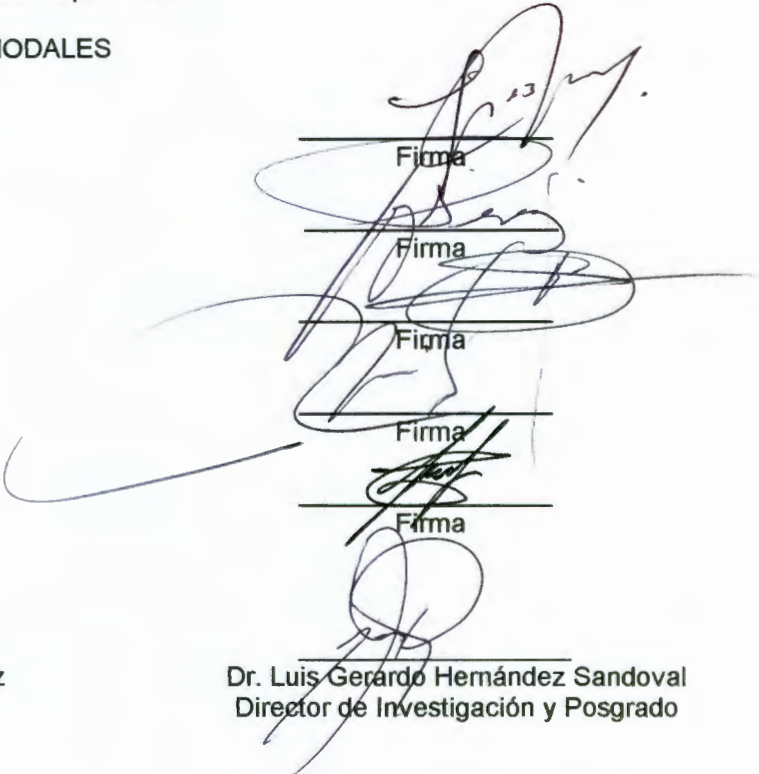
Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Secretario

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Vocal

M. en I. José Alfredo Zepeda Garrido  
Suplente

M. en I. Jesús Cortes Ochoa  
Suplente

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

  
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Febrero 2006  
México

No. Adq. H70766

No. Título \_\_\_\_\_

Clas TS

624.15136

C117r

## RESUMEN

Los suelos expansivos representan un problema para muchos países, por ejemplo: México, Colombia, Canadá, Estados Unidos, Argentina, Brasil, etc. los daños ocasionados se deben generalmente al agrietamiento generado en las construcciones por sus continuos cambios de humedad. Se estima que el 50% de la tierra de Norteamérica contiene suelo expansivo (Chen, 1975). En México, se presentan formaciones de este tipo, en los estados: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Sonora, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas y Campeche (Zepeda et al., 1992). Los suelos expansivos requieren frecuentemente de la determinación de varios parámetros tales como porcentaje de expansión, succión, grado de saturación entre otros. Estos ensayos se evalúan generalmente en aproximadamente una semana, lo que puede significar en muchos casos un retraso en la aplicación de algunas soluciones posibles. Por consiguiente, este trabajo estudia el comportamiento de los parámetros anteriores para tratar de establecer medidas indirectas partiendo de ensayos sencillos e inmediatos tales como la humedad.

**Palabras clave:** Suelos expansivos, porcentaje de expansión, humedad, grado de saturación, succión, correlaciones de humedad.

## Summary

Expansive soils represent a problem for many countries, for example: México, Colombia, Canada, United States of America, Argentina, Brazil, etc, the damages are generally brought about by the desiccation cracks generated by perpetual moisture changes. It is estimated that 50% of North American soil contains expansive material (Chen, 1975). In Mexico, these kinds of formations are found in the states of: Queretaro, Guanajuato, Michoacan, Tamaulipas, Morelos, Sonora, North Baja California, Veracruz, Chiapas, and Campeche (Zepeda et al., 1992). Expansive soils frequently require the determination of various parameters, such as, expansion percentage, suction, and degree of saturation, among others. The tests to determine these properties require approximately a week time, which in many cases can result in delays in the determination and application of potential mitigation measures. As such, this investigation studies the behavior of the alone mentioned parameters and attempts to establish indirect measurements correlated with results of simpler tests of faster results, such as moisture.

**Keywords:** Expansive soils, expansion percentage, moisture, degree of saturation, suction, moisture correlations.



*Si te conoces bien, si eres sincera contigo misma  
y sincera con los demás...*

*Si obedeces a tu corazón y eres leal a tus verdades,  
estarás lista para compartir tu vida,  
estás lista para fijar tus metas, estas lista para guiar la felicidad.*

*Y mientras más ames, y mientras más sientas,  
más recibirás amor, y más recibirás de la vida.  
mientras más libre seas con tus emociones y sentimientos,  
mas capaz serás de dar y de recibir amor.*

*Susana Polos*

*A Dios...*

*A mi madre Adelina Hernández...*

*A mis hermanos Gustavo e Iván...*

*A mi sobrina Astrid...*

*Y a todas aquellas personas que creyeron en mí...*

## Agradecimientos

A Dios nuestro señor le agradezco por todo lo que ha puesto en mi camino, por haberme dado la fortaleza, sabiduría, salud, fe, esperanza y paciencia para poder levantarme de todos los obstáculos. Por guiarme en el camino correcto.

A mi madre Adelina Hernández por haberme dado la vida, por todos sus sacrificios y apoyo en mis decisiones sin juzgarlas, por todo su amor y fortaleza que me ha demostrado en todos estos años. Te amo mama, gracias!!!!

A mi hermano Gustavo por darme todo su cariño y confianza, por enseñarme el camino de Dios, a ser noble, humilde y traer a este mundo a la pequeña Astrid. A mi hermano Iván por todas las veces que ha estado conmigo.

A mi sobrina hermosa Astrid porque desde que te conocí estás en mi corazón y mente.

A Carlos Marín López por toda su confianza depositada, el amor que hay en las buenas y en las malas, por darme valor para enfrentar los problemas, por ser noble y caballeroso conmigo, por darme todo el tiempo, paciencia y apoyo para realización de este trabajo. Te amo.

A Dra. Teresa López Lara por todos sus consejos, paciencia y tiempo para la realización de este trabajo, por su amistad, consejos y apoyo en los momentos que más lo necesité.

A mis tíos Alfredo, Eduardo, Paz y Alejandra por darme su apoyo en mi decisión de estudiar una maestría, por creer en mi, por recibirme siempre con mucho cariño

A Josué y Tere por darme su confianza, amor, apoyo en mis decisiones y estar siempre al pendiente de mí.

A Carlos Marín Medina y Ana María López, por toda la confianza, el amor y la oportunidad de convivir con su familia.

A Gregorio Y Sergio Aurelio por brindarme su amistad, apoyo y confianza cuando llegué a Querétaro a la Maestría sin conocer a nadie; por ayudarme en los momentos más difíciles.

A Marco A. Cueto por su gran amistad, por todos los logros y caídas que tuvimos. A Emmanuel por compartir 2 años de créditos de maestría.

A Jesús Torres García, por su entrañable amistad y estar siempre al pendiente de mi trabajo y de mi persona. A Minor por enseñarme otra perspectiva de la vida que no conocía y la preocupación de este trabajo que siempre me demostró.

A Manuel, Julio, Juan Carlos, Rene, Rubén, Pedro, Tania, Sergio y Octavio por todo su apoyo moral y compañerismo para salir adelante.

A Vivi Figueroa por brindarme su confianza, amor, recordarme el valor de la amistad y paciencia para con ella. A Patricia Figueroa por todo su cariño, confianza, atenciones para conmigo y estar en momentos importantes de mi vida.

A Moya por su apoyo para la realización de pruebas de laboratorio en esta investigación. A Eleazar por brindar su amistad.



# INDICE GENERAL

Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice General	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xii
Simbología	xiii

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Hipótesis de trabajo	4

## CAPITULO II

### ESTADO DEL ARTE

2.1. Suelos expansivos	5
2.1.1. Composición de las arcillas	6
2.1.2. Identificación de los suelos expansivos	9
2.1.2.1. Aspecto natural del suelo	10
2.1.3. Algunas causas de expansión de suelos	11
2.1.3.1. La habilidad de absorber agua	11
2.1.3.2. Otros factores	13
2.1.3.2.1. Factores climáticos	14
2.1.3.2.2. Profundidad de la capa activa	16
2.1.3.2.3. Actividades humanas	19
2.1.4. Propiedades ingeniérriles de las arcillas expansivas	21
2.1.5. Clasificación de los suelos expansivos	23
2.1.6. Problemática de los suelos expansivos.	28
2.2. Criterios para evaluar la expansividad	32
2.2.1. Prueba de los límites de Atterberg	32
2.2.2. Prueba de volumen constante	33
2.2.3. Prueba de expansión libre no restringida	34
2.2.4. Prueba de índice de expansión libre modificado	36
2.2.5. Porcentaje de expansión	38
2.2.6. Presión de expansión	38
2.2.6.1 Norma ASTM D4546-03	40
2.3. Determinación de la expansión volumétrica por hidratación en un suelo expansivo.	42
2.4. Fenómeno de la succión	43
2.4.1. Succión o energía potencial del suelo	43
2.4.2. Estado del agua en el suelo	44
2.4.3. Técnicas para medir la succión en el laboratorio	45

2.4.3.1. Papel filtro	45
2.4.3.1.1. Norma ASTM D5298-03	46
2.4.3.2. Método de la placa de succión	46
2.4.3.4. Método de la membrana de presión	48
2.4.3.5. Desecador del vacío	48
2.4.4. Técnicas para medir la succión en campo	49
2.4.4.1. Tensiómetros	49
2.4.4.2. Sicrometro de termopar	49

## **C A P I T U L O III**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

3.1. Extracción de la muestra y caracterización del suelo	51
3.2 Grado de saturación y expansión libre	51
3.2.1 Obtención de pesos del consolidómetro	51
3.2.2 Labrado de la muestra inalterada en el anillo de consolidación.	55
3.2.3 Montaje de todo el equipo del consolidómetro antes de empezar la prueba	56
3.2.4. Inicio de la prueba de expansión	57
3.2.5 Obtención de pesos para determinar humedades durante la prueba de expansión.	57
3.3 Succión	60
3.3.1 Equipo necesario	60
3.3.2 Procedimiento de prueba	66
3.4 Determinación de humedades a diferentes profundidad	73
3.5 Determinación de estudio estadístico básico del procedimiento propuesto del grado de saturación y expansión libre	73

## **C A P I T U L O IV**

### **RESULTADOS**

4.1 Propiedades del suelo utilizado	75
4.2 Comportamiento humedad vs porcentaje de expansión	75
4.3 Comportamiento humedad vs grado de saturación	77
4.3 Succión.	78
4.4 Perfil de humedades de Jurica, Querétaro	79
4.6 Estudio básico estadístico del procedimiento Grado de saturación vs Porcentaje de Expansión.	81
4.7 Nomograma	82
4.7.1 Ejemplos	84

## **C A P I T U L O V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones	87
5.2 Recomendaciones	88

## **REFERENCIAS**

89

## **ANEXOS**

93

Localización de muestreo Jurica Querétaro México

94

Tabla A

95

Tabla de equivalencias

97

Conceptos de estadística aritmética

98



## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PÁGINA</b>
2.1(a)	Muestra de un suelo expansivo con potencial moderado de expansión	7
2.1(b)	La misma muestra del suelo después de un pequeño incremento en la cantidad de agua.	8
2.1(c)	La muestra 48 horas después. Se ha contraído a un volumen más pequeño.	8
2.2	Agrietamiento en paredes	9
2.3	Suelo Expansivo que demuestra las grietas	10
2.4	Partículas de arcilla cargadas y atracción bipolar de moléculas de agua.	11
2.5	Comparación de una arena y un suelo expansivo	12
2.6	Límites de Atterberg para suelos de granos finos, su expansión y su comportamiento mecánico.	13
2.7	Distribución de tensiones durante el desecado de un suelo	15
2.8	Zonas extremadamente áridas, áridas y semiáridas del mundo.	15
2.9	Zona activa en tierras que experimentan cambios estacionales en el contenido de agua	17
2.10	Factores que aumentan la profundidad de la zona activa: grietas por contracción y capa permeable	17
2.11	Zona activa de los suelos expansivos	19
2.12	Relación conceptual entre el Índice de poros y la presión aplicada para muestras secas inundadas.	20
2.13	Criterio de Seed, Woodward y Lundgren para calificar el potencial de hinchamiento de una arcilla	23
2.14	Criterio de expansividad	24
2.15	Relaciones entre el índice de desecación, el límite plástico y la presión de expansión.	24
2.16	Desarrollo de vertisoles expansivos.	28
2.17	Perfiles de humedad	29
2.18	(a) Capa activa y (b) clima monzónico	30
2.19	Movimientos estacionales del terreno descubierto y de un edificio, a partir de su construcción	31
2.20	Representación de una trayectoria de esfuerzos ideal para un ensaye edométrico a volumen constante	34
2.21	Relación entre porcentaje de expansión libre, límite líquido y contenido de agua natural	35
2.22	Expansión libre vertical unidimensional de algunos suelos del sur de California	37
2.23	Método A, presión de expansión ASTM D4546-03	40



2.24	Método B, presión de expansión ASTM D4546-03	41
2.25	Método C, presión de expansión ASTM D4546-03	42
2.26	Método de la placa de succión para determinar el Pf.	47
2.27	Procedimiento de la centrifugación para la medida del Pf.	47
2.28	Aparato de la membrana de la presión	48
2.29	Ilustración esquemática de las partes esenciales del tensiómetro (posterior a Richards, 1965)	49
2.30	Circuito eléctrico que ilustra el efecto Seebeck	50
2.31	Circuito eléctrico que ilustra el efecto Peltier	50
3.1.a	Peso de cazuela con piedra porosa integrada	52
3.1.b	Peso de cazuela saturada.	52
3.2	Medición del diámetro interno de la cazuela.	52
3.3	Medición de la altura de la cazuela	52
3.4	Peso de la piedra porosa saturada	53
3.5	Peso de la piedra porosa seca	53
3.6	Peso del cabezal.	53
3.7	Peso de los papeles filtro saturado.	54
3.8	Peso de los papeles filtro seco	54
3.9	Peso del anillo.	54
3.10	Peso del agarrador	54
3.11	Cazuela con todos sus accesorios sin muestra de suelo.	55
3.12	Momento en el que se empieza a labrar la muestra	55
3.13	Pastilla labrada	55
3.14	Pastilla labrada y enrasada perfectamente.	56
3.15	Cazuela con piedra porosa y papel filtro	56
3.16	Cazuela con piedra porosa interior, papel filtro interior, anillo con muestra de suelo, agarrador y papel filtro exterior.	56
3.17	Cazuela ya con todo su equipo armado y sus dos piedras porosas.	56
3.18	Inicio de la prueba de expansión.	57
3.19	Desmonte de la cazuela.	58
3.20	Retiro del agua que tiene la cazuela.	58
3.21	Peso de la cazuela durante la prueba.	59
3.22	Lectura a la que estaba antes de quitar la cazuela del Consolidómetro.	59
3.23	Saturación de nuevo a la muestra para seguir el ensaye.	60
3.24	Papel filtro White Ribbon.	61
3.25	Diámetro de 5.5 cm (2 in) para ensaye de succión.	61
3.26	Contenedor de cristal con capacidad de 274 ml.	61
3.27	Contenedor de cristal con capacidad de 179 ml.	61

3.28	Papel de cera, marca PARAFILM.	62
3.29	Contenedores de metal.	63
3.30	Caja de aislamiento.	63
3.31	Balanza sensitiva de aproximación de 0.0001 gr.	64
3.32	Horno de secado termostatico	64
3.33	Equipo diverso: Guantes de cirujano, O-rings, pinzas, tijeras y papel de cera o parafina.	65
3.34	Secado del papel filtro en el horno termostático.	66
3.35	Espécimen del suelo en el contenedor de cristal	66
3.36	Colocación de agua para determinar succión a diferentes humedades.	67
3.37	Colocación de O-rings	67
3.38	Colocación del primer papel filtro.	67
3.39	Colocación del segundo papel filtro.	68
3.40	Sellado del contenedor con papel de cera.	68
3.41	Colocación de la tapa de metal al contenedor del espécimen.	68
3.42	Colocación del contendor en una hielera.	69
3.43	Caja termostática (hielera).	70
3.44	Pesos del contenedor del papel filtro en frío "T <sub>c</sub> "	70
3.45	Retirar papel de cera del espécimen después de los 7 días, tiempo que alcanza el equilibrio.	71
3.46	Colocación del papel filtro en el contenedor.	71
3.47	Sello del contenedor metálico.	71
3.48	Determinación de la masa del contenedor frío mas papel filtro "M <sub>1</sub> ".	72
3.49	Colocación del los contenedores con el papel filtro a el horno.	72
3.50	Sello de los contenedores para equilibrar temperatura.	72
3.51	Determinación de la masa del contenedor mas papel filtro caliente "M <sub>2</sub> ".	73
3.52	Determinación de la masa del contenedor de papel filtro en caliente "T <sub>h</sub> ".	73
4.1	Comportamiento Grado de saturación vs Porcentaje de expansión	76
4.2	Correlación de Humedad contra Grado de saturación.	77
4.3	Curva característica obtenida humedeciendo gradualmente	77
4.4	Perfil de humedades en Jurica (Junio 2003)	78
4.5	Perfil de humedades en Jurica (Agosto 2004)	79
4.6	Perfil de humedades registrado en Abril 1990 y Junio 1990	79
4.7	Perfil de humedades registrado en Septiembre 1994 y Mayo 1995	80
4.8	Nomograma	82
4.9	Ejemplos de utilización del nomograma	83

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLA</b>		<b>PÁGINA</b>
2.1	Tipo de arcilla y sus características	7
2.2	Criterios de expansividad	25
2.3	Clasificación de suelos expansivos	26
2.4	Clasificación propuesta de los terrenos expansivos por Jiménez Salas y Serrano	26
2.5	Límites entre los diferentes estados y símbolos empleados	32
2.6	Potencial expansivo del suelo	33
2.7	Potencial de expansión	37
4.1	Correlación Humedad contra Porcentaje de Expansión	75
4.2	Tabla de humedades tomadas hasta 2.6 m de profundidad	78
4.3	Cálculos de media y desviación estándar	81



## SIMBOLOGÍA

A°	Amstrongs, $10^{-8}$ cm <sup>2</sup>
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
IP	Índice plástico
W	Humedad
NF	Nivel freático
Z	Profundidad del suelo en (m)
I <sub>LL</sub>	Índice que relaciona la humedad natural con la humedad del límite líquido
W <sub>L</sub>	Humedad de límite líquido
I <sub>LP</sub>	Índice que relaciona la humedad natural con la humedad del límite plástico
D	Infiltración del agua en el suelo, cm <sup>2</sup> /día
t	Tiempo
PE	Potencial de expansión
kPa	Kilo pascales
P	Presión de expansión
$\sigma$	Esfuerzo vertical
e <sub>0</sub>	Relación de vacíos
Pf	Unidad en la que se mide la succión
Gw	Grado de saturación
EU	Expansión Unidimensional ó porcentaje de expansión
h	Altura
$\mu$ V	Microvoltaje
T	Temperatura
V <sub>v</sub>	Volumen de vacíos
W <sub>s</sub>	Peso de sólidos
W <sub>a</sub>	Peso del aire
W <sub>w</sub>	Peso del agua
V <sub>m</sub>	Volumen de la muestra
V <sub>a</sub>	Volumen de aire
V <sub>s</sub>	Volumen de sólidos
W <sub>m</sub>	Peso de la muestra
$\gamma_d$	Peso específico seco
in	Pulgadas
ml	Mililitros
oz	Onzas
°C	Grados centígrados
ft	Pies (unidad inglesa)



gr	Gramos
mm	Milímetros
Tc	Tara fría
Rh	Humedad relativa
M1	Masa del contenedor frío con papel filtro
M2	Masa seca total
Th	Tara caliente
$\Sigma$	Sumatoria
SSA	Superficie específica de área
$\Delta S_F$	Expansión superficial libre, %

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

Los suelos expansivos representan un problema para muchos países, por ejemplo: México, Colombia, Canadá, Estados Unidos, Argentina, Brasil, etc. Se estima que el 50% de la tierra de Norteamérica contiene suelo expansivo (Chen, 1975).

En México, se presentan formaciones de este tipo, en los estados: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Sonora, Baja California Norte, Veracruz, Chiapas y Campeche (Zepeda et al., 1992).

Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones que provocan los aumentos de carga sobre el suelo que soporta, fueron identificados, como las causas de los daños en las estructuras; el U.S. Bureau of Reclamation fue el primero en reconocer, en 1938, el problema de los suelos, cuando intervino en el proyecto Owyhee en Oregón en la cimentación por un sifón de acero.

La primera reunión internacional que trató el tema de los suelos expansivos tuvo lugar en la Universidad de Texas A. M., EE. UU., en 1965. Sin embargo, cada investigador tiene diferentes concepciones acerca del fenómeno de los suelos expansivos. Fredlund, Hasan y Fison cuentan con dieciocho métodos diferentes presentados entre 1957 y 1980, para predecir el cambio volumétrico en el suelo.

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, en particular la ciudad de Querétaro, como fueron: "Seminario de Cimentaciones sobre Suelos Expansivos" en 1987 y el "Curso Internacional de Mecánica de Suelos Arcillosos".

El agua en los suelos saturados se mueve en respuesta a gradientes de carga hidráulica positiva; pero en el caso de los suelos no saturados el agua esta sujeta a presiones menores que la atmosférica o la succión el generador de flujo. Los suelos parcialmente saturados cambian su volumen al variar su humedad (Zepeda, 1989).

Los suelos arcillosos están sujetos continuamente a expansiones y contracciones, debido a la presencia y/o ausencia del agua, ocasionando fallas en las estructuras ligeras y algunas veces debido a un inadecuado diseño en la cimentación; presentándose grietas en los muros, daños en elementos estructurales y levantamiento de pisos.

Investigaciones sobre este tipo de suelos, plantean varias alternativas de solución: estabilización con diferentes materiales (siendo la cal, la mas utilizada), con la finalidad de inhibir las propiedades de expansión-contracción del suelo; impermeabilización con recubrimientos plásticos y asfálticos entre la cimentación y el suelo, etc.

Los suelos expansivos registran diferentes valores de expansión y presión de expansión dependiendo de su naturaleza, en Mecánica de Suelos, se han propuesto varios métodos para su determinación, por ejemplo, (F. Chen (1975)) sugiere un procedimiento que consiste en colocar una muestra de suelo inalterada en un consolidómetro bajo una sobre carga de 7 lib/plg<sup>2</sup> por 24 horas, saturando la muestra, se mide el cambio de volumen. Después de que el suelo se ha expandido a su máximo, el espécimen se carga hasta regresar a su volumen inicial y la presión requerida para lograrlo es la presión de expansión.

El procedimiento indicado para la determinación de la presión de expansión, pareciera efectivo; sin embargo, existe la incertidumbre de que en caso contrario -aplicar la presión de expansión obtenida al suelo parcialmente saturado- el suelo requiera realmente la presión evaluadas sin mostrar expansión alguna, cuando sea saturado (Zepeda, 1989).

Así, la presencia de una arcilla expansiva afecta el valor (obtenido con el procedimiento de Chen) de la presión de expansión: para un suelo parcialmente saturado sería efectiva; pero en un suelo saturado el valor sería incierto.



Se sabe que la expansión de un suelo desarrolla simultáneamente una presión que actúa sobre todo aquello que pudiera tener encima (cimentación, terraplenes, pavimentos, etc.). Esta propiedad puede medirse utilizando algunos procedimientos ya conocidos, entre los que se encuentran: el método convencional del consolidómetro (usado frecuentemente en laboratorios) y el método de Chen.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En este trabajo se trata de conocer el comportamiento del Grado de Saturación conforme va aumentando la humedad del suelo en estudio (arcillas expansivas).

Debido a que para determinar las características principales de un suelo expansivo, como su humedad en campo, porcentaje de expansión, succión por mencionar algunas, llevan aproximadamente una semana, este trabajo estudia el comportamiento del grado de saturación, porcentaje de expansión y succión con la humedad para luego determinar las características del suelo anteriormente mencionadas con tan solo tomar una muestra de suelo y determinar el contenido de agua.

## **1.3 OBJETIVOS**

- 1) Estudiar el comportamiento del grado de saturación, expansión y succión, con diferentes humedades.
- 2) Realizar en la medida de lo posible una correlación entre la humedad con porcentaje de expansión, grado de saturación y succión del suelo determinados en laboratorio. Esta correlación se pretende que funcione como medida indirecta a partir de la determinación del contenido de agua.
- 3) Estudiar y relacionar los porcentajes de grado de saturación desarrollados en algunos perfiles de humedad durante el año para inferir los valores del porcentaje de expansión máximo presentado.



## 1.4 HIPÓTESIS DE TRABAJO

1. La expansión que se desarrolla en campo durante un año, no excede del 60% del valor total registrado en el laboratorio.
2. El comportamiento Humedad vs Grado de saturación es lineal.

# CAPÍTULO II

## ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Suelos expansivos

Se entiende por suelo expansivo aquel que es susceptible a 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 y Castañeda, 1978).

Las regiones áridas y semiáridas en el mundo constituyen un tercio de la superficie de la tierra. En estas regiones los suelos no están saturados pueden llegar a tener capas de mas de 30 metros bajo el nivel de la superficie del terreno, en condiciones de no saturación (Fredlund and Rahardjo, 1993). El nivel de aguas freáticas puede encontrarse aun a mayor profundidad. En la ciudad de Querétaro en México, se encuentran depósitos arcillosos que pueden tener más de 20 metros de espesor, sin que aparezca el nivel de aguas freáticas. La capa más superficial se encuentra expuesta a los cambios de humedad estacionales, sobre todo los primeros dos o tres metros (Zepeda, 1992).

Los problemas de movimiento ascensional (levantamiento) de estructuras se producen cuando el suelo se expande, al disminuir a presión de tierras que lo confinan superiormente, cuando aumenta la humedad del suelo y con la presencia de fallas.

El suelo arcilloso debajo de una casa se expande y se contrae con las estaciones del año. El movimiento no es un problema mientras es uniforme o no lo es bastante grande para dañar la cimentación y/o casa. Los daños a la casa pueden aparecer regularmente conforme cambian las estaciones. Los defectos significativos ocurren cuando el movimiento es desigual o localizado.

Cuanto más ligera sea una estructura mas levantara el terreno expansivo. Así, los problemas de hinchamiento suelen estar asociados con estructuras ligeras como pequeños edificios (especialmente viviendas), vertedores de presas y pavimentos de carreteras.

Un suelo presenta expansividad, cuando en determinadas y constantes condiciones de tensiones efectivas sufre aumentos de volumen como consecuencia de un aumento de su contenido de humedad (J. Pérez Romero, 2000).

### **2.1.1. Composición de las arcillas**

Los suelos expansivos son principalmente arcillas. Recordando que las arcillas son fundamentalmente muy diferentes de arenas, gravas y sedimentos, que se comprenden principalmente de partículas formadas de grano voluminosas, inertes y toscas. Las propiedades mecánicas de arenas, gravas y sedimentos dependen de propiedades tales como el tamaño, la forma, textura, y graduación de las partículas.

El suelo arcilloso, por otro lado, se compone de partículas sumamente pequeñas en forma de placas, teniendo áreas de superficie específicas grandes  $m^2/g$ .

Como el área específica de la superficie SSA (Specific Surface Área) de las partículas de arcilla aumenta, la importancia de las propiedades de la superficie cambiada de las partículas de la arcilla se incrementa prominentemente. Existen numerosos tipos de arcilla, los cuales se muestran en la tabla 2.1.



**Tabla 2.1. Tipos de arcillas y sus características**

Tipo	Área específica de superficie (SSA) (m <sup>2</sup> /g)	Espesor (Å)
Caolinita	15	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>
Ilita	80	50 - 500
Montmorillonita	800	10 - 50

Los suelos expansivos se componen de minerales de arcilla y están sujetos a cambios de volumen en condiciones donde la humedad cambia, figura 2.1 (a), fig. 2.1 (b) y fig. 2.1 (c). Por lo general las estructuras de las arcillas son inestables, puesto que se hallan sometidas a cambios y alteraciones, de manera especial en las partes del depósito que próximas a las superficies aflorantes.

Conforme a las partículas se aproximan entre si aumentan automáticamente las fuerzas de Van der Waals y aumenta la verdadera cohesión, con lo que puede cerrarse las fisuras. Si se sumerge en agua una arcilla dura, no hay tensión superficial en la superficie de la arcilla, y por consiguiente, tampoco se ejerce compresión capilar.

La consecuencia es una expansión de arcilla. La arcilla es, al menos parcialmente, un material elástico y hay, por consiguiente, rebote elástico cuando deja de ejercerse la acción de fuerza de compresión (Krynine, 1961).

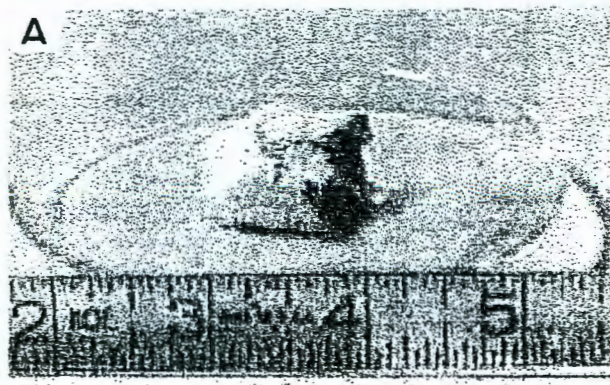


Figura 2.1 (a) Muestra de un suelo expansivo con potencial moderado de expansión



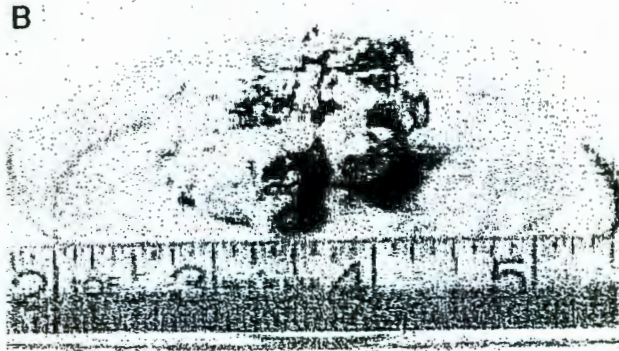


Figura 2.1 (b) La misma muestra del suelo después de un pequeño incremento en la cantidad de agua

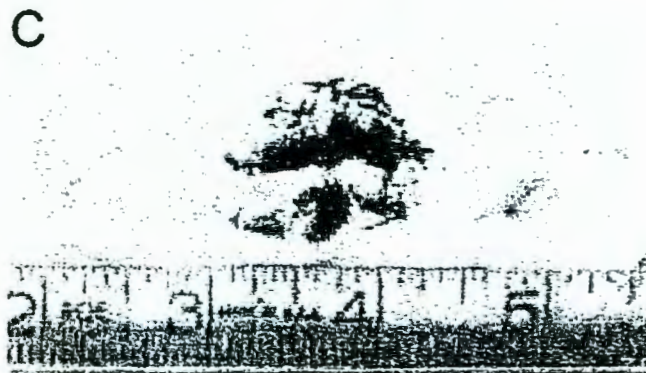


Figura 2.1 (c). La muestra 48 horas después. Se ha contraído a un volumen más pequeño

Los cambios en el contenido de agua de los suelos arcillosos causan problemas de agrietamiento a una casa. Los cambios uniformes de humedad del suelo son menos perjudiciales que cambios localizados. Estas grietas son evidentes en:

- La cubierta y los techos exteriores o interiores de pared
- La losa de la cochera o del sótano, calzada y patio.
- Inclinación, dislocación o rotación de paredes exteriores.
- Separación del ajuste de madera en las esquinas

- Inclínación de cercas y de muros de contención
- Puertas y ventanas
- Separación desigual de paredes de piso.

Cuando el agua se agrega a estas arcillas expansivas, las moléculas de agua que se van a los huecos entre las placas de la arcilla. Mientras que se absorbe mas agua, las placas se alejan más, conduciendo a un aumento en la presión del suelo o una extensión del volumen del suelo. A continuación se muestran algunos de los daños causados por suelos expansivos, Fig. 2.2



Fig. 2.2 Agrietamiento en paredes

### 2.1.2. Identificación de los suelos expansivos

Las grandes compañías constructoras identifican los minerales susceptibles de expansión mediante ensayos petrográficos, tales como el análisis microscópico, la difracción de rayos X y los análisis térmicos diferenciales. En la práctica estos métodos son pocos usados; se emplean ensayos más sencillos.

### 2.1.2.1. Aspecto natural del suelo

Los suelos que contienen las arcillas expansivas llegan a ser muy pegajosos cuando son mojados y son caracterizados generalmente por grietas superficiales (figura 2.3) cuando se seca, por lo tanto, la presencia de las grietas superficiales es generalmente una indicación de un suelo expansivo.



Figura 2.3 Suelo Expansivo que demuestra las grietas

Se tienen tres métodos diferentes para clasificar la potencialidad de expansión de suelos:

*Identificación mineralógica.* Se utiliza en la evaluación del material, en la exploración de las propiedades básicas de las arcillas, pero no es suficiente cuando se trata de suelos naturales. Por ejemplo contenido coloidal, cantidad y tipo mineralógico de la arcilla, contenido de agua natural, etc.

*Métodos indirectos.* Como son las propiedades índice, método de potencial de cambio volumétrico (PVC) y el método de la actividad; útiles para evaluar la expansión. Los métodos indirectos no deben de ser usados independientemente, pues se puede incurrir en conclusiones erróneas.

*Método directo.* Las pruebas son simples de realizar y no requieren equipo sofisticado, ofrecen mayor información. Por ejemplo el método del consolidómetro, la prueba de expansión libre, etc.

**BIBLIOTECA CENTRAL, U.A.Q.**

H70766



### 2.1.3. Algunas causas de expansión y contracción de suelos.

Una de las causas básicas para que el suelo se expanda, es el resultado de una combinación del rebote elástico y, a veces, de la recuperación del contenido de humedad de las masas de suelos sujetos a compresión después de la desaparición de esta fuerza.

#### 2.1.3.1. La habilidad de absorber agua

Las arcillas tienen una habilidad notable de absorber agua y asimilarla en su microestructura. Los cursos introductorios a la mecánica de suelos mencionan como la forma, tamaño y cambio de sus propiedades individuales en las partículas de arcilla permiten asimilar moléculas polares de agua que son cargadas. Un cuadro de partículas de arcilla que muestra como ellas atraen y sostienen moléculas polares de agua se muestra en la figura 2.4.

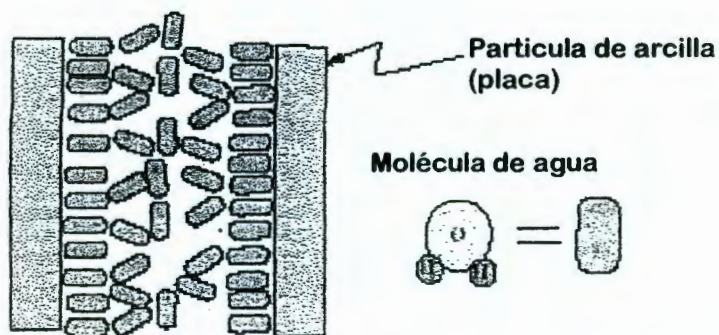


Figura 2.4. Partículas de arcilla cargadas y atracción bipolar de moléculas de agua.

La superficie de área más grande de las partículas de arcilla, y la más alta carga de densidad, más que el suelo de arcilla pueden asimilar agua en su estructura.

Dependiendo del tipo de partículas que comprenden el suelo, se puede observar una amplia gama de conductas con la presencia de agua. En un extremo, imagine una copa de arena seca. Cuando un volumen grande de agua se agrega a la copa, el volumen de la

estructura del suelo permanecerá esencialmente inalterado (figura 2.5). Se caracterizarían partículas de arena inactivas en la presencia de agua.

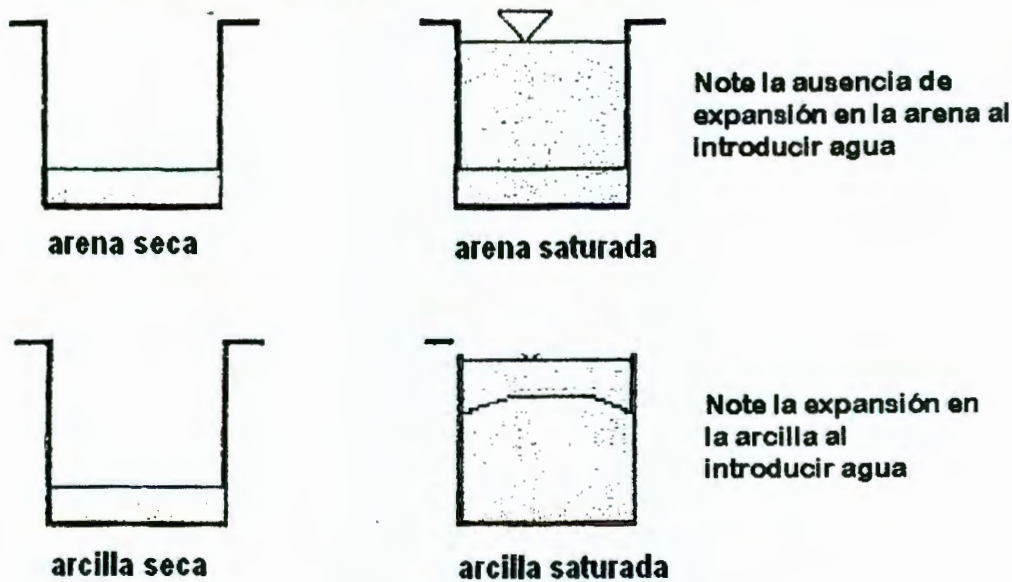


Figura 2.5. Comparación de una arena y suelo expansivo

Si el mismo experimento fuera realizado en una copa de tierra de arcilla seca muy activa, se observaría el volumen del suelo arcilloso aumenta significativamente cuando se agrega agua. La actividad es así una medida de cuanto incrementa el volumen de la estructura del suelo con cambios en el volumen de agua (K. A. Jones, 2002).

Tradicionalmente, la naturaleza expansiva y los cambios en los comportamientos mecánicos de las arcillas con volumen de agua variante son medidos en las pruebas de los límites de Atterberg (figura 2.6). La habilidad de un suelo de asimilar agua en su estructura es moderada por el LL y IP. Las arcillas de caolinita son relativamente inactivas y tienen un despreciable o moderado potencial de expansión. Las arcillas de Illita son ligeramente expansivas, y las arcillas montmorilonita son altamente expansivas.

En forma pura, las arcillas de montmorilonita pueden hinchar a mas de 15 veces de su volumen original al ir de un estado seco aun estado limite liquido totalmente saturado. Afortunadamente nunca se encuentran arcillas de montmorilonita en forma pura en campo, sino que ocurren mezclas con arcillas más estables, arenas y sedimentos. Así bajo las



peores circunstancias, no habría que esperar más del 30 al 50% del volumen de expansión en el campo.

Incluso volúmenes de expansiones que se aproximan a estos niveles pueden tener efectos potencialmente desastrosos en las estructuras y sus cimentaciones. Dada la naturaleza altamente expansiva de la montmorilonita, es prudente detectar su presencia.

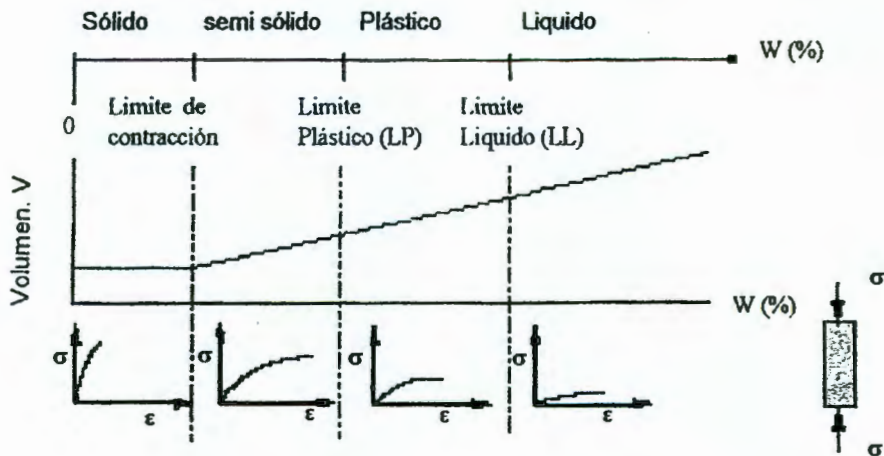


Figura 2.6. Límites de Atterberg para suelos de granos finos, su expansión y su comportamiento mecánico

Las arcillas de este tipo son: 1) arcillas sensibles a la congelación y 2) arcillas sensibles al agua.

### 2.1.3.2. Otros Factores

La existencia de los depósitos de suelos arcillosos sumamente activos, no es necesariamente mala, estos suelos serán sometidos a un comportamiento de contracción y expansión.

Esto solo son cambios en el volumen de agua y sus condiciones de humedad que llevan a la contracción / expansión. Por ejemplo, depósitos de arcilla activos que siempre están secos no expandirán.



La expansión problemática puede observarse en depósitos de arcilla activo localizado en zonas climáticas con estaciones húmedas y estaciones áridas secas. Estas variaciones climáticas llevarán a cambios en el contenido de agua en el suelo y a la contracción / expansión del mismo.

Como podría suponerse, para edificios y cimentaciones, pueden ocurrir problemas significativos cuando las cimentaciones son colocadas en depósitos activos de suelos aparentemente estables y secos, comunes después de largas sequías o periodos de tiempo seco. Una vez construida la estructura en tal suelo, cualquier variación natural en el volumen de agua, debido a la lluvia, o variaciones inducidas en el volumen de agua como regar el jardín y enfocar el escurrimiento del agua de lluvia (canaletas); puede llevar a expansiones significativas y a cambios en las propiedades del suelo. Existen numerosos factores que pueden llevar a problemas potenciales. Estos son:

1. Factores climáticos.
2. La profundidad de la capa activa, y
3. Las actividades humanas.

#### **2.1.3.2.1. Factores Climáticos**

Las condiciones climáticas juegan un papel fundamental, ya que el agua puede abandonar el suelo debido a los procesos de evaporación y transpiración (evapotranspiración), en particular, la transpiración que es controlada por la vegetación cubre un sitio. Existe un transporte de agua descendiente debido a la infiltración de aguas superficiales y de lluvia. Por otra parte tenemos un movimiento ascendente debido a la evapotranspiración.

Cuando la evapotranspiración potencial supera a la infiltración, el agua no ocupa todos los huecos entre partículas, quedando junto a sus contactos, y su presión se hace negativa dando lugar a una compresión de las partículas y a un estado de saturación

parcial. Como se observa en la figura 2.7, la ley de las presiones neutras puede tomar diversas formas dependiendo de los cambios climáticos acontecidos.

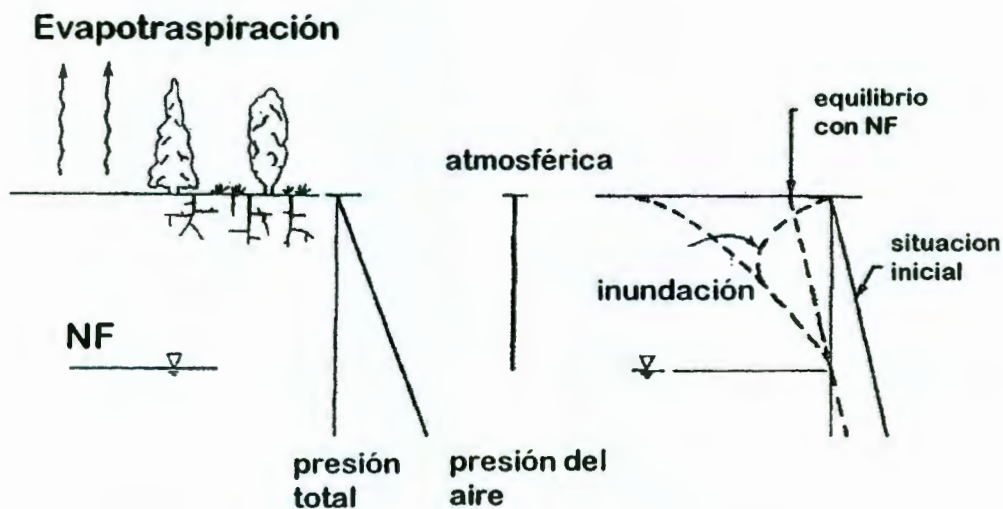


Figura 2.7. Distribución de tensiones durante el desecado de un suelo

Aproximadamente un tercio de la superficie terrestre está considerada como árida o semiárida, es decir, en ella la evapotranspiración supera la infiltración de agua. Estas zonas presentan un nivel freático profundo y los cambios de presiones neutras favorecen la aparición de fenómenos de colapso y expansividad (Figura 2.8).

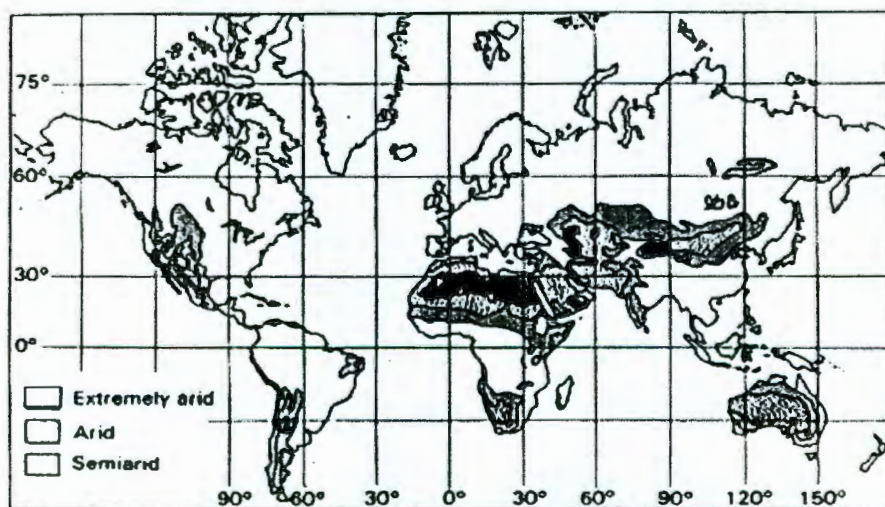


Figura 2.8. Zonas extremadamente áridas, áridas y semiáridas del mundo. (Pérez Romero, 2000)



### **2.1.3.2.2. Profundidad de la capa activa**

En las obras de ingeniería es indispensable el conocimiento de la zona activa (o capa activa), cuando se desea construir en un sitio que releve la presencia de arcillas expansivas.

Resulta sencillo identificar en campo la existencia de estos suelos, pues en tiempo de estiaje se observan con mucha claridad las grietas provocadas por la desecación.

Los problemas de suelos expansivos generan como resultado del cambio de la humedad en los primeros metros de la capa superficial. Si bien es cierto que pueden tenerse expansiones por aumento del contenido de agua en zona más profundas, también resulta poco usual.

Cuando se tienen las condiciones climáticas y ambientales que favorecen el fenómeno, de manera combinada a la presencia del suelo arcilloso con contenido de minerales montmoriloníticos y nivel de aguas relativamente profundas, puede esperarse la existencia del fenómeno, los suelos expansivos.

La capa activa se define como la región de tierra cerca de la superficie en la que el volumen de agua varía debido a la precipitación y a la evapotranspiración (Figura 2.9). La profundidad de la zona activa es la región más grande encima de la cual la expansión del suelo puede ocurrir y se presenta el potencial de expansión más grande.

La profundidad de esta capa varía, dependiendo del lugar y los cambios estacionales (figura 2.10). La capa activa es aquella franja superficial de terreno en las que las variaciones, en un año, del grado de saturación son apreciables (Pérez R., 2000).



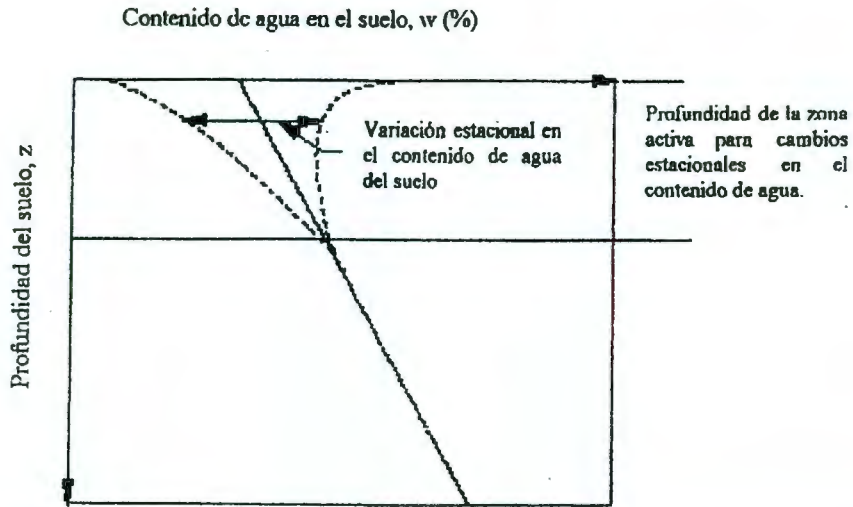


Figura 2.9. Zona activa en tierras que experimentan cambios estacionales en el contenido de agua.

Existen numerosos factores que pueden influir en la profundidad de la zona activa. Dos de ellos son: la existencia de grietas por la contracción del suelo, y la existencia de capas de arena y cristales los cuales pueden transportar agua de la superficie a profundidades mayores del suelo (figura 2.10).

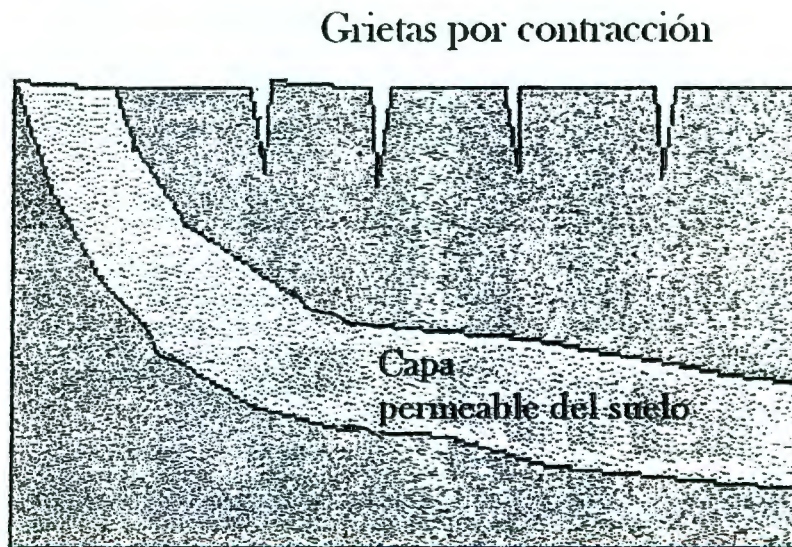


Figura 2.10. Factores que aumentan la profundidad de la zona activa: grietas por contracción y capa permeable

En el terreno virgen, deben investigarse las variaciones de humedad con relación a la profundidad y respecto a las diferentes temporadas del año, además del reconocimiento directo de la estratigrafía y las manifestaciones que en sistemas de grietas generan por la influencia de los ciclos estacionales.

Es necesaria la definición de la profundidad hasta la cual se tiene una influencia significativa de los periodos estacionales, sin ignorar los efectos posibles a causa de ascenso y descenso del nivel de aguas freáticas, sobre todo este cuando no es muy profundo. Así, lo que se determina es la capa de suelo sujeta a cambios de humedad que puedan ser significativos por su consecuencia en cambios de volumen, expansiones y contracciones, en tiempo de lluvia y en temporada de estiaje, respectivamente (Zepeda G. y Pérez R., 1996).

La acción del ser humano frecuentemente viene alterar los equilibrios en el subsuelo, al construir sus obras interfiere en los fenómenos de evapotranspiración e infiltración del agua en el suelo, además del efecto de las fallas en instalaciones hidráulicas y sanitarias que puedan presentarse durante la vida de las obras. La realización de construcciones vecinas y los hábitos de los vecinos, pueden constituirse en un peligro para nuestra obra.

La figura 2.11 muestra los perfiles de humedad que definen la zona activa del terreno virgen.

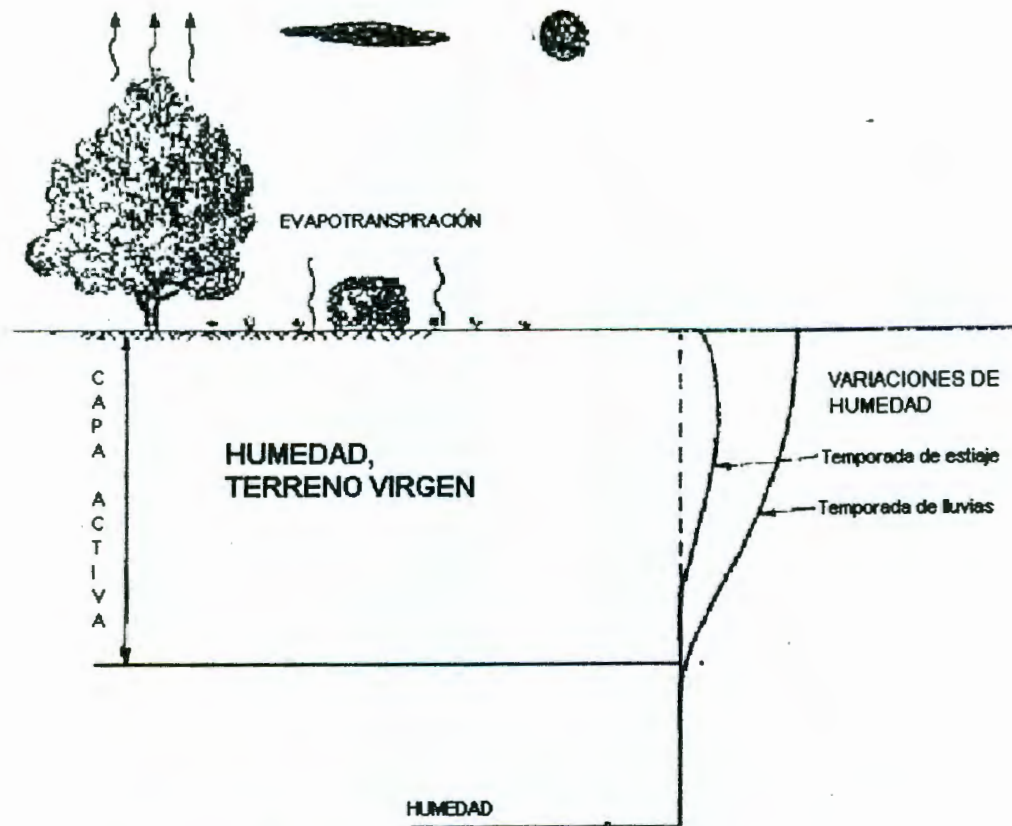


Figura 2.11 Zona activa de los suelos expansivos (López Lara, 2002)

### 2.1.3.2.3. Actividades humanas

Hay numerosas actividades humanas asociadas con medios constructivos que pueden alterar el volumen de agua de los depósitos del suelo cerca de los medios construidos:

- Irrigación del jardín cerca de la cimentación
- Colocación de árboles, que absorben agua de la tierra (transpiración).
- Colocar la losa directamente en la pendiente, lo cual reduce la evaporación
- Encauzado impropio del escurrimiento

Un mismo suelo puede comportarse como colapsable o como expansivo. La expansividad y el colapso son dos fenómenos que ocurren simultáneamente ante los



cambios de humedad o succión. Aquel que produzca un cambio de volumen de mayor cuantía se visualizara externamente, compensando parte de este el fenómeno contrario.

El colapso se debe a la desaparición de cierta cohesión aparente que la succión confiere al suelo. La expansividad se debe a la absorción de agua que tiene lugar entre las placas que componen los minerales arcillosos.

En la figura 2.12 se observa que para ciertas presiones efectivas, de valor moderado, la inundación de la muestra (curva A'B'C'D') se traduce en su expansión. Por el contrario, a partir de cierta presión efectiva la inundación supone un colapso (curva ABCD).

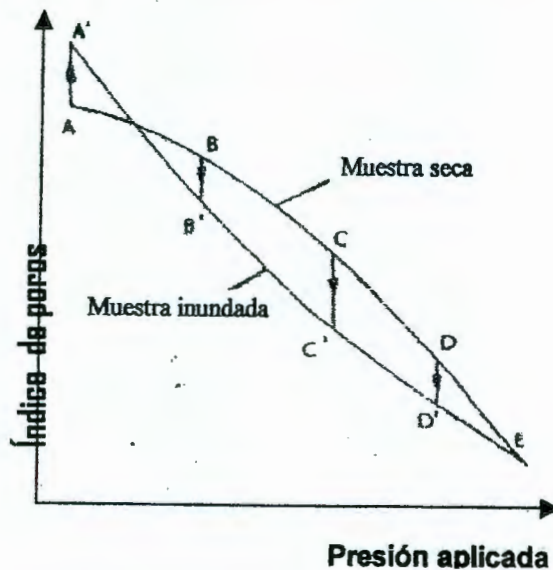


Figura 2.12. Relación conceptual entre el Índice de poros y la presión aplicada para muestras secas inundadas.

El reconocimiento en el campo de los materiales expansivos es bastante fácil, considerando como indicios los siguientes puntos:

- Ausencia de vegetación espontánea de hoja caduca.
- Colores grises, verdosos o azulados.
- Grietas poligonales en superficie durante la estación seca.
- El suelo humedecido es muy moldeable (plástico).

- Barro pegajoso que se adhiere al calzado y a la maquinaria
- Los terrones y las marcas o huellas producidas en el material húmedo son muy persistentes.
- El suelo en estado seco es de consistencia muy dura, siendo difícil de trocear con las manos
- Los suelos masivos secos producen superficies de rotura semejantes a las roturas inducidas en estado seco.
- Los bloques se agrietan si se dejan secar al aire.
- Los cortes se cuarteán superficialmente, dejando caer pequeños bloques, necesitando inclinaciones muy tendidas para su estabilidad (8 a 10 ° aproximadamente).

Sin embargo es apropiado hablar de situaciones potencialmente expansivas que de suelos expansivos.

Es necesario que confluyan los factores internos y externos para que un suelo expanda. Por ejemplo un material mineralógicamente expansivo no sufre hinchamientos si está, siempre inundado y no afectado por excavaciones.

Aunque es común hablar de los peligros de la expansividad no se debe olvidar que la retracción de los suelos expansivos es igualmente peligrosa. Produce graves patologías en las estructuras y al cuartear el suelo permite el acceso rápido del agua superficial y el consiguiente hinchamiento de capas que, hasta entonces, estuvieron más o menos aisladas de los cambios de humedad (J. Pérez Romero, 2002).

#### **2.1.4. Propiedades ingenieriles de las arcillas potencialmente expansivas**

Dentro de estas podemos citar las propiedades de la masa del suelo, conductividad, resistencia al esfuerzo cortante, cambio de volumen, compresibilidad, deslizamiento y deformación permanente, curva esfuerzo & deformación; entre otras.



Las grietas controlan la ruta y posición por donde acceso el agua, así como la deformación y resistencia de la masa. Knight utilizó histogramas polares para mostrar las direcciones dominantes del fracturamiento.

Según Lafeber, la dirección de la mínima resistencia se encontró que baja hacia su buzamiento y el eje de máximo resistencia está a lo largo del rumbo. Las propiedades de resistencia estuvieron controladas por la dirección predominante del movimiento y fracturamiento.

Las masas de suelo expansivo se caracterizan por una red extensa de grietas que separan los terrones del suelo, el movimiento del agua ocurre en dos fases:

- A. El agua fluye por las grietas.
- B. El agua penetra dentro de los terrones.

Después de la época de sequía, el agua fluye (cuando llueve) por las grietas y alrededor de los terrones. El patrón de grietas es indicador de una historia de esfuerzos previos.

La permeabilidad de la masa agrietada (terrones) es la que controla la expansión y contracción del suelo una vez que el agua entre o salga.

La capacidad de carga y estabilidad de taludes de las arcillas agrietadas dependen de la resistencia del suelo a lo largo de los planos de debilidad en donde el agua entra y sale del suelo (López L., 1996).

La humedad puede mover la cimentación con la succión (similar al agua absorbida por una esponja seca). Los suelos se expanden tan poderosamente, que las cimentaciones pueden ser desplazadas. En una estructura, las grietas son causadas generalmente por este movimiento en las diversas direcciones y distancias.



### 2.1.5. Clasificación de los suelos expansivos

Seed, Woodward y Lundgren (1962) relacionan la actividad con el contenido de arcilla, clasificando en cuatro niveles la expansividad potencial según la figura 2.13.

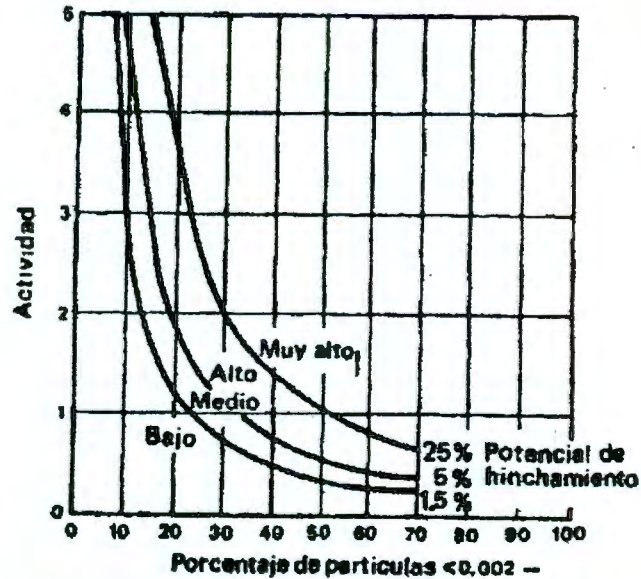


Figura 2.13. Criterio de Seed, Woodward y Lundgren para calificar el potencial de hinchamiento de una arcilla (1962)

Vijayvergiva y Ghazzaly (1973) establecieron una correlación entre la presión de expansión o expansión libre, el límite líquido y el índice  $I_{LL}$ , que relaciona la humedad con el límite líquido, con lo que presentan un sistema de clasificación de la expansividad según la figura 2.14. Cuellar (1978) estableció una clasificación semejante, presentada en la figura 2.15 comparando el límite plástico y el índice de desecación, que relaciona la humedad y el límite plástico utilizando los datos de la figura 2.14.

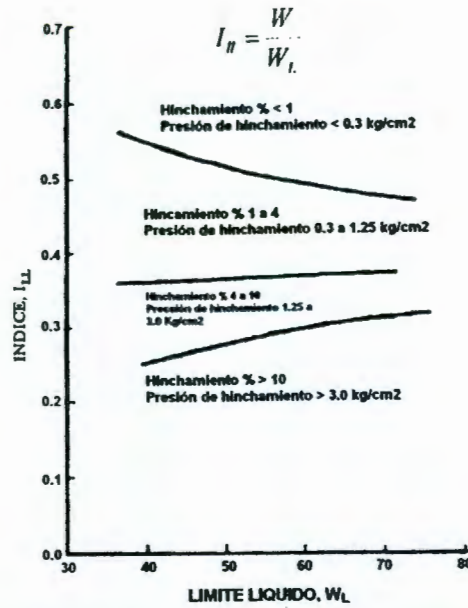


Figura 2.14. Criterio de expansividad de Vijayvergiva y Ghazzaly (1973)

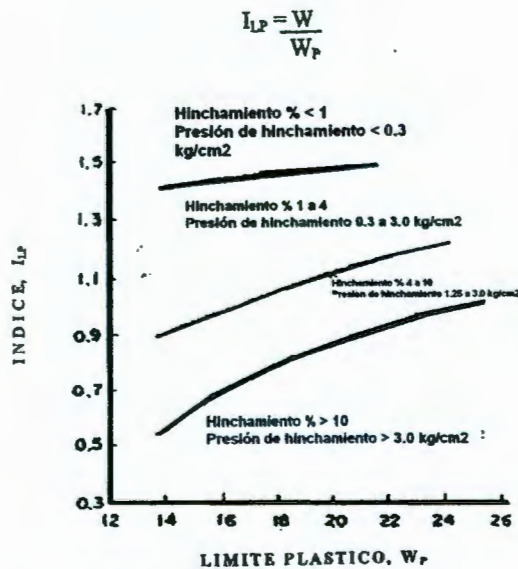


Figura 2.15. Relaciones entre el índice de desecación, el límite plástico y la presión de expansión

El problema de estos métodos de evaluación del potencial expansivo es doble:

- Se apoyan, aun sin decirlo, en datos locales, e imponen condiciones que no tienen porque cumplirse en suelos distintos a los utilizados para hacer el estudio. Por lo tanto, su aplicabilidad a cualquier suelo es cuestionable.

- Consideran situaciones de humedad muy concretas y bastante extremas. Por esto, la expansión potencial o probable debe entender como un valor conservador.

Rodríguez Ortiz (1975) ha agrupado, de acuerdo a la tabla 2.2, diversos criterios de expansividad a partir de datos de laboratorio.

**Tabla 2.2. Criterios de expansividad recopilados por Rodríguez Ortiz (1975)**

<b>Expansividad</b>		<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>	<b>Muy alta</b>
<b>Límite de retracción</b>		>15	12-16	8-12	< 10
<b>Índice plástico</b>		< 18	15-28	25-40	>35
<b>Límite líquido</b>		< 30	30-40	40-60	>60
<b>%=200</b>		< 30	30-60	60-95	>95
<b>% &lt; 0.001mm</b>		< 15	13-23	20-30	>30
<b>Potencial de expansión</b>	<b>(Seed)</b>	0-1.5	1.5-5.0	5-25	>25
<b>Índice Lambe</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	< 0.8	0.8-1.5	1.5-2.3	>2.3
<b>Presión de expansión probable</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	< 0.3	0-1.2	1.2-3.0	>3
<b>Expansión libre probable en superficie</b>	<b>(Mac Dowell)</b>	0-1	1-3	3-7	>7
<b>% de expansión probable</b>		< 1	1-5	5-10	>10

Lidner clasifica los suelos expansivos en cinco categorías, tabla 2.3, posteriormente Jiménez – Salas y Serrano (1984) recogen el trabajo de Lindner y lo complementan según la tabla 2.4.



**Tabla 2.3 Clasificación de suelos expansivos Lindner  
(J. Pérez, 2000)**

Categoría NP	Descripción de la categoría
1	Interactiva con las tensiones
1,1	Levantamiento elastoplástico, producido directamente a continuación de la descarga
1,2	Expansión por desequilibrio interno, debido a la reducción de las presiones negativas del agua intersticial
2	Reacción química Expansión del material constitutivo, relacionada con las tensiones pero debida a las transformaciones químicas
3	Pérdida de la resistencia interna: cementación
4	Reptación (creep)
5	Helada

**Tabla 2.4 Clasificación propuesta de los terrenos expansivos por Jiménez Salas y Serrano**

Tipo	Clase	Descripción
1. Mecánica	1.1 Inicial (elástica)	Deformación elástica del material hacia el interior del agujero, que puede ser importante si el terreno es blando.
	1.2 Fluencia (Plástica)	Convergencia progresiva debido a la progresión del anillo plastificado. Puede llegar a ser muy lenta, incluyendo la clase 4 de Lindner.
	1.3 Primaria (relajación de tensiones capilares)	Convergencia progresiva debido al aumento de volumen diferido del material. El retraso se debe a la necesidad de aumentar el contenido de agua, disminuyendo la tensión capilar y en consecuencia la tensión efectiva.
	1.4 Secundaria (esponjamiento diferido del terreno, debido a debilitación de su esqueleto)	Convergencia progresiva debida al aumento del volumen diferido del material. El retraso se debe al deslizamiento o rotura de enlaces diagenéticos, lo que transfiere su carga u otros enlaces que resultaran sobrecargados y fallaran mas tarde.
2. Físico - Química	2.1 Hidratación de minerales silicatados	Aumento de volumen de sílice opalina y otros minerales relacionados. Hidratación de arcillas por admisión de moléculas de agua entre las hojas de su red atómica. Caolinización de los feldespatos, rápida si ya estaba iniciada.
	2.2 Hidratación de otros minerales	Caso mas frecuente la hidratación de la anhidrita, pasado a yeso con un aumento del 20% de volumen. Puede presentarse también el sulfato de magnesio.
	2.3 Oxidación de minerales	Caso de más frecuencia la pirita con intervención o no de la pirrotina o de bacterias para acelerar la reacción. En presencia de Ion de calcio formación de yeso secundaria
3. Helada		Levantamiento de la solera en algún túnel carretero con circulación intensa de aire muy frío, por formación de lentejones de hielo en terreno limoso.

En el caso 1.1 es especialmente usado en terrenos anisotropicos (Oteo, 1995), como son los materiales estratificados o esquistos. El tipo 1.2 corresponde especialmente a los materiales con sales de sodio y potasio, como los yesos, anhidritas, etc. El tipo 1.3 es muy

frecuente, correspondiendo a materiales preconsolidados de grano fino; la relajación tensional permite la entrada de agua intersticial que provoca el hinchamiento por hidratación de los minerales expansivos. El tipo 1.4, es muy parecido al anterior; supone roturas de enlace de cementación que habían impedido la expansión del terreno al soldar la estructura sólida.

La expansividad físico - química puede ser simultánea a la mecánica. Así el tipo 2.1 se suele dar al mismo tiempo que la expansividad mecánica 1.3 en margas con montmorillonita, en que el cambio tensional se une a la hidratación de las esmectitas. El tipo 2.2 corresponde a la hidratación de otros minerales como la anhidrita que, al pasar a yeso, da a lugar a grandes cambios de volumen, del orden expansión libre en el consolidómetro entre 10 y 20%.

El tipo 2.3 corresponde a la oxidación de minerales como la pirita, que pueden estar presentes en pizarras cretácicas y silúricas españolas. Esta oxidación produce sulfato de hierro y ácido sulfúrico, el cual produce yeso y jarosita. La presencia de pirrotita, sulfuro de hierro, acelera estas reacciones. En caso de haber gunita, además de tener en cuenta el empuje debido a la expansión, pueden producirse ataques por agresividad del agua cargada de sulfatos.

Hoy en día se utilizan técnicas más elaboradas, como son los edómetros y aparatos triaxiales con control de succión.

La presencia de expansividad puede ir también asociada a suelos volcánicos (1995) debido a:

- Meteorización de zonas artificiales de rocas volcánicas. Estas zonas residuales pueden quedar posteriormente ocultas por otra erupción.
- Bentonitas procedentes de alteraciones hidrotermales.
- Alteraciones in situ o depósitos coluviales o aluviales, a veces lacustres, que producen suelos arcillosos. Generalmente tienen alto contenido de montmorillonita y límites líquidos por encima de 50. La expansividad generada es menor de la esperada debido a



su textura. En piroclastos de tamaños medio o superior la alteración puede ser solo superficial el interior poroso, lo cual disminuye el potencial expansivo. Si el material piroclástico es de grano fino la alteración puede ser intensa, encontrando una considerable expansividad. En zonas de pendiente baja se desarrollan vertisuelos expansivos, como se muestra en la figura 2.16 (J. Perez Romero, 2000).

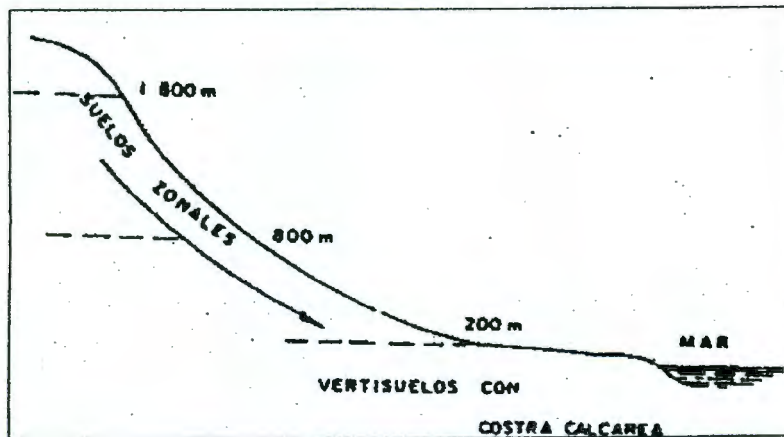


Figura 2.16 Desarrollo de vertisuelos expansivos

### 2.1.6. Problemática de los suelos expansivos

Si realizamos una representación del grado de saturación en profundidad encontramos, para situaciones con cierto déficit de humedad, que los primeros metros no se encuentran saturados. Una vez alcanzado el nivel freático sabremos con seguridad que la saturación es total. Este perfil de grado de saturación puede también realizarse midiendo la succión o presión negativa del agua con respecto a la presión de aire. En la figura 2.17 se representa la variación de humedad para distintos meses de un año (Jiménez Salas, 1980). Esta variación dependerá de varios factores, siendo fundamentales la variación del nivel freático en el acuífero y sobre todo el clima en superficie. Puede existir una zona no saturada en la que el grado de saturación permanezca fijo durante un año.



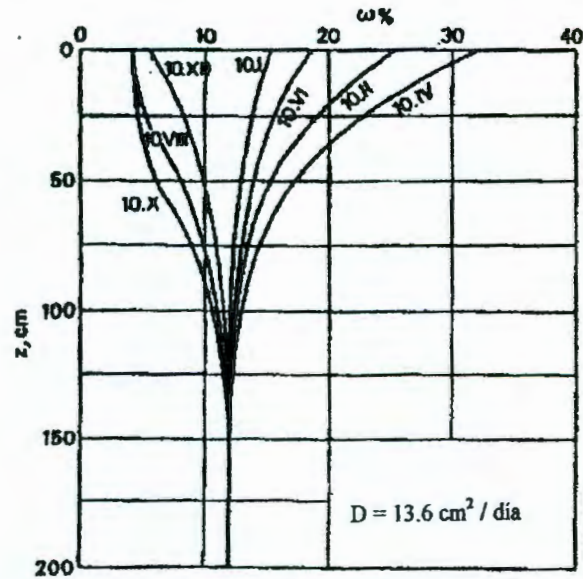


Figura 2.17. Perfiles de humedad (Jiménez Salas, 1980)

La construcción de una estructura más o menos impermeable sobre un terreno pueden variar las condiciones locales de humedad en el suelo. Si existen minerales expansivos bajo la estructura provocaremos cambios de volumen, expansión o retracción.

Unos climas monzónicos si encontramos una estación seca y otra húmeda claramente diferenciados. En general, durante la estación seca existe un déficit de humedad en superficie. Esta situación se ha presentado en la figura 2.18.

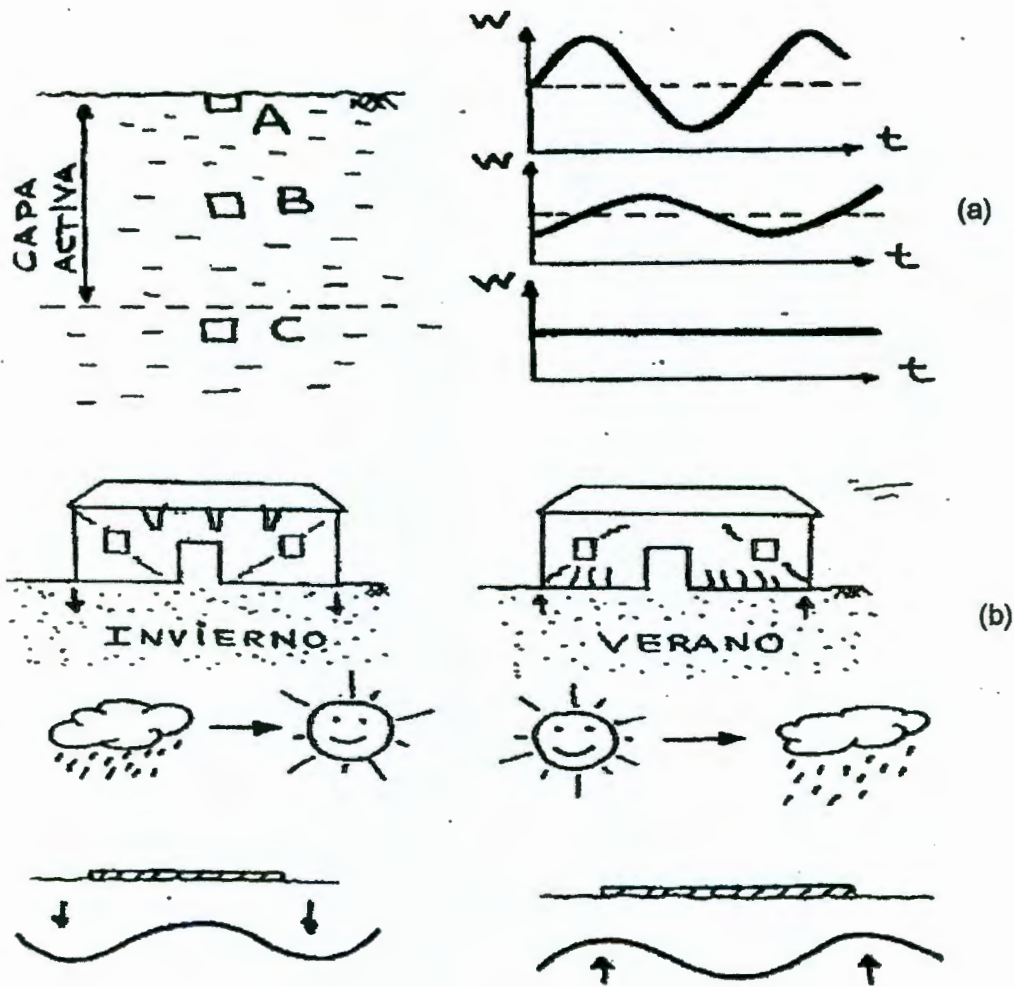


Figura 2.18 (a) Capa activa y (b) clima monzónico (Pérez Romero, 2000)

Si colocamos una estructura a finales de la estación seca el grado de saturación natural del terreno inferior tendrá los valores mínimos anuales, según la figura 2.19 Al llegar las lluvias el terreno circundante recibirá agua desde la superficie, humedeciéndose, mientras que bajo la estructura la llegada de agua es más difícil y el suelo tendrá un grado de saturación menor. Esto supone expansiones diferenciales en la cimentación y esfuerzos diferenciales en la cimentación y esfuerzos sobre la estructura.

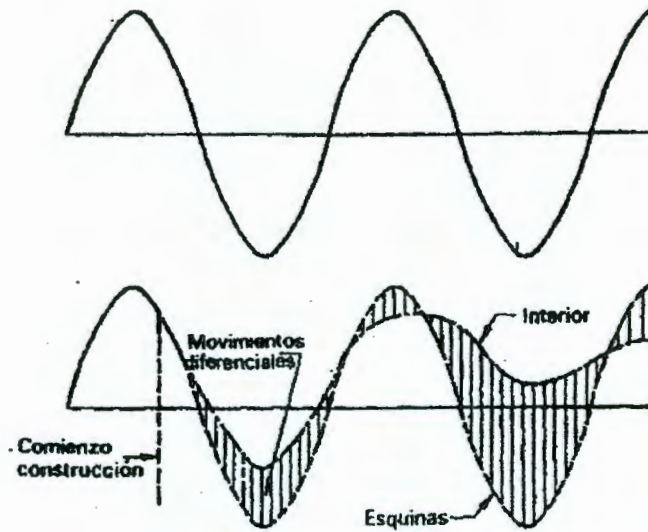


Figura 2.19 Movimientos estacionales del terreno descubierto y de un edificio, a partir de su construcción

Si la construcción se realiza durante la estación húmeda la situación se invierte, puesto que al llegar el verano la humedad bajo la estructura sería mayor que alrededor ya que protegemos la evapotranspiración. Los asentamientos diferenciales y los esfuerzos inducidos son opuestos al caso anterior pero producen patologías más severas.

Estudios realizados en Sudáfrica (de Brujin 1965) sitúan la aparición de daños diferida hasta en tres a cinco años. Existe migración de humedad hacia tuberías frías, como las de abastecimiento de agua. Se recomienda el ensayo sobre un área circular cubierta de 15 m de diámetro.

La vegetación de reforestación genera cambios en la humedad del terreno ya que las raíces buscan zonas húmedas y absorben agua intersticial. Por el contrario, el talado de árboles elimina la migración del agua. La naturaleza del cambio de volumen, expansión o contracción, dependerá de la naturaleza del suelo, expansivo o colapsable. Actividades generadoras de calor, como los hornos, provocan déficit de humedad inducidos (J. Pérez R., 2000).



## 2.2 Criterios para evaluar la expansividad

Se usan distintos ensayos de laboratorio que van desde muy sencillos, como por ejemplo los análisis granulométricos y la obtención del contenido de finos o de la fracción fina arcillosa, hasta ensayos que reproducen la expansividad en el consolidómetro.

### 2.2.1 Pruebas de los Límites de Atterberg

Una suspensión de arcillas fluye como un líquido y carece prácticamente de resistencia al esfuerzo cortante. Esta última se va constituyendo en forma gradual conforme se seca la suspensión y la masa de arcilla va pasando por los estados mostrados en la tabla 2.5

**Tabla 2.5 Límites entre los diferentes estados y símbolos empleados**

Estado de la masa	Límites entre los diferentes estados y símbolos empleados para su designación.
Líquido	Límite líquido (LL o $w_c$ )
Plástico	Límite plástico (LP o $w_p$ )
Semisólido	Límite de contracción (LC o $w_c$ )
Sólido	

Los límites arriba expresados se conocen como límites de Atterberg o con fines de consistencia. Corresponden a los contenidos de agua de la masa conforme va pasando de uno a otro estado.

Los límites de Atterberg dan poca información sobre la naturaleza expansiva de los suelos arcillosos. Por ejemplo la tabla 2.6 correlaciona el potencial de expansivo del suelo con su límite de Atterberg.

**Tabla 2.6 Potencial expansivo del suelo**

<b>Límite líquido LL (%)</b>	<b>Índice plástico IP (%)</b>	<b>Potencial de expansión PE (%)</b>	<b>Clasificación</b>
< 50	< 25	< 0.5	Bajo
50 - 60	25 - 35	0.5 - 1.5	Moderado
> 60	> 35	> 1.5	Alto

### 2.2.2 Prueba de Volumen constante

En este procedimiento el espécimen es sometido a una sobrecarga y sumergido en agua. El alivio de la presión de agua de poro negativa, llevada a condiciones atmosféricas, resulta en una tendencia del espécimen a expandirse.

A medida que el espécimen tiende a expandirse, la carga aplicada es incrementada para mantenerlo a un volumen constante.

Este procedimiento se continúa hasta que el espécimen deja de mostrar tendencia a expandirse. La carga aplicada en éste punto es conocida como presión de expansión sin corregir (la corrección se hace por deformación del aparato). El espécimen es después cargado y descargado de manera convencional. Los resultados son generalmente graficados en ejes tridimensionales. Figura 2.20.

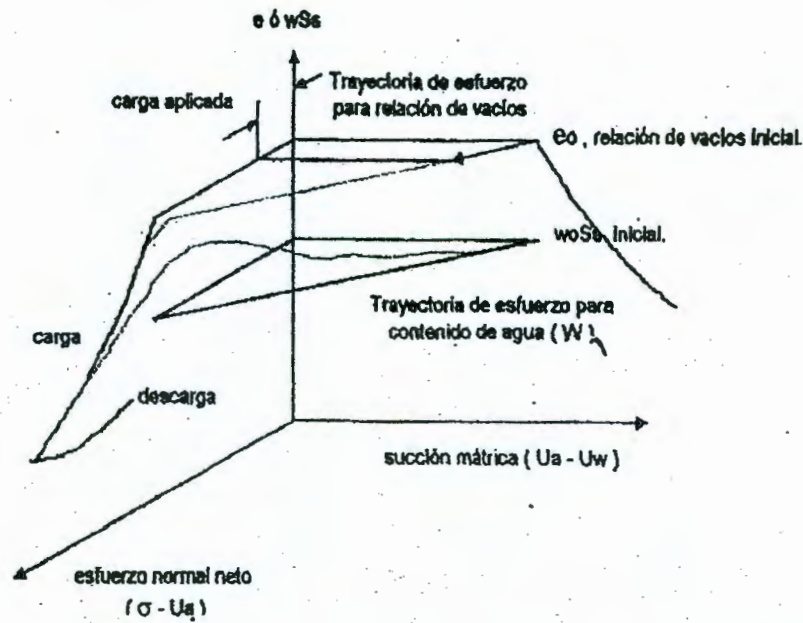


Figura 2.20 Representación de una trayectoria de esfuerzos ideal para un ensaye edométrico a volumen constante (Braja M., 2001)

### 2.2.3 Prueba de expansión libre o expansión no restringida

En este ensaye al espécimen se le permite expandirse libremente, tan solo con una sobrecarga aplicada. La carga necesaria para regresar al espécimen a su relación de vacíos original, es llamada presión de expansión.

Este ensaye tiene la limitante de permitir un cambio de volumen e incorporar un fenómeno de histéresis en la estación del estado de esfuerzo in situ; sin embargo es comúnmente empleado por su sencillez de realización.

Se coloca el espécimen bajo una pequeña sobrecarga de aproximadamente  $1 \text{ lb/pulg}^2$  ( $6.9 \text{ kN/m}^2$ ). Luego se agrega agua al espécimen y se mide el aumento del volumen del espécimen (es decir la altura, pues la sección transversal es constante) hasta que se alcanza el equilibrio.

El porcentaje de expansión libre se expresa:



$$S_{w(\text{libre})}(\%) = \frac{\Delta H}{H} (100) \text{ -----Ec. (1.1)}$$

donde:

$S_{w(\text{libre})}$  = expansión libre como porcentaje

$\Delta H$  = altura de la expansión debido a la saturación.

$H$  = altura original del espécimen.

Vijayvergiya y Ghazzaly (1973) analizaron varias pruebas en suelos obtenidos de esta manera y prepararon una carta de correlación de la expansión libre, límite líquido y contenido de agua natural, como se muestra en la figura 2.21.

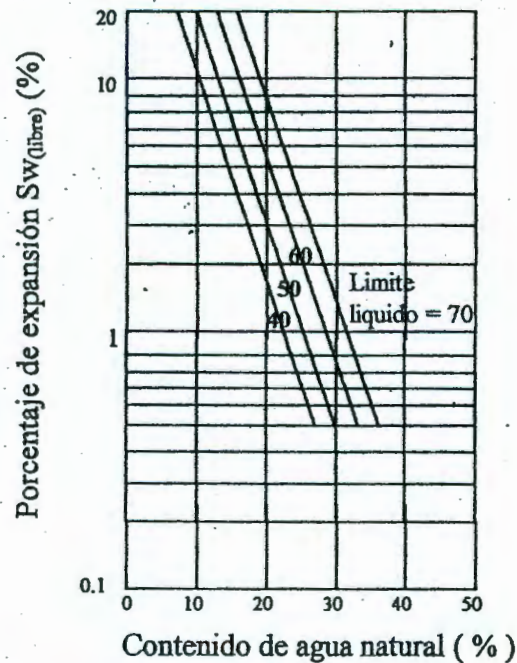


Figura 2.21 Relación entre porcentaje de expansión libre, límite líquido y contenido de agua natural (Vijayvergiya y Ghazzaly, 1973)

En 1980 O'Neill y Poormoayed desarrollaron una relación (ec. 1.2) para calcular la expansión de la superficie libre con la carta mostrada en la figura 2.21

$$\Delta S_F = 0.0033Z S_{w(\text{libre})} \text{-----Ec. (1.2)}$$

donde:

$\Delta S_F$  = Expansión libre superficial

Z = Profundidad de la zona activa

$S_{w(\text{libre})}$  = expansión libre (fig. 2.21)

#### 2.2.4 Prueba del índice de expansión libre modificado

En 1987 Sivapullaiah y otros sugirieron un nuevo método de prueba para obtener un “Índice de expansión libre modificado” para arcillas, da una indicación mejor del potencial de expansión en suelos arcillosos.

Esta prueba comienza con un suelo seco en horno con masa aproximadamente 10 gramos. La masa del suelo es bien pulverizada y transferida a una probeta graduada de 100 ml conteniendo agua destilada. Después de 24 horas, se mide el volumen del sedimento expandido. Se calcula el *índice de expansión libre modificado* con la siguiente expresión (1.3).

$$\text{Índice de expansión libre modificado} = \frac{V - V_s}{V_s} \text{-----Ec. (1.3)}$$

donde:

V = volumen del suelos después de la expansión

$V_s$  = volumen de sólidos del suelo =  $\frac{W_s}{\gamma_s \gamma_w}$

$W_s$  = peso del suelo seco en el horno

$\gamma_s$  = peso especifico de los sólidos del suelo

$\gamma_w$  = peso especifico del agua.

Con base en el índice de expansión libre modificado, el potencial de expansión de un suelo debe clasificarse cualitativamente con la tabla 2.7.

**Tabla 2.7. Potencial de expansión**

<b>Índice de expansión Libre modificado</b>	<b>Potencial de expansión</b>
< 2.5	Despreciable
2.5 a 10	Moderado
10 a 20	Alto
> 20	Muy Alto

Sikh (1993) reportó los resultados de varias pruebas de expansión libre en especímenes de suelo inalterado del sur de California, sometiendo los especímenes de suelo a la *presión de sobrecarga efectiva real*.

Los resultados están dados en la figura 2.22 la curva del limite superior indica que, para una presión de sobrecarga efectiva de aproximadamente 1.4 klb/pie<sup>2</sup> (0.6838 kg/cm<sup>2</sup>).

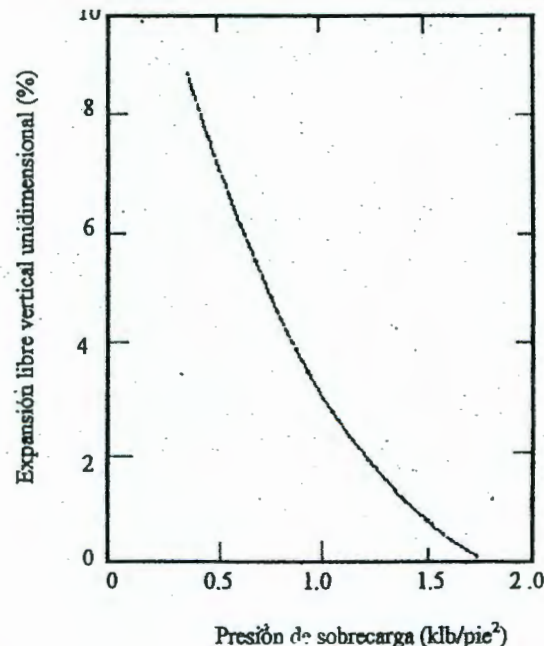


Figura 2.22 Expansión libre vertical unidimensional de algunos suelos del sur de California (Sikh)



### 2.2.5 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 que se expresa en la ecuación 1.4 y la presión de expansión

$$S\% = \frac{\delta}{h_0} \text{ ----- Ec. (1.4)}$$

donde :

S% = Porcentaje de expansión

$\delta = h_f - h_o =$  Diferencia de altura expandida

$h_f =$  altura final

$h_o =$  altura inicial

### 2.2.6 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/cm<sup>2</sup>, 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).

### 2.2.6.1 Norma ASTM D4546-03.

La norma ASTM D (4546-03) (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 encuentren 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 (figura 2.23).

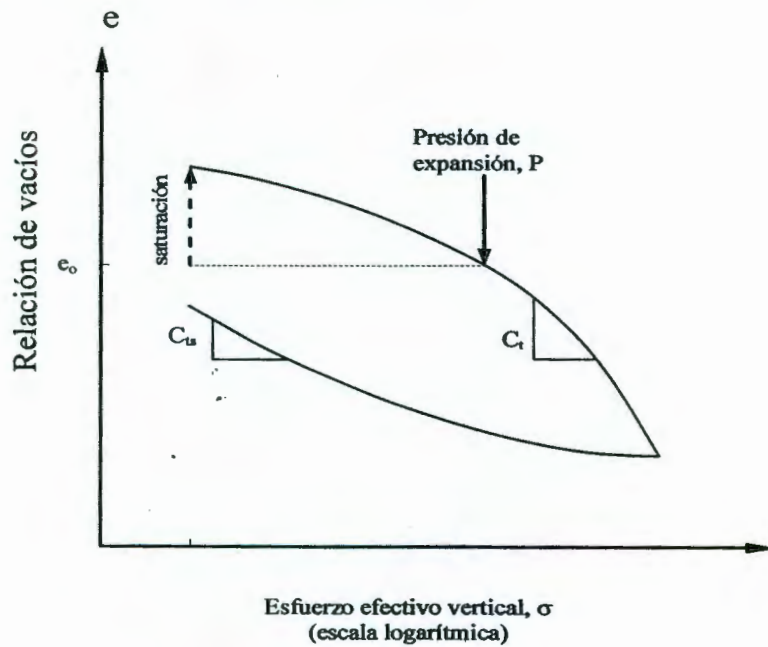


Figura 2.23 Método A, presión de expansión ASTM D4546-03



**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; 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 2.24

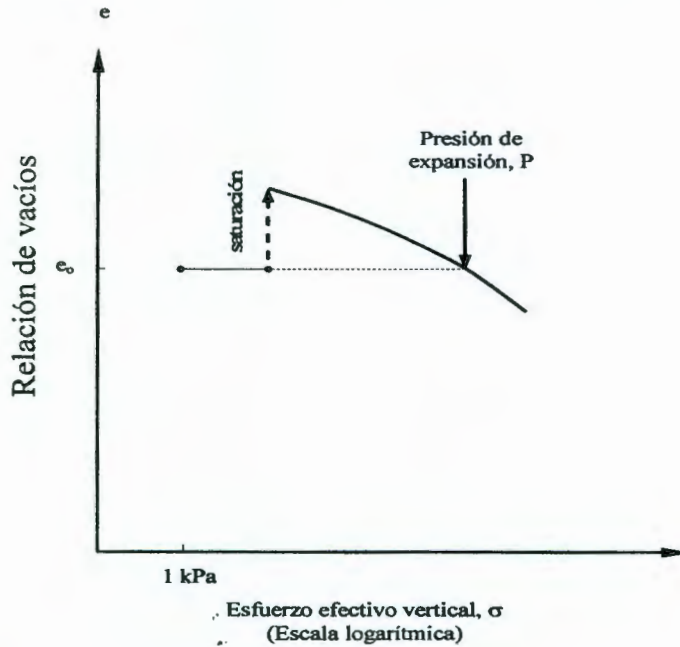


Figura 2.24 Método B, presión de expansión ASTM D4546-03

**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 (figura 2.25).

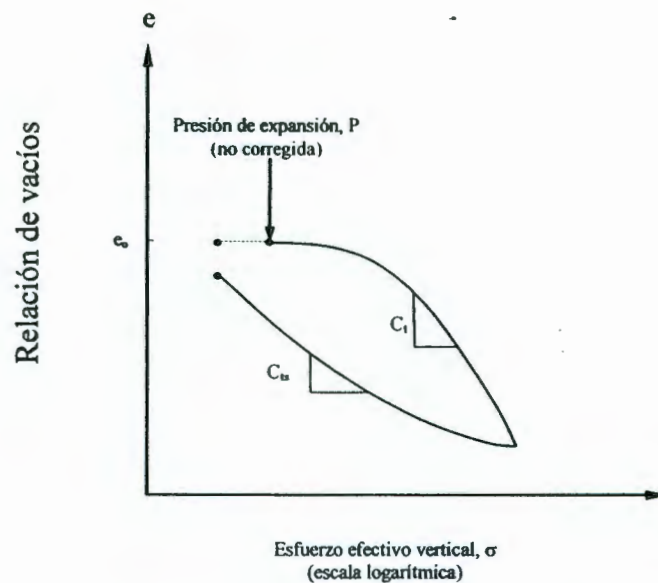


Figura 2.25 Método C, presión de expansión ASTM D4546-03

### 2.3 Determinación de la expansión volumétrica por hidratación en un suelo expansivo

En este trabajo se sugiere un método de análisis de interacción suelo-estructura basado en pruebas en el odómetro y pruebas de succión, que consiste en determinar un coeficiente  $\alpha_h$  por expansión que introducido en el método de interacción suelo-estructura propuesto por Zeevaert (1973) nos prediga la magnitud de la expansión del suelo tomando en cuenta la estructura. El método propuesto analiza el comportamiento del suelo basado en los cambios internos de humedad y efectos que estos producen en la cimentación, de manera que en los puntos de contacto entre el suelo y la estructura exista un solo efecto (Cabrera Arvizu, 2002).

## 2.4 FENOMENO DE LA SUCCIÓN

### 2.4.1 Succión o energía potencial del suelo.

Aunque no es técnicamente correcto, el término de succión puede ser descrito en forma simple como una medida de afinidad del suelo con el agua (W.K. Wray, 1984).

La succión total del suelo fue definida en 1960 como "La magnitud de la presión relativa a la presión externa del gas en el agua del suelo". la succión total esta compuesta principalmente por dos tipos diferentes de succión: la succión mátrica ( $\Psi_m$ ), la cual es una presión negativa actuando en los granos sólidos del suelo y la succión osmótica ( $\Psi_s$ ); que esta asociada al contenido de sales. Además pudiera añadirse una tercera componente  $\Omega$ , por efecto de sobrecarga. La succión se expresa en cm de columna de agua. Estas presiones son negativas necesariamente, para mantener las condiciones de equilibrio en el suelo.

La succión en el suelo puede ser medida ya sea por métodos directos como indirectos.

Generalmente el método se elige de acuerdo a la succión que se espera medir, ya sea para utilizarse en campo o en el laboratorio. Algunos métodos de mayor uso son el tensiómetro, el psicrómetro de termopar, la lamina de succión, la lamina de presión y el desecador al vacío. Los últimos tres se utilizan únicamente en el laboratorio, mientras que los otros dos son utilizados además para medir la succión in situ.

En 1965 se estableció un panel para el Simposio de Mecánica de Suelos "Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils" (Aitchinson, 1965) en el cual se aportó una definición de la succión del suelo y de sus componentes, con base a la termodinámica.

Se definió como potencial total del agua del suelo, o succión total, a "la cantidad de trabajo que debe realizarse por cantidad unitaria de agua pura, a fin de transportar reversiblemente e isotérmicamente una cantidad infinitesimal de agua desde un depósito



de agua pura, a una elevación específica bajo presión atmosférica (en el punto bajo consideración)”:

De acuerdo a Lee y Wray (1995), la succión es una cantidad de energía que evalúa la capacidad del suelo para retener agua. Cuando el agua libre se traslada al ambiente del suelo, el agua puede retenerse o absorberse por el suelo. En términos generales, entre más seco este el suelo, la succión será mayor. En forma más sencilla y sin rigor, puede decirse que la succión es un estado de presión negativa en el agua del suelo, el cual depende de varios factores.

La succión del suelo es una medida de energía libre del agua del poro en un suelo. La succión de un suelo es, en términos prácticos, una medida de la afinidad del suelo para retener agua y puede proporcionar información sobre los parámetros del suelo que son influenciados por el agua; por ejemplo, cambios de volumen, deformación y las características de resistencia del suelo.

La succión del suelo es relacionada con el contenido de agua del suelo a través de las curvas características de retención de agua. El contenido de agua del suelo puede ser determinado con la norma ASTM D2216.

#### **2.4.2 Estado del agua en el suelo**

En el suelo, debido a que el movimiento del agua es muy lento, la energía cinética se considera despreciable, en cambio de la energía potencial es de primera importancia y se origina por la posición o condición interna, influyendo en el estado y movimiento del agua dentro del suelo.

La diferencia de energía potencial entre dos puntos provoca la tendencia del agua a fluir dentro del suelo. Existe la tendencia espontánea y universal de toda la materia en la naturaleza a que el movimiento se genere de un punto en el que la energía potencial es mayor a donde es menor y para cada parte de materia a equilibrarse en su entorno.

El concepto potencial agua-suelo es fundamental y de gran importancia. Este concepto reemplaza la categorización arbitraria que prevalece desde etapas tempranas del desarrollo de la física del suelo y que clasifica las “formas” del agua del suelo: “agua gravitacional”, “agua capilar”, “agua higroscópica”, etc. El hecho es que todas estas condiciones del agua, no solo una de ellas, están afectadas por el campo de gravedad de la tierra, por tanto el efecto es todo “gravitacional”. Además las leyes de capilaridad no empiezan o terminan en ciertos valores de humedad o tamaños de poros.

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 (Zepeda 2004).

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 es una medida de propiedad intrínseca del suelo.

### **2.4.3 Técnicas para medir la succión en laboratorio**

#### **2.4.3.1 Papel filtro**

La técnica fue originada por Gardner en 1930, ha sido usada por Mckeen (1980) para estudios de Airport Pavement Subgrades y Lytton también la ha utilizado en sus trabajos en la Universidad de Texas A & M. Otros autores en sus investigaciones sobre arcillas expansivas también han hecho uso de ella. Las comparaciones entre este método y otros muestran que los resultados encontrados tienen precisión razonable.



#### **2.4.3.1.1 Norma ASTM D5298-03**

Este método de ensayo cubre el uso del papel filtro como un sensor pasivo para evaluar el potencial (succión) mátrica y total del suelo, una medida de la energía libre del agua de poro o esfuerzo de tensión ejercido en el agua de poro por la matriz de suelo. El termino potencial o succión describe el estado de energía del agua del suelo. Este método controla las variables para la medición del contenido de agua del papel filtro que esta en contacto directo con el suelo o en equilibrio con la presión parcial del vapor del agua de poro en el espécimen del suelo.

El papel filtro es colocado en un contenedor hermético con un espécimen durante 7 días, tiempo suficiente para que la presión de vapor de agua de poro en el espécimen, la presión del vapor del agua de poro en el papel filtro, y la presión parcial del vapor de agua en el aire que se encuentra dentro del contenedor alcancen el equilibrio. Subsecuentemente se determina la masa del papel filtro y la succión del espécimen, también se determina a partir de las relaciones de calibración del contenido de agua del papel filtro con la succión aplicable al tipo del papel filtro y el procedimiento de este método de ensayo.

El método del papel filtro para la evaluación de la succión es simple y económico con un rango de 10 a 100 000 kPa. (0.1 a 1000 bars).

Esta norma no contempla todo lo concerniente a seguridad. Es responsabilidad del usuario establecer los estándares apropiados para las prácticas de seguridad adecuadas y determinar la aplicabilidad de las limitantes regulatorias para su uso.

#### **2.4.3.2 Método de la placa de succión**

Con este método, Fig. 2.26 no pueden medirse valores mayores de  $P_f=3$ , pues el agua entra en la cavitación, además, el vidrio poroso debe tener un valor de entrada de aire (succión de entrada de aire) superior a la succión que queremos medir en el suelo.



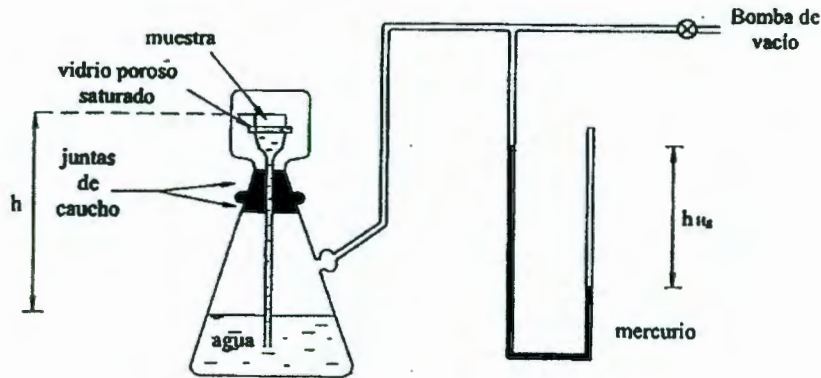


Figura 2.26 Método de la placa de succión para determinar el Pf (Zepeda, 2004).

Por medio de una bomba de vacío genera una succión la cual corresponderá a la suma de la altura de la columna de mercurio  $h_{Hg}$ , y la del agua,  $h$ . Una vez logrado el equilibrio se determina la humedad del suelo. Para obtener la curva característica, puede repetirse el ensaye para diversas succiones. La presión generada por la bomba de vacío nos dará la succión de la muestra. La norma ASTM D2325-68 resulta similar.

### 2.4.3.3 Método de la centrifugación (Norma ASTM D425-69)

Este método se puede utilizar para valores de Pf entre 3 y 4.5. En un recipiente cilíndrico con contenido de agua en su parte inferior, se coloca un cilindro poroso saturado sobre el cual reposa la muestra de suelo por intermedio de una placa porosa también saturada, fig. 2.27. Una limitación importante de este aparato es que en las centrifugas normales solo se puede colocar una muestra de 1.5 cm de diámetro por 0.5 cm de espesor como máximo. Por estos motivos Coleman (1959) considera que este método no es adecuado para ensayos de rutina.

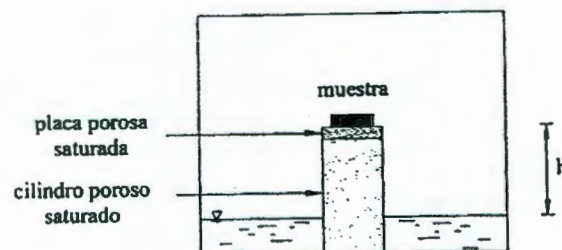


Figura 2.27 Procedimiento de la centrifugación para la medida del Pf (Zepeda, 2004).

#### 2.4.3.4 Método de la membrana de presión

Por medio del método de la membrana de presión, fig. 2.28, se pueden medir valores del  $P_f$  entre 2 y 6.18 (Coleman y Marsh, 1961). Con el aparato que se muestra en la figura se pueden medir valores de 2 a 5.3. la muestra se coloca dentro de una cámara de presión que estanca al aire, en contacto con una membrana de celulosa saturada, permeable al agua, pero muy poco al aire. El agua se mantiene durante todo el ensaye a la presión atmosférica mediante una comunicación con agua libre, la presión del aire dentro de la cámara se eleva lo mas pronto posible tras la colocación de la muestra a una presión determinada, con ello aumenta en la misma cantidad de la presión del aire en los poros del suelo.

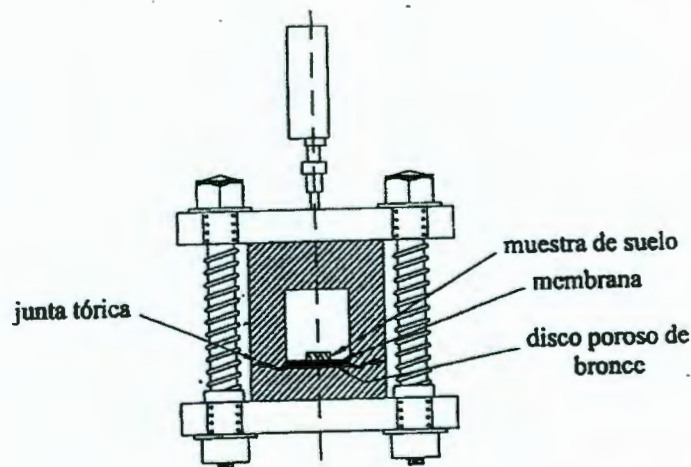


Figura 2.28 Aparato de la membrana de la presión (Zepeda, 2004)

#### 2.4.3.5 Desecador de Vacío

Este método emplea una cámara hermética y consiste en colocar la muestra de suelo en una placa porosa encima de un depósito parcialmente lleno de ácido sulfúrico u otra solución que mantenga un valor definido de presión de vapor la cual puede regularse con la concentración de químicos en la solución.



## 2.4.4. Técnicas para medir succión en campo

### 2.4.4.1. Tensiómetros

Estos aparatos se utilizan para medir la succión mátrica del suelo. Los tensiómetros constan de una copa cerámica conectada a través de un tubo de manómetro, todo el sistema debe estar lleno de agua. La copa porosa se introduce al suelo hasta el nivel deseado, una vez colocada, el agua del interior, que se encuentra originalmente a la presión atmosférica, entra en contacto con el agua del suelo a través de dicha copa. La succión que ejerce el suelo provoca que disminuya la presión en el interior del sistema hasta llegar al equilibrio. La succión se mide con un manómetro la cual puede ser de agua o de mercurio. La figura 2.29 muestra las partes esenciales de un tensiómetro.

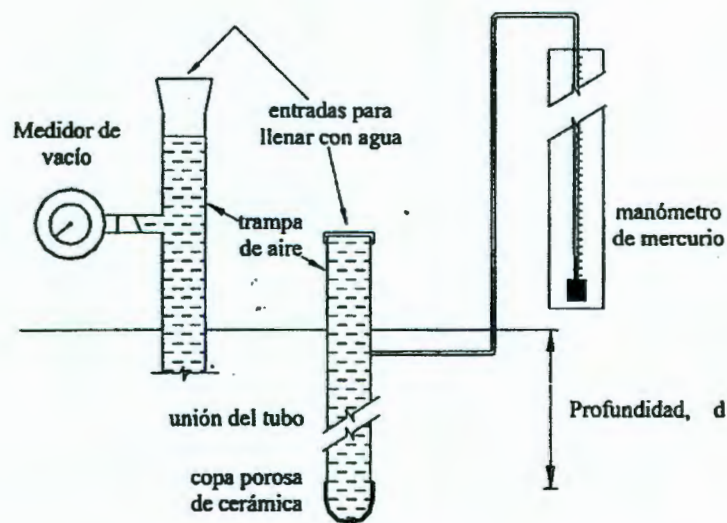


Figura 2.29 Ilustración esquemática de las partes esenciales del tensiómetro (posterior a Richards, 1965).  
(Zepeda, 2004)

### 2.4.4.2. Sicrómetro de Termopar

La determinación de la succión por medio del sicrómetro de termopar representa un enfoque energético en el que la succión se evalúa por mediciones de la humedad relativa dentro del suelo.



En los sigrómetros se usan dos efectos adoptados de la teoría de termopares. Seebeck (1821) encontró que cuando dos conexiones de un circuito termopar se mantienen a diferente temperatura, se induce una corriente eléctrica. El efecto Seebeck, Figura 2.30, es la base para la medición de temperaturas usando termopares. Peltier (1834) descubrió a su vez, que cuando se induce una corriente eléctrica en un circuito termopar por una batería, una conexión del circuito tiende a enfriarse y la otra calentarse (Zepeda, 2004), Figura 2.31

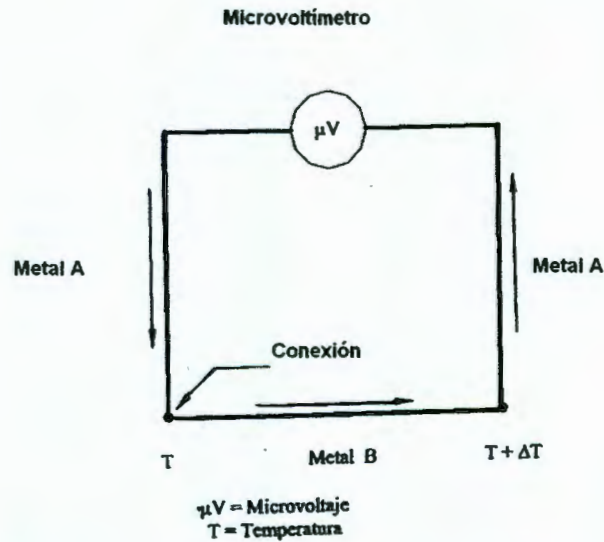


Figura 2.30 Circuito eléctrico que ilustra el efecto Seebeck (Zepeda, 2004)

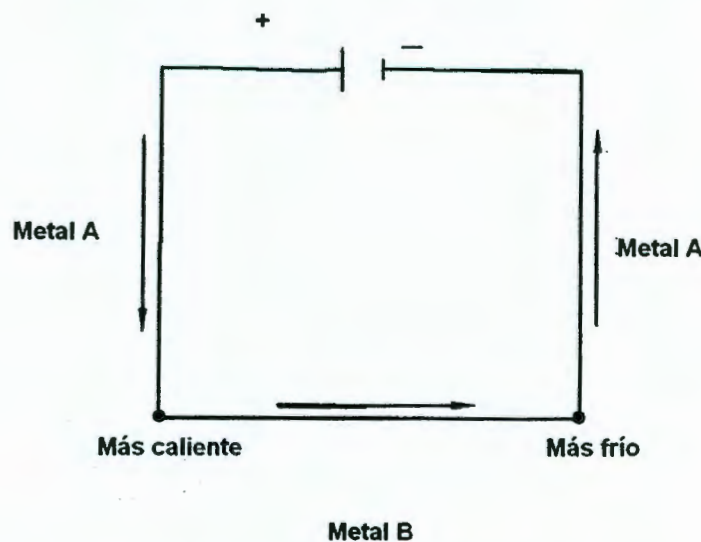


Figura 2.31 Circuito eléctrico que ilustra el efecto Peltier (Zepeda, 2004)

# CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se tratará de correlacionar la humedad con expansión, el grado de saturación y la succión, para lo cual se procedieron a hacer ensayos de cada parámetro partiendo de la identificación del suelo utilizado.

## **3.1 Extracción de la muestra y caracterización del suelo**

El suelo en estudio para este proyecto, se encuentra localizado en Jurica Querétaro, México. Se realizó un sondeo de pozo a cielo abierto a una profundidad de 1.0 m para tomar una muestra inalterada.

Se procedió a sacar muestras alteradas de suelo a cada 30 y 50 cm de profundidad para realizar un perfil de humedades, llegando a una profundidad de 2.6 m. Se realizaron ensayos de granulometría, peso volumétrico (inmersión de agua), densidad de sólidos y límites de Atterberg.

## **3.2 Grado de saturación y expansión libre**

Para obtener el grado de saturación a diferentes humedades se realizó simultáneamente la prueba de expansión. A continuación se describe la obtención del grado de saturación con el tiempo.

### **3.2.1 Obtención de pesos del consolidómetro**

1. Se pesa la cazuela que ya tiene integrada en su interior una piedra porosa en estado seco y luego se pesa de nuevo la cazuela después de estar saturada durante 24 horas. (ver Fig. 3.1 a y 3.1b).



Figura 3.1.a Peso de cazuela con piedra porosa integrada



Figura 3.1.b Peso de cazuela saturada

2. Se toma medida del diámetro interior de la cazuela y altura (ver Fig. 3.2 y 3.3).



Figura 3.2 Medición del diámetro interno de la cazuela



Figura 3.3 Medición de la altura de la cazuela

3. Se pesan las piedras porosas pero en condiciones que van a estar durante la prueba, esto es, que las piedras porosas se dejaron saturando durante 24 horas y después de este tiempo se procedió a pesarlas. Ver figura 3.4, luego se peso la piedra porosa seca, fig. 3.5





Figura 3.4 Peso de la piedra porosa saturada



Figura 3.5 Peso de la piedra porosa seca

4. Se pesa el cabezal (ver fig. 3.6)



Figura 3.6 Peso del cabezal

5. Los papeles filtro se dejan saturando durante 24 horas, después de haber pasado este tiempo se pesan en estado húmedo (ver figura 3.7), así como también se pesan los papeles filtro secos para luego hacer la comparación de pesos en diferentes estados (ver figura 3.8).



Figura 3.7 Peso de los papeles filtro saturado



Figura 3.8 Peso de los papeles filtro seco

6. Se pesa el anillo sin muestra, así como también se toma medidas de diámetro y altura del anillo (Figuras 3.9)

7. Se pesa el agarrador del anillo junto con los tornillos y se toman medidas de diámetro exterior y altura. Ver figura 3.10.



Figura 3.9 Peso del anillo



Fig. 3.10 Peso del agarrador



8. Se pesa el agarrador del anillo junto con los tornillos y se toman medidas de diámetro exterior y altura. Ver figura 3.10.

9. Se pesa todo el equipo montado sin muestra inalterada (ver Figura 3.11).



Figura 3.11 Cazuela con todos sus accesorios sin muestra de suelo.

### 3.2.2 Labrado de la muestra inalterada en el anillo de consolidación.

1. Se toma la muestra inalterada y se procede a labrar (ver fig. 3.12)
2. Obtención de la muestra inalterada con anillo (fig. 3.13)



Figura 3.12 Momento en el que se empieza a labrar la muestra



Fig. 3.13 Pastilla labrada



### 3.2.3 Montaje de todo el equipo del consolidómetro antes de empezar la prueba.

1. Momento en el que toman todos los accesorios del consolidómetro para empezar la prueba de expansión libre (ver fig. 3.14 a 3.17).

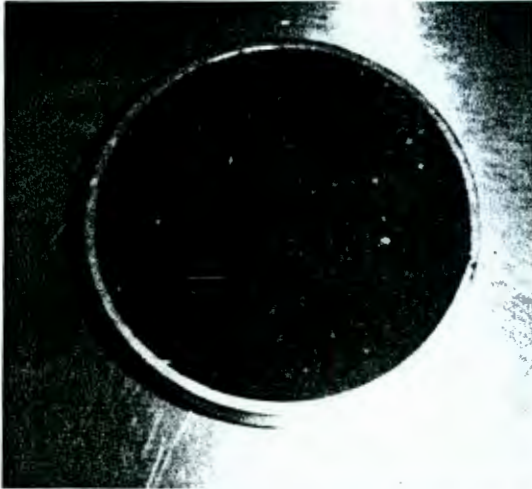


Figura 3.14 Pastilla labrada y enrasada perfectamente

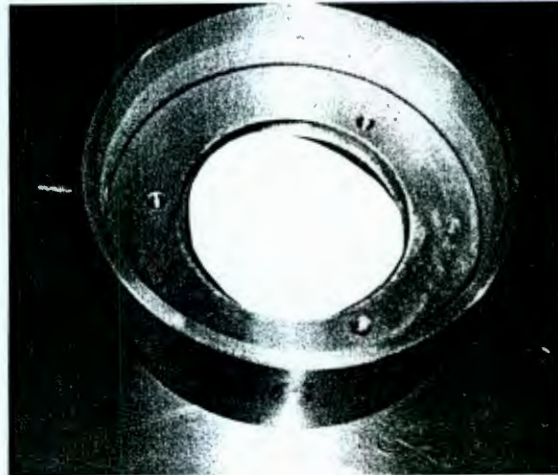


Figura 3.15. Cazuela con piedra porosa y papel filtro



Figura 3.16. Cazuela con piedra porosa interior, papel filtro interior, anillo con muestra de suelo, agarrador y papel filtro exterior.



Figura 3.17. Cazuela ya con todo su equipo armado y sus dos piedras porosas

### 3.2.4 Inicio de la prueba de expansión libre

Una vez puesta la muestra inalterada en el anillo y colocados todos los accesorios de la cazuela, se procede a colocar la cazuela junto con su cabezal al consolidómetro, la cazuela a su vez esta protegida con un papel especial para que durante la prueba la humedad sea homogénea en el material y no se pierda por efecto de temperatura (ver figura 3.18).

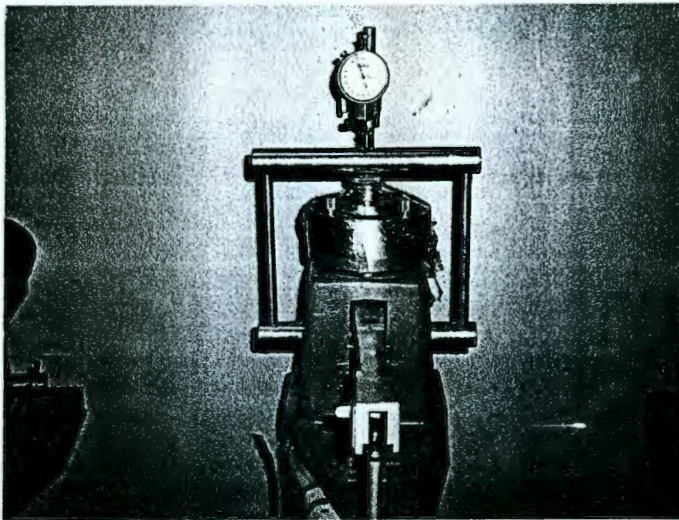


Figura 3.18. Inicio de la prueba de expansión

### 3.2.5 Obtención de pesos para determinar humedades durante la prueba de expansión.

A continuación se explica como se obtuvieron los pesos de la muestra de suelo durante la saturación para poder obtener los grados de saturación. Este procedimiento se llevo a cabo en los tiempos de 4, 8, 12, 24 y 48 horas de haber iniciado el ensaye de expansión.



1. Cada tiempo indicado se desmonta la cazuela (ver figura 3.19).



Figura 3.19. Desmonte de la cazuela

2. Después de desmontar la cazuela se procede a decantar el agua que hay dentro de la cazuela sin perder material (ver figura 3.20).



Figura 3.20 Retiro del agua que tiene la cazuela



3. Ya que la cazuela no tenga agua, se procede a pesar la cazuela con el material (ver figura 3.21).



Figura 3.21. Peso de la cazuela durante la prueba

4. Después de haber pesado la cazuela, esta se coloca de nuevo en el Consolidómetro con la lectura que tenía en el momento que se desmontó la cazuela (ver figura 3.22).



Figura 3.22 Lectura a la que estaba antes de quitar la cazuela del Consolidómetro.

5. Finalmente se vuelve a colocar agua a la cazuela para que siga la expansión en el suelo (ver figura 3.23). Todo este procedimiento se repite en los tiempos indicados

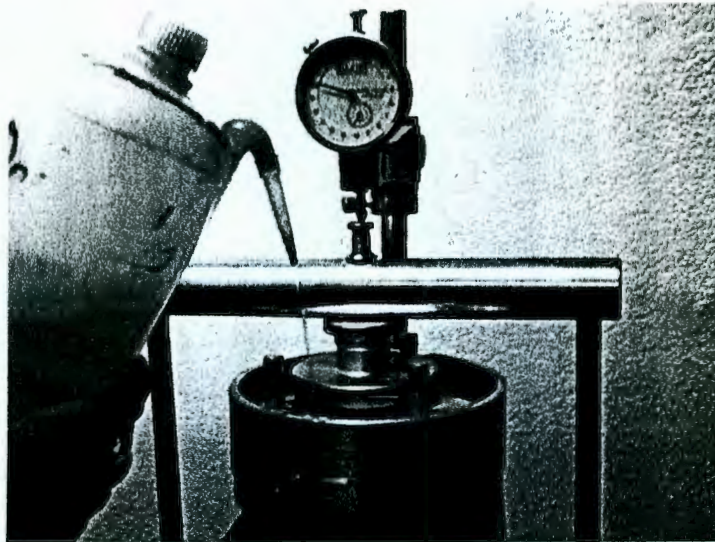


Figura 3.23 Saturación de nuevo a la muestra para seguir el ensaye

### 3.3 Succión.

La prueba de succión se realizó con papel filtro de acuerdo a la norma ASTM D5298-94, se hizo lo siguiente:

#### 3.3.1 Equipo necesario:

1. Papel filtro: El papel usado debe estar libre de cenizas y ser tipo II, por ejemplo, Whatman No. 42, Fisherbrand 9-790<sup>a9</sup> Scheleicher and Schuell No. 589, White Ribbon<sup>9</sup>. Un diámetro adecuado será de 5.5 cm (2.2 in). Para este trabajo se utilizó el papel filtro de marca White Ribbon, como se muestra en la figura 3.24 y 3.25.





Figura 3.24 Papel filtro White Ribbon

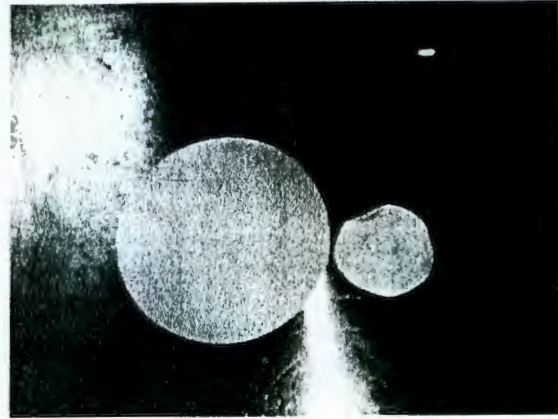


Fig. 3.25 Diámetro de 5.5 cm (2 in) para ensaye de succión

Contenedor de especímenes: de 120 a 240 ml (4 a 8 oz) de capacidad, contenedor y tapa de metal o cristal (por ejemplo, cubiertas con cromato de zinc para retardar la oxidación) para contener el espécimen y el papel filtro. El interior de estos contenedores puede estar cubierto con una capa de cera para retardar la oxidación. Para esta investigación se utilizaron dos tipos de contenedores como se muestra en la figura 3.26 y 3.27, así como en la figura 3.28 se muestra la capa de cera.



Figura 3.26 Contenedor de cristal con capacidad de 274 ml.

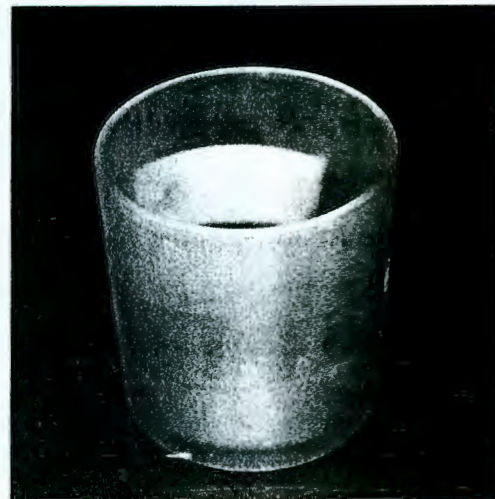


Figura 3.27 Contenedor de cristal con capacidad de 179 ml.





Figura 3.28 Papel de cera, marca PARAFILM

En la figura 3.26 y 3.27 se muestran dos diferentes tipos de contenedores la cual el contenedor de la figura 3.26 tiene como desventajas: la capacidad del contenedor, esta es de 274 ml, por lo cual, no cumple con la norma anteriormente mencionada para realizar los ensayos de succión, pero como ventajas tenemos que la primera es que el papel de cera o parafina se adhiere perfectamente al contenedor, como segunda ventaja estos contenedores tienen tapa de metal y finalmente como tercer ventaja la muestra de suelo a la que se le va a determinar la succión puede labrarse en pedazos como la norma lo requiere. El contenedor de la figura 3.27 tiene como primer desventaja que el papel de cera no se adhiere perfectamente al contenedor por lo que hay escape de humedad y ocurre la oxidación, la segunda desventaja es que se requiere de un mínimo de muestra de suelo de 200 gramos pero con este contenedor no se puede cumplir ya que como máximo se coloca 145 gramos.

2. Contenedor de papel filtro: este contenedor mantiene al papel filtro después del equilibrio de succión y después de que se remueve del contenedor de especímenes.
3. Contenedor de metal, alternativo: dos contenedores de metal (acero o aluminio) con una capacidad nominal de 70 ml (2 oz) con tapas para secar el papel filtro. Los contenedores deberán estar numerados con un estampado sobre el metal, nunca deberán numerarse con algún tipo de etiquetador. Además todo el tiempo deberán manipularse con guantes de cirujano para prevenir que el polvo o la grasa corporal influyan en la determinación de la masa del papel filtro. Ver figura 3.29

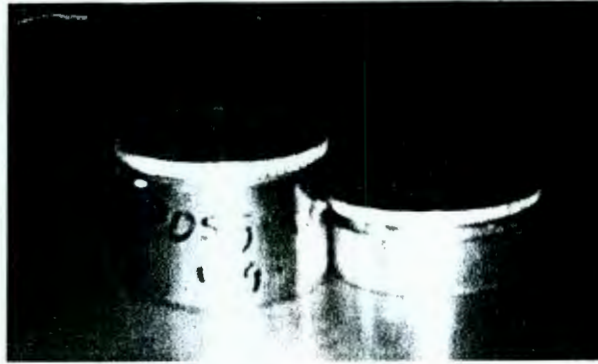


Figura 3.29 Contenedores de metal.

En la figura 3.25 se muestran dos contenedores del mismo material, pero de diferentes dimensiones. El contenedor de lado izquierdo tiene una capacidad de 72 ml y el contenedor de lado derecho tiene una capacidad de 40 ml, por lo que ninguno de los dos cumple con la norma. Cabe mencionar que solo existen 5 contenedores de 40 ml de capacidad y 1 contenedor de 70 ml de capacidad.

4. Caja de aislamiento: una caja de aislamiento de aproximadamente  $0.03 \text{ m}^3$  ( $1 \text{ ft}^3$ ) de capacidad aislada con espuma de poliestireno u otro material capaz de mantener una temperatura de  $\pm 1^\circ\text{C}$  cuando la temperatura externa varíe en  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Ver figura 3.30



Figura 3.30 Caja de aislamiento

5. Balanza: Una balanza que tenga una capacidad mínima de 20 g y que cumpla con los requerimientos con una aproximación de 0.0001 g de lectura (ver figura 3.31)





Figura 3.31 Balanza sensitiva de aproximación de 0.0001 gr.

Horno de secado: controlado termostáticamente, preferentemente de tipo forzado, y capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  en toda la cámara de secado. Ver figura 3.32

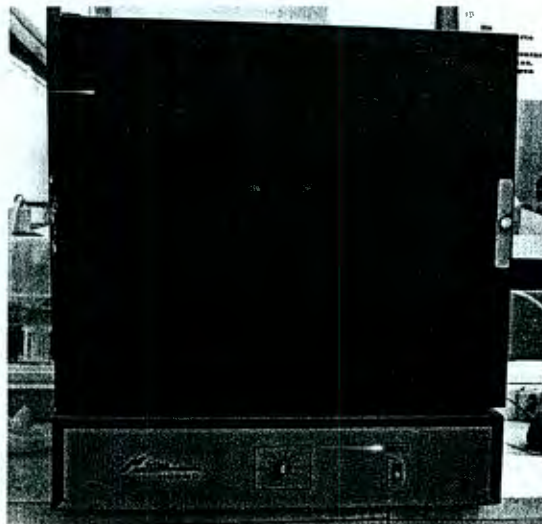


Figura 3.32 Horno de secado termostatico



6. Equipo diverso: Cinta de aislar, O-rings, pinzas de 110 mm (4.5 in). Ver figura 3.33.

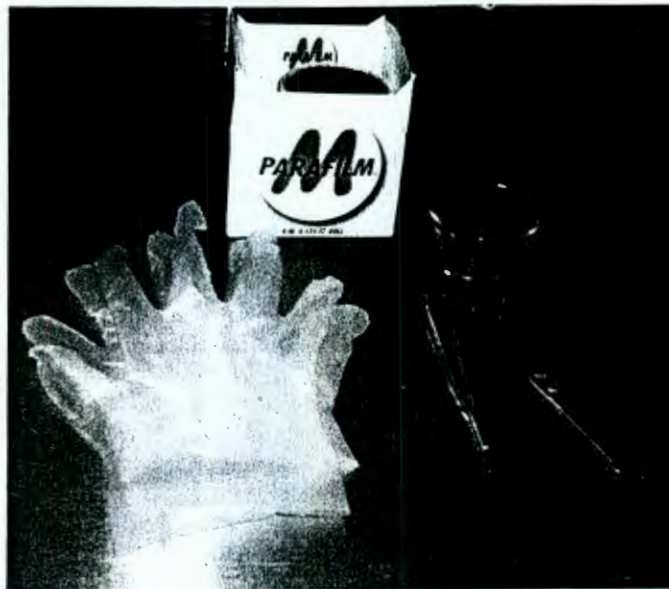


Figura 3.33 Equipo diverso: Guantes de cirujano, O-rings, pinzas, tijeras y papel de cera o parafina

### 3.3.2 Procedimiento de prueba

1. El papel filtro puede ser tratado colocando cada uno de ellos en una concentración con 2% de formaldehído antes de su uso para prevenir la descomposición biológica por el ataque de microorganismos. La descomposición biológica puede significar que el papel filtro esté sujeto a humedad o calentamiento ambiental por mas de 14 días. Se deben tomar las precauciones necesarias para cuando se prepare la solución con formaldehído y se trate el papel filtro.
2. Preparación del papel filtro. Se seca el papel filtro seleccionado para un ensayo al menos 16 horas en un horno de secado por la noche (ver figura 3.30). Luego se coloca el papel filtro en un desecador, después del secado para almacenarlo antes de usarlo (ver figura 3.34).



Figura 3.34 Secado del papel filtro en el horno termostático

3. **Determinación de la succión.** La succión total se medirá si el papel filtro no esta en contacto con el espécimen del suelo; la transferencia de la humedad se limitará a la transferencia de vapor a través del aire dentro del contenedor de especimenes
4. **Colocación del papel filtro.** Se colocó un espécimen de suelo intacto o fragmentos de una muestra de suelo, de 200 a 400 gramos, en el contenedor de los especimenes. El espécimen del suelo debe casi llenar el contenedor para reducir el tiempo de equilibrio y minimizar los cambios de succión en el espécimen. (ver figura 3.35)



Figura 3.35 Especimen del suelo en el contenedor de cristal

5. Para esta investigación se trabajó a diferentes humedades, partiendo de una humedad natural inicial, hasta llegar a la saturación del material; esto se realizó inyectándole agua al suelo como se muestra en la figura 3.36, esto con la finalidad de determinar la succión total de los especímenes a diferentes humedades.



Figura 3.36 Colocación de agua para determinar succión a diferentes humedades

6. Determinación de la succión total. Se removieron los dos papeles filtro apilados en contacto con el espécimen de suelo, luego se aislaron del suelo insertando O-rings o cualquier otro elemento inerte con una superficie mínima entre el papel filtro y el suelo (ver figura 3.37 y 3.38). El papel filtro debe ser doblado en las orillas hacia arriba para apresurar la remoción del papel filtro de este contenedor grande con pinzas. Ver figura 3.39



Figura 3.37 Colocación de O-rings



Figura 3.38 Colocación del primer papel filtro.



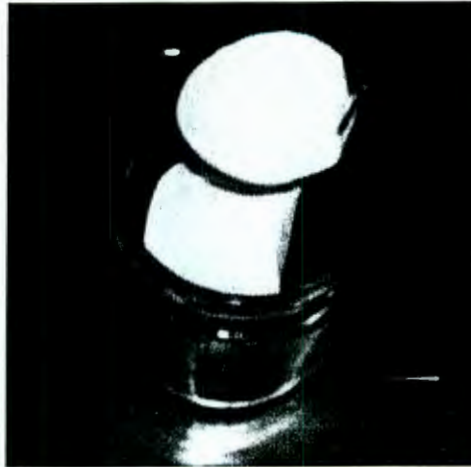


Figura 3.39 Colocación del segundo papel filtro

7. Equilibrio de la succión. Se coloca la tapa del contenedor de los especímenes y se sella con cinta plástica (cera). Después se coloca el contenedor sellado en una caja de aislamiento y se coloca esta en un lugar donde la variación de temperatura sea menor a  $3^{\circ}\text{C}$ . Una temperatura nominal típica es de  $20^{\circ}\text{C}$ . La succión en el papel filtro y el espécimen en el contenedor debe llevarse a su equilibrio en un mínimo de 7 días. Ver figuras 3.40, 3.41 y 3.42.



Figura 3.40 Sellado del contenedor con papel de cera



Figura 3.41 Colocación de la tapa de metal al contenedor del espécimen



Figura 3.42. Colocación del contenedor en una hielera.

8. El equilibrio de la succión entre el suelo, el papel filtro y el aire en el contenedor sellado es el resultado de un periodo de equilibrio. Este periodo es llamado proceso de equilibrio y depende de la succión inicial del suelo, humedad relativa inicial del aire, la masa del suelo y el espacio del contenedor. Un periodo de 7 días es suficiente para los fenómenos relacionados a la mecánica de suelos; sin embargo bajo ciertas condiciones, se puede llegar a un equilibrio rápido. En esta medición de succión debe evitarse la condensación por lo que puede ser necesario un control termostático. El control de la temperatura de la muestra durante el equilibrio asegura la minimización de los efectos de condensación. Almacene el contenedor de los especímenes con el espécimen de suelo y el papel filtro dentro de una caja termostática (por ejemplo, una hielera –ver figura 3.43-) hecha de poliestireno con una envoltura de vermiculita expandida o un material similar alrededor de la caja para minimizar las fluctuaciones térmicas. Esto hace posible limitar las fluctuaciones térmicas a  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$  con este sistema de aislamiento.





Figura 3.43 Caja termostática (hielera)

9. Predeterminación de la masa del contenedor del papel filtro. Al final del periodo de equilibrio, coloque cada uno de los dos papeles filtro en forma separada. La masa es determinada con una aproximación de 0.0001 g, designándola como  $T_c$  (Tara fría), posteriormente el contenedor de especímenes se retira de la caja de aislamiento. Se sugiere que la masa del contenedor de papel filtro sea pesado inmediatamente antes de la determinación de la masa total del papel filtro y el contenedor de papel filtro. (ver figura 3.44)



Figura 3.44 Pesos del contenedor del papel filtro en frío " $T_c$ "

10. Se transfieren de los papeles filtro. Utilizando un par de pinzas, se transfiera cada papel filtro del contenedor metálico o a la bolsa de plástico de masa conocida ( $T_c$ ). Todo este procedimiento debe completarse en un tiempo de 3 a 5 seg. La clave para



determinaciones exitosas del contenido de agua del papel filtro es minimizar la pérdida de agua durante la transferencia del papel filtro al contenedor de especímenes y durante la determinación de la masa antes de secarla al horno. Deben tomarse precauciones si se tiene una pérdida del 5% o más de la masa debida a la evaporación durante los 5 o 10 seg. de exposición del papel filtro al ambiente con una humedad relativa,  $R_h$ , de 30 a 50%. Ver figuras 3.45 y 3.46



Figura 3.45 Retirar papel de cera del espécimen después de los 7 días, tiempo que alcanza el equilibrio.

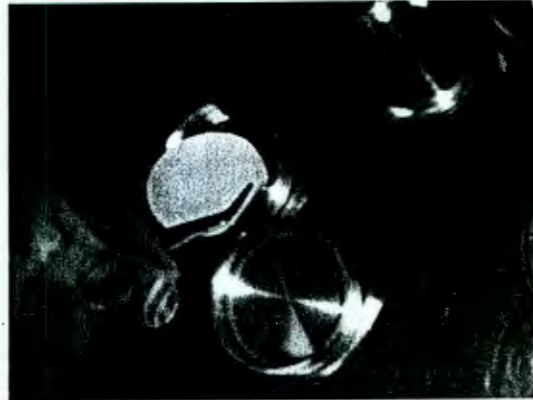


Figura 3.46 Colocación del papel filtro en el contenedor.

11. Se coloca las dos tapas sobre el contenedor metálico ya con el papel filtro del espécimen y se sella rápidamente después de cada transferencia (ver figura 3.47)



Figura 3.47 Sello del contenedor metálico

12. Determinación de la masa del papel filtro y del contenedor de papel filtro. Inmediatamente se determina la masa de cada uno de los contenedores con el papel filtro  $M_1$  con una aproximación de 0.0001 g. (ver figura 3.48)



Figura 3.48 Determinación de la masa del contenedor frío mas papel filtro " $M_1$ "

### 13. Equilibrio de temperatura

Se colocan los contenedores de metal con el papel filtro en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  con las tapas ligeramente selladas o sin sellar para permitir que la humedad escape. Los contenedores deben permanecer en el horno al menos 2 horas (ver figura 3.49). Después de este tiempo se sellan y se mantienen los contenedores en el horno y se dejan reposar por 15 minutos para equilibrar la temperatura (ver figura 3.50). Se remueve el contenedor metálico con el papel filtro del horno y se determina la masa seca total  $M_2$  a 0.0001 g (ver figura 3.51), inmediatamente se remueve y se quita el papel filtro y se toma la masa del contenedor que contenía el papel filtro o la masa caliente  $T_h$  a 0.0001 g (ver figura 3.52), se repite este procedimiento para el resto de los contenedores.



Figura 3.49 Colocación de los contenedores con el papel filtro a el horno



Figura 3.50 Sello de los contenedores para equilibrar temperatura



Figura 3.51 Determinación de la masa del contenedor mas papel filtro caliente " $M_2$ "



Figura 3.52 Determinación de la masa del contenedor de papel filtro en caliente " $T_h$ "

14. Una vez que las masas  $M_2$  y  $T_h$  han sido determinadas, deseche el papel filtro. Bajo ninguna circunstancia el papel filtro debe ser usado de nuevo en el desarrollo de este método de ensayo.



### **3.4 Determinación de humedades a diferente profundidad**

Se realizaron ensayos de humedad de acuerdo a la norma ASTM D2216-92 a las siguientes profundidades: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.4, 1.7, 2, 2.3 y 2.6 metros de profundidad.

### **3.5 Determinación de estudio estadístico básico del procedimiento propuesto del grado de saturación y expansión libre**

Con la finalidad de ver la exactitud del procedimiento propuesto para el estudio del comportamiento del grado de saturación se realizaron cálculos de estadística básica media, desviación estándar, y coeficiente de variación.

# CAPÍTULO IV RESULTADOS

## 4.1 Propiedades del suelo utilizado.

A continuación se observan las propiedades del suelo utilizado; en el anexo se muestra un croquis de localización del lugar de muestreo:

### a) Granulometría

Granulometría	
% GRAVA	0
% ARENA	16
% FINOS	84
$\Sigma =$	100

b) Densidad de sólidos = 2.53

c) Peso volumétrico =  $1.77 \frac{T}{m^3}$

### d) Límites de Atterberg

Límite líquido = 48 %

Límite plástico = 26.5%

Índice plástico = 21%

Nota 1: Para ver mas detalles de las propiedades del suelo mostrados anteriormente ver anexo A

## 4.2 Comportamiento Humedad vs Porcentaje de expansión

En la tabla 4.1 muestra los diferentes ensayos con las humedades iniciales de cada uno de ellos y luego las humedades y expansiones registradas a 4,8 12, 24 y 48 horas en cada uno de ellos.

**Tabla 4.1 Correlación Humedad contra Porcentaje de Expansión**

No. Ensaye	W <sub>i</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>i</sub>	W <sub>4</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>4</sub>	W <sub>8</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>8</sub>	W <sub>12</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>12</sub>	W <sub>24</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>24</sub>	W <sub>48</sub> (%)	(%) E <sub>u</sub> <sub>48</sub>
1	30.43	0.00	30.56	1.20	30.92	1.28	31.20	1.44	33.26	1.55	34.52	1.58
2	30.15	0.00	30.88	3.21	31.15	3.21	31.20	3.28	33.26	3.91	34.52	4.19
3	29.15	0.00	29.51	24.60	29.54	25.00	30.65	26.20	31.71	28.07	32.39	28.61
4	29.54	0.00	29.63	8.88	30.45	9.52	31.13	10.56	32.47	11.50	32.88	12.03
5	28.96	0.00	29.35	12.57	30.91	13.10	31.39	13.77	34.12	14.17	34.88	14.44
6	27.15	0.00	31.52	9.40	31.96	9.90	32.10	10.20	34.26	10.70	34.61	11.00
7	30.43	0.00	30.87	13.68	31.05	13.93	31.16	13.96	34.49	13.98	34.52	13.99
8	21.90	0.00	29.30	6.56	31.45	6.59	34.12	6.64	34.65	6.67	36.80	6.68
9	21.90	0.00	26.55	12.62	30.49	12.97	32.72	13.07	32.98	13.15	35.58	13.40
10	21.90	0.00	28.42	39.84	31.86	41.44	31.89	41.98	33.97	43.05	35.43	44.25
11	28.70	0.00	32.89	20.03	33.56	20.29	33.78	20.37	33.97	23.13	35.69	23.56
12	28.70	0.00	32.56	46.20	33.83	46.31	34.81	46.50	35.49	46.76	36.53	46.87
13	19.50	0.00	28.52	23.50	34.16	23.82	35.64	23.90	36.20	24.01	37.90	24.12
14	19.50	0.00	27.65	21.76	33.21	22.08	33.54	22.25	35.96	22.38	37.20	22.51
15	16.80	0.00	22.60	49.94	28.96	50.21	32.15	50.37	33.27	50.85	35.77	51.98
16	16.80	0.00	19.10	32.70	25.66	33.21	30.74	33.37	34.36	33.82	35.21	37.32
17	14.90	0.00	28.36	53.15	32.52	53.69	33.25	54.25	33.87	58.77	34.66	59.65
18	16.90	0.00	31.98	46.87	33.41	47.03	33.87	47.19	33.87	47.19	34.01	47.32
19	14.52	0.00	33.65	65.24	34.12	65.45	34.23	65.45	34.23	65.61	34.57	65.77
20	23.15	0.00	32.86	23.26	35.63	23.82	36.01	24.01	36.66	24.06	36.7	24.62
21	24.87	0.00	33.95	18.42	34.15	18.77	34.41	18.96	34.52	19.20	34.67	19.57
22	18.16	0.00	34.39	75.37	34.45	75.42	34.52	75.48	34.63	75.56	34.74	75.67
23	18.53	0.00	33.99	68.31	34.29	69.25	34.81	70.26	34.93	70.48	35.03	70.59
24	24.35	0.00	32.86	20.64	33.41	21.42	33.67	22.03	33.88	22.19	34.27	22.73
25	15.87	0.00	33.12	79.30	33.21	79.57	33.54	79.73	33.76	79.94	33.92	80.80
26	17.61	0.00	32.91	40.37	33.15	40.64	33.42	40.96	33.57	41.76	33.72	42.03
27	20.68	0.00	34.45	27.06	34.45	27.49	34.72	27.54	34.81	27.62	34.88	27.83
28	20.12	0.00	33.92	17.89	34.67	18.31	34.79	18.58	34.84	18.66	34.97	18.88
29	21.30	0.00	32.93	25.13	33.11	25.40	33.32	25.93	34.10	28.07	34.30	28.50
30	16.52	0.00	34.95	75.37	35.02	75.42	35.08	75.50	35.14	75.54	35.26	75.67

Donde:

W<sub>i</sub> = Humedad inicial en porcentaje

W<sub>4</sub> = Porcentaje de humedad en el tiempo de 4 horas de haber transcurrido la prueba.

W<sub>8</sub> = Porcentaje de humedad en el tiempo de 8 horas de haber transcurrido la prueba.

W<sub>12</sub> = Porcentaje de humedad en el tiempo de 12 horas de haber transcurrido la prueba.

W<sub>24</sub> = Porcentaje de humedad en el tiempo de 24 horas de haber transcurrido la prueba.

W<sub>48</sub> = Porcentaje de humedad en el tiempo de 48 horas de haber transcurrido la prueba.

E<sub>u</sub><sub>i</sub> = Porcentaje de expansión inicial.

E<sub>u</sub><sub>4</sub> = Porcentaje de expansión en el tiempo de 4 horas.

E<sub>u</sub><sub>8</sub> = Porcentaje de expansión en el tiempo de 8 horas.

E<sub>u</sub><sub>12</sub> = Porcentaje de expansión en el tiempo de 12 horas.

E<sub>u</sub><sub>24</sub> = Porcentaje de expansión en el tiempo de 24 horas.

E<sub>u</sub><sub>48</sub> = Porcentaje de expansión en el tiempo de 48 horas.



En la figura 4.1 se muestra el comportamiento del suelo de los treinta ensayos realizados de Humedad vs Porcentaje de Expansión.

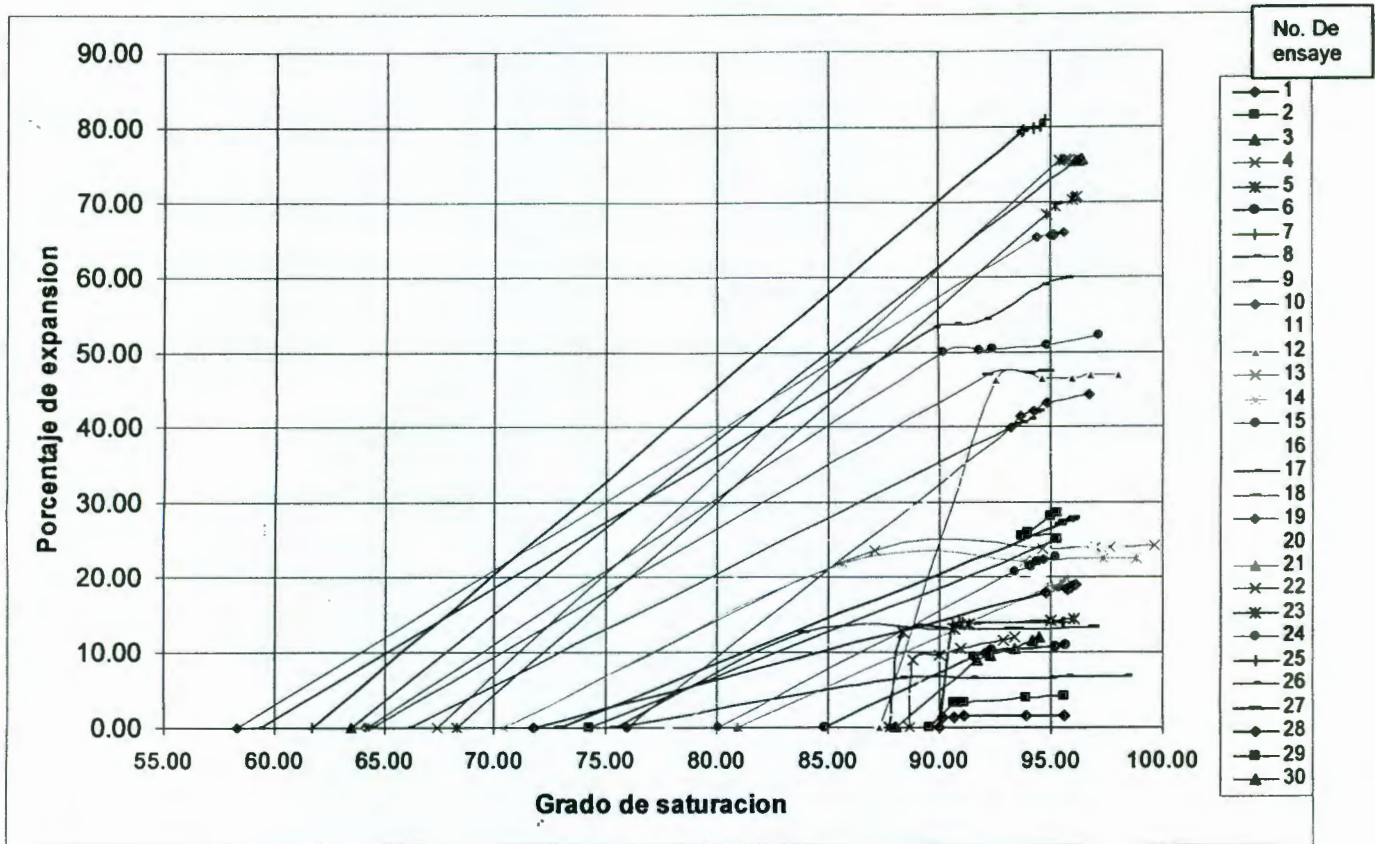


Figura 4.1 Comportamiento Humedad vs Porcentaje de expansión

De la figura 4.1 se observa que el comportamiento humedad vs porcentaje de expansión presenta un comportamiento aproximado curvo y paralelo en las diferentes humedades de inicio

### 4.3 Comportamiento humedad vs grado de saturación.

A continuación se muestra en la figura 4.2 el comportamiento del suelo en estudio de Humedad vs Grado de saturación. Dicho comportamiento pareciera ser casi lineal ya que presenta una curvatura ligera. En la tabla A del Anexo en donde se sustenta la figura 4.2.

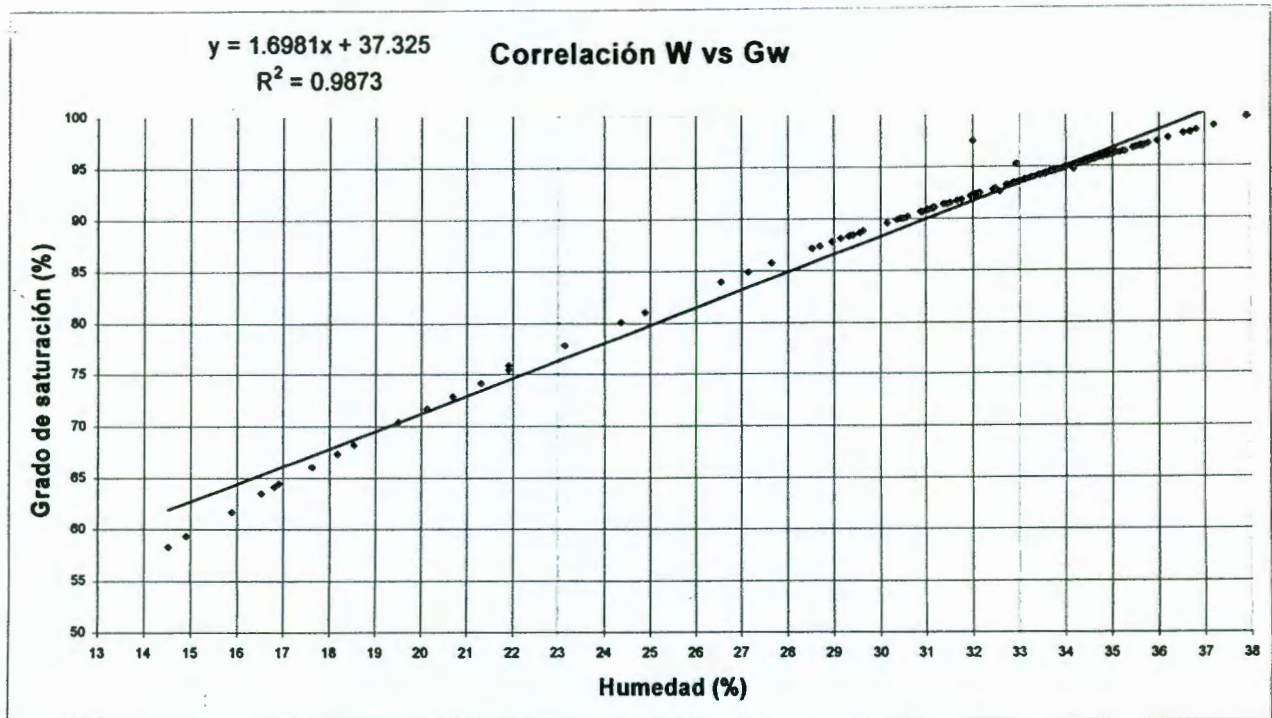


Figura 4.2 Correlación de Humedad contra Grado de saturación.

#### 4.4 Succión

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento obtenido con los ensayos realizados de succión.

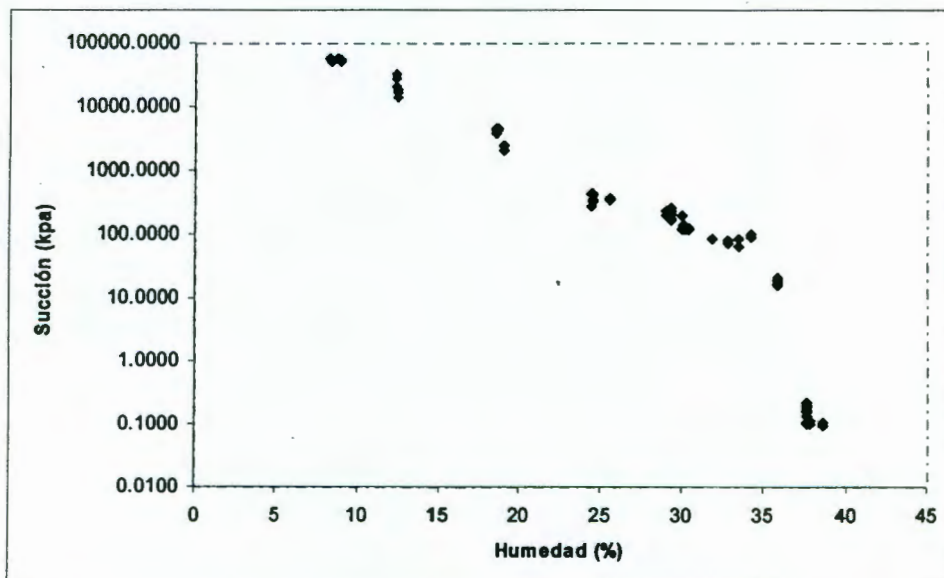


Figura 4.3. Curva característica obtenida humedeciendo gradualmente

La figura 4.3 muestra que el comportamiento Humedad vs Succión obedece a una curva característica.

#### 4.5 Perfil de humedades de Jurica, Querétaro México

En la figura 4.4 se muestra un perfil de humedades realizado en Jurica Querétaro (Torres, 2003)

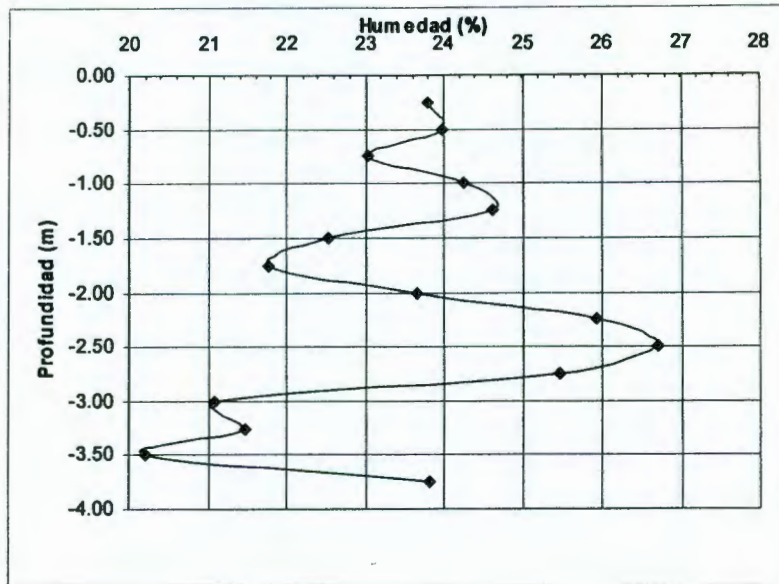


Figura 4.4 Perfil de humedades en Jurica (Junio 2003)

En la tabla 4.2 se muestra a las profundidades en las cuales se tomo muestra de humedad para determinar el perfil de humedades.

**Tabla 4.2** Tabla de humedades tomadas hasta 2.6 m de profundidad

Profundidad	#FLANERA	WR	Wr+sh	Wr+ss	w(%)
0.2	el2	127.28	236	211.74	28.7
0.4	76	125.91	255.8	228.45	26.7
0.6	det.1	127.91	235.26	209.8	31.1
0.8	el3	115.97	219.24	192.61	34.7
1.2	17a	116.94	218.62	196.27	28.2
1.4	a	120.48	259.82	231.31	25.7
1.7	341	120.33	246.65	216.94	30.8
2	ely	117.97	232.84	203.88	33.7
2.3	v	126.02	268.54	236.1	29.5
2.6	24	127.67	272.86	239.58	29.7



En la figura 4.5 se muestra un perfil de humedades hecho en Jurica Querétaro en Agosto 2004

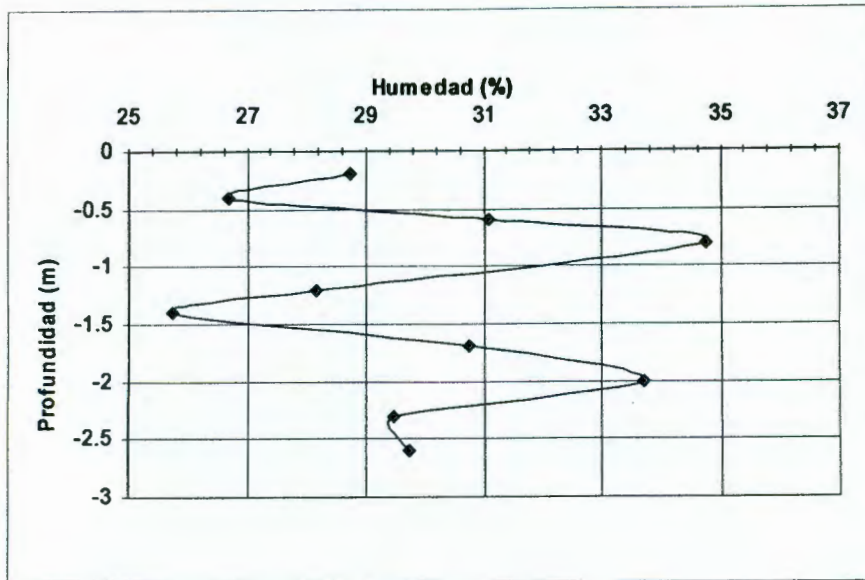


Figura 4.5 Perfil de humedades en Jurica (Agosto 2004)

De las figuras 4.4 y 4.5 se observan que ambos perfiles variaron en los diferentes años, lo que indica que la capa activa puede estar cambiando cada año. A continuación se muestran las figuras 4.5 y 4.6 de capa activa reportados en 1990 y 1994 respectivamente (Pérez Rea, 1993 y López Lara, 1995).

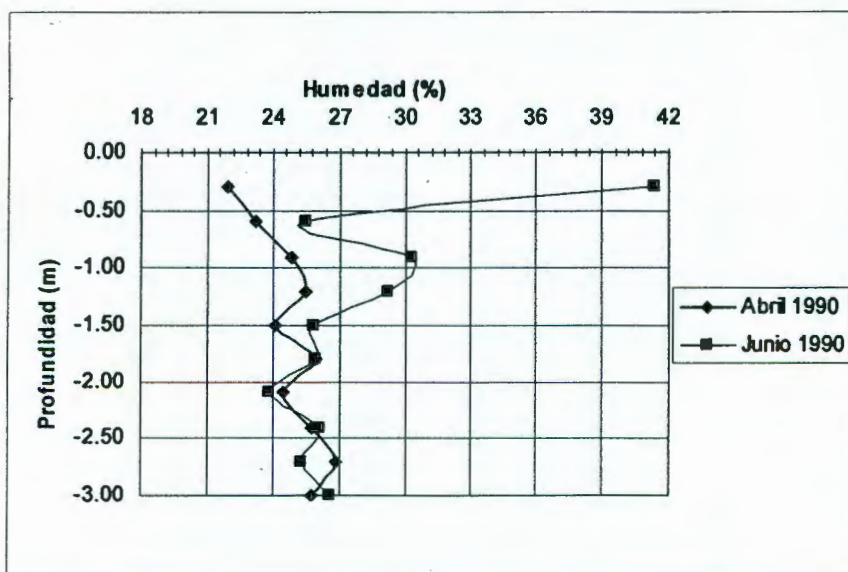


Figura 4.6 Perfil de humedades registrado en Abril 1990 y Junio 1990 (Pérez Rea 1993)

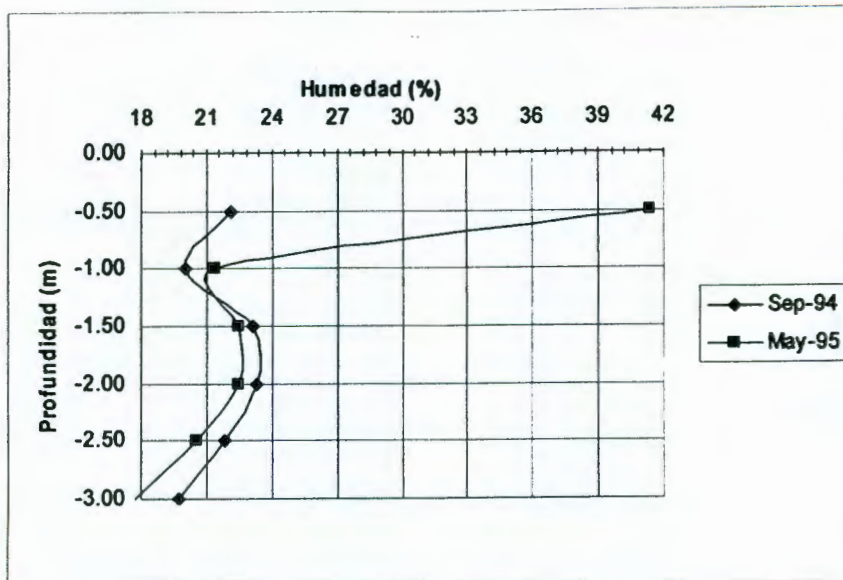


Figura 4.7 Perfil de humedades registrado en Septiembre 1994 y Mayo 1995 (López Lara, 1995)

De las figuras 4.6 y 4.7 se reporta que la capa activa esta a 2.5 y m respectivamente. De las figuras 4.4 y 4.5 se observa que los cambios de humedad prevalecen en más de 3.0 m. Se piensa que la capa activa esta en función de los efectos estacionales.

#### 4.6 Estudio básico estadístico del procedimiento Grado de saturación vs Porcentaje de Expansión.

Es importante destacar que en este procedimiento propuesto se observó que en la muestra de suelo presentaba mas expansión en zonas lateras que en el centro, se piensa que esto es debido a que es mas fácil que el agua entre por estas zonas que por el centro.

Se realizaron cálculos de desviación estándar, media y coeficiente de variación a diferentes tiempos, a los datos que se tomaron como muestra son de humedad. En el Anexo se recuerdan las definiciones de Media, Desviación estándar y Coeficiente de variación.

**Tabla 4.3 Cálculos de media y desviación estándar**

<b>Cálculos estadísticos Humedad</b>			
Tiempo	Media	Desviación E.	Coef. de Variación
4 hrs.	31.77	6.27	19.73
8 hrs.	32.88	6.28	19.11
12 hrs.	33.40	6.36	19.04
24 hrs.	34.30	6.44	18.77
48 hrs.	35.05	6.60	18.84

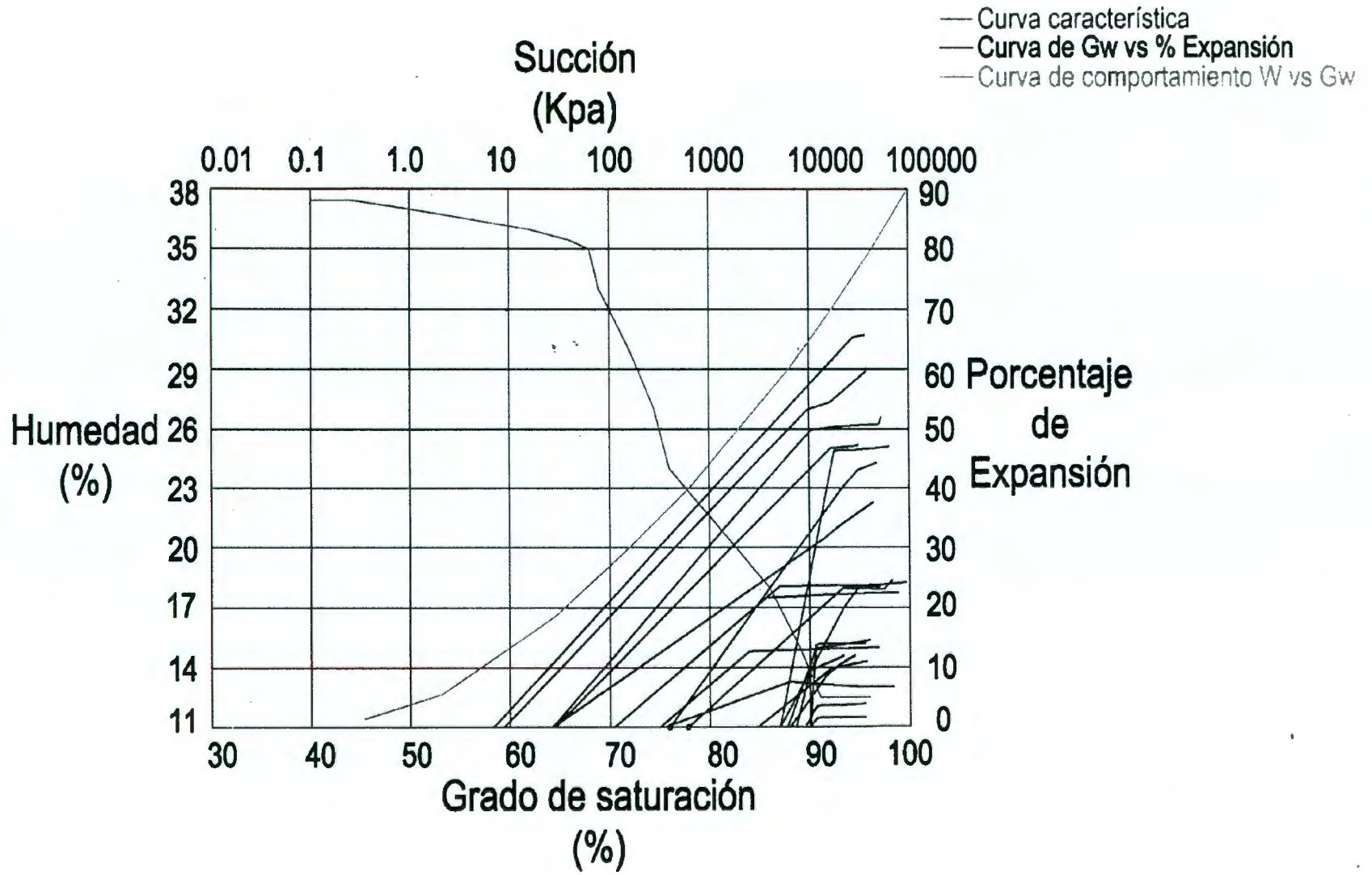
Como podemos apreciar tenemos valores de  $\pm 6.27$  de desviación estándar con un coeficiente de variación del 19.73% por lo que podemos inferir que este método propuesto es aceptable tomando en cuenta que las condiciones iniciales de cada muestra que se ensayo no son las mismas.

#### **4.7 Nomograma**

Con el objetivo de realizar una correlación de Humedad, Grado de saturación, succión y porcentaje de expansión se formó un nomograma en el cual teniendo cualquiera de los cuatro variables anteriormente mencionadas se pueden deducir las otras tres restantes (ver figura 4.8). A continuación se explican varios ejemplos para utilizar el nomograma. En la parte de anexos se encuentra una tabla de equivalencias para el cambio de unidades respectivas.



Figura 4.8 Nomograma



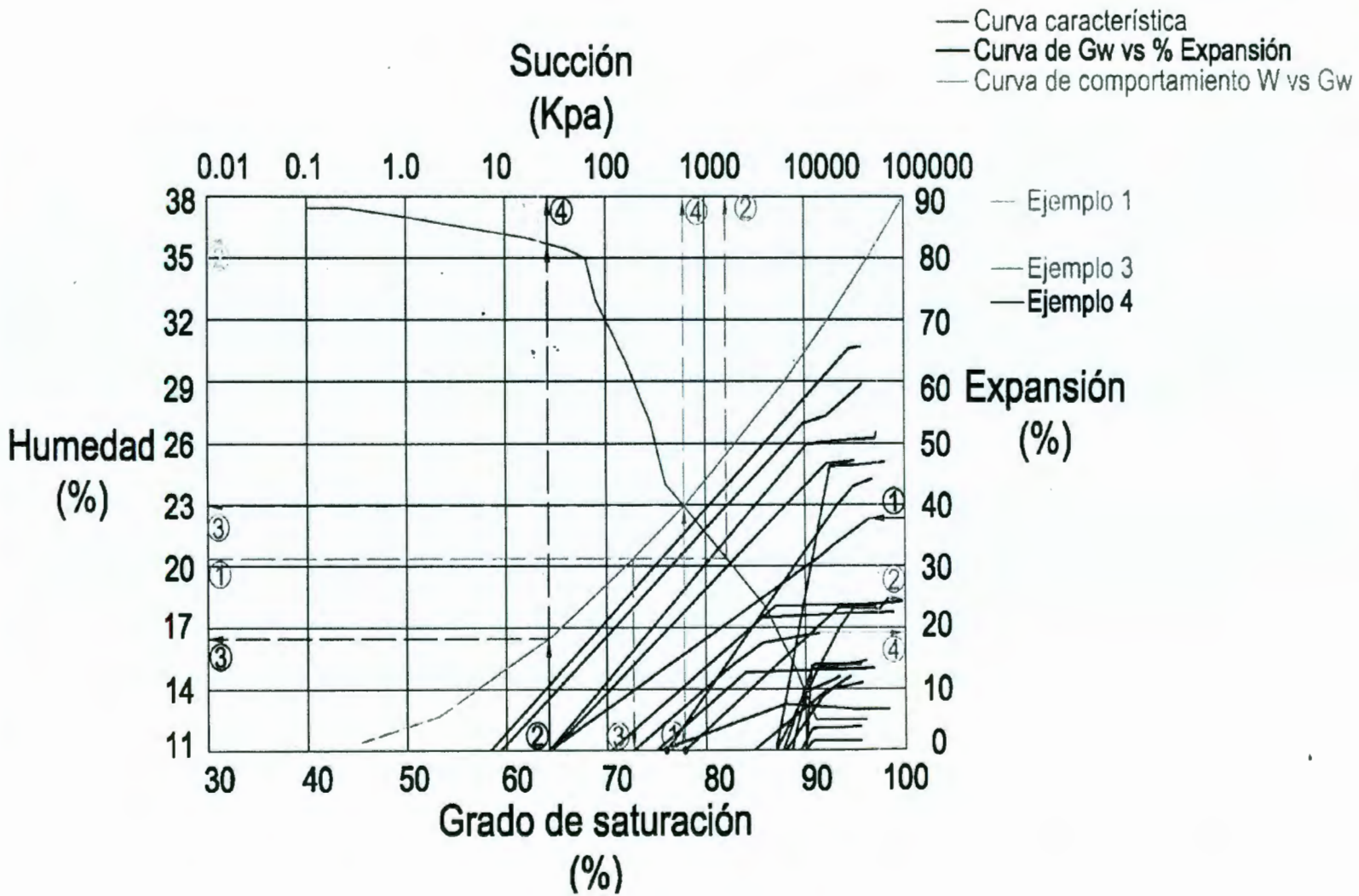


Figura 4.9 Ejemplos de utilización del nomograma

## Ejemplo 1:

Paso 1: tenemos como variable conocida la humedad, que es del 20.5 % aproximadamente. Paso 2: con el valor de humedad del 20.5% interceptamos la curva característica y obtenemos la succión de 2000 kpa aproximada que tiene el suelo en ese momento. Paso 3: con el valor de 20.5 % de humedad interceptamos la curva del comportamiento  $W$  vs  $G_w$  y así obtenemos 73 % de grado de saturación que tiene el suelo expansivo en ese instante. Paso 4: con el valor obtenido de grado de saturación en el paso 2 se toma la curva  $G_w$  vs Porcentaje de expansión que coincida con este y será el máximo porcentaje de expansión probable que tendrá el suelo (en este caso es del 19%) hasta su saturación.

## Ejemplo 2:

Paso 1: tenemos como variable conocida la succión que es 20 Kpa. Paso 2: con el valor de succión de 20 kpa interceptamos la curva característica, para obtener la humedad que tiene en ese momento que es del 36%. Paso 3: con el valor de succión interceptamos la curva de Humedad vs Grado de saturación y así obtenemos el  $G_w$  en ese momento (98%). Paso 4: con el valor de grado de saturación vemos que 98% coincide con alguna curva de porcentaje de expansión vs  $G_w$ , en este caso no coincide ninguna ya que podemos decir que esta completamente saturado y que si sometemos a este suelo a mas condiciones de humedad este ya no presentara expansión.

## Ejemplo 3:

Paso 1: como variable conocida tenemos el grado de saturación 78%. Paso 2: en la curva que coincida de  $G_w$  vs Porcentaje de expansión será la expansión máxima probable que tendrá este suelo (25%) en condiciones de máxima saturación. Paso 3: con un  $G_w$  del 78% interceptamos la curva  $W$  vs  $G_w$  y obtenemos la humedad que tiene en ese instante el suelo (22.8%). Paso 4: con el valor de  $G_w = 78%$  interceptamos la curva característica y así obtenemos la succión (700 kpa).



Ejemplo 4:

Paso 1: conocemos el porcentaje de expansión probable (37%). Paso 2: seguimos la curva del comportamiento  $G_w$  vs Porcentaje de expansión para obtener  $G_w = 64\%$ . Paso 3: con un  $G_w = 64\%$  interceptamos la curva Humedad vs Grado de saturación obtenido una humedad = 16.5 % aproximadamente que tiene el suelo en ese momento. Paso 4: con un  $G_w = 64\%$  interceptamos la curva característica y tenemos la succión = 30 kpa que posee en ese instante

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El comportamiento de la grado de saturación vs porcentaje de expansión es no lineal y depende de la humedad inicial. La mayoría de las trayectorias son paralelas entre sí, de tal forma que la correlación de la expansión final del suelo puede realizarse partiendo del grado de saturación que se encuentre el suelo siguiendo el comportamiento de forma paralela.

La relación  $W$  vs  $G_w$  muestra una trayectoria casi lineal para efectos prácticos. Por lo tanto una de las hipótesis planteadas en este trabajo se cumple.

La expansión desarrollada en el suelo sin y bajo una construcción esta alrededor del 25 al 30%, por lo que podemos estar sobrediseñando ya que en el laboratorio se satura el suelo y se llega a su máxima expansión, pero en la naturaleza en la mayoría de los casos el suelo no se satura. Por lo tanto la primera hipótesis planteada en este trabajo se cumple

El comportamiento Grado de saturación contra Porcentaje de expansión vemos que son curvas y que la trayectoria de este depende de la humedad inicial que tenga el suelo.

De los datos mostrados en los perfiles de suelo (fig. 4.4 y 4.5) se observa que la capa activa esta variando con los cambios estacionales que van ocurriendo con el paso del tiempo, pareciera que aumenta con la profundidad, pero se piensa que esta, tuvo influencia debido a la precipitación presentada en el año 2003. Además con las variaciones de humedad registradas en los perfiles se infiere que los suelos se expanden durante el año del 25 al 30%.

En el año 2003 es trascendental mencionar que se registró una precipitación media anual del doble de la anual, registrada en la ciudad de Querétaro, Querétaro México por lo que esto influencio en la profundidad de la capa activa.



Es importante mencionar que se cree que la profundidad de la capa activa ya es más de los 3.0 m de profundidad, lo cual, desde el punto de vista de cimentaciones es preocupante, porque aumenta el costo de estas. El aumento de la capa activa pudiera favorecer los mantos acuíferos siempre y cuando estos estuvieran a poca profundidad de la superficie,

Con los datos de estadística aplicados en el procedimiento propuesto vemos que tenemos un coeficiente de variación del 20 % aproximadamente para los casos que se muestran, por lo que se observa que se tiene una buena aproximación en el método tomando en cuenta que los suelos no estaban en las mismas condiciones (humedad).

Con el nomograma propuesto como medida indirecta para suelos expansivos del fraccionamiento Jurica, Querétaro México se ve que es una forma sencilla y rápida de determinar los valores de humedad, grado de saturación y succión conociendo alguna de estas tres variables que tiene el suelo en sus condiciones naturales; cuando se someten a pruebas de expansión, con el nomograma se puede predecir aproximadamente el comportamiento y la máxima expansión que pueda tener este suelo.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda que se continúe monitoreando el perfil de humedad – profundidad con el fin de lograr una mejor definición de la capa activa, así como del porcentaje de expansión desarrollado en diferentes épocas del año.

Se recomienda realizar otro estudio que involucre las mismas variables en otro suelo expansivo de otra región para aumentar y fortalecer dichas correlaciones; así como también hacer estudios sobre la correlación de la profundidad de la capa activa con la precipitación anual para ver su influencia en la profundidad. Para este trabajo se recomienda utilizar equipo de consolidómetros mejoras, es decir que cuentes con una válvula, junto con una membrana para permitir la salida de agua que se encuentre saturando a la muestra de suelo y no pierda material.



## REFERENCIAS

- ASTM (2003) D4318-00.- "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity index of Soils", Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Soil and Rock Building Stones. USA
- ASTM (2003) D4546-03. - "Standard Test Methods for one – Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils", Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Soil and Rock Building. USA
- ASTM (1994) D5298.- "Standard Test Method for Measurement of soil Potential (Suction) Using Filter Paper", Annual Book of ASTM Standards, Construction, Volume 04.08, Soil and Rock Building Stones; Geotextiles. USA
- Berry Peter L. –Reid David (1994). "Mecánica de Suelos". Editorial Limusa, México.
- Braja M. Das (2001). "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", cuarta edición, Sacramento, USA.
- Chen Fu Hua (1975). "Foundation on expansive soil". Elsevier Scientific Company, New York, USA.
- Delgado Vargas Manuel (1999). "Principios de ingeniería de cimentaciones, fundamentos e introducción al análisis geotécnico". Colombia.
- Fredlund M.D., Fredlund D. G. & Wilson G. W. (2000). "Estimation of volume change functions for unsaturated soils. Canada
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "AN Overview of Unsaturated Soil Behavior" Unsaturated Soils. Geotechnical Special Publication No. 39 Edited by Sandra L. Houston and Warren K. Wray. ASCE. Canada

- Fletcher Gordon A. (1982). "Estudio de suelos y cimentaciones en la industria de la construcción". Houston Texas. USA
- Interacción suelo-estructura y diseño estructural de cimentaciones, (1991), Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México
- K. A. Jones Foundation Engineering, (2002), "Foundation on expansive soils", University of Iowa, USA.
- Krynine Dimitri. (1996). "Principios de geología y geotecnia para ingenieros". Nueva York, USA.
- Lambe T. William (1981). "Mecánica de Suelos". Editorial Limusa. Massachussets. USA.
- López Lara T., (1996), "Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica", Tesis de Maestría, UAQ, México.
- Nelson John and Millar Debora (1992). "Expansive soil, problems and practice in foundation and pavement engineering". John Wiley & Sons, Inc New York, USA.
- Pérez Rea M. de la Luz (2002), "Curso Introductorio a la Mecánica de Suelos No Saturados", Cimentaciones sobre suelos expansivos, Parte 1, Querétaro, México.
- Pérez Rea M. de la Luz, (1996), "Cimentación sobre suelos expansivos de Jurica", Tesis de Maestría, UAQ, México.
- Pérez Romero J. (2000). "Introducción a la mecánica del suelo parcialmente saturado". Universidad de Granada, España.



- Preciado Cervantes Humberto F. (1998). "Estudio de la influencia de las variables de compactación en las características expansivas de un suelo de Jurica, Querétaro", Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro. México
- Padilla Corona, Enrique (1996). "El tratamiento de los suelos expansivos en las carreteras mexicanas". XII. Reunión nacional de vías terrestres, Morelia Michoacán, México.
- Rico Rodríguez, Del Castillo Hermilo (1980). "La ingeniería de suelos en las vías terrestres", volumen II. Editorial Limusa. México.
- Seed, H.B., (1962). "Prediction of Swelling Potencial for Compacted Clays" Journal, ASCE, Soil Mechanics and Foundation. N.Y. USA.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1991). Interacción suelo- estructura y diseño estructural de cimentaciones, México.
- Trejo Cárdenas Judith (2003), "Reducción optima de los cambios volumétricos del suelo aplicados a la presión de expansión", Querétaro, México.
- Trejo Moedano Ángel (1986) a). "Soluciones constructivas de cimentaciones en suelos expansivos". Curso cimentaciones sobre arcillas expansivas, Querétaro, México.
- Trejo Moedano Ángel (1989). "Los suelos expansivos y su problemática". Academia Mexicana de Ingeniería Alternativas Tecnológicas 29 mesas redondas sobre los suelos expansivos y su problemática. México.
- Trejo Moedano Ángel (1995). "Patología de las cimentaciones sobre suelos expansivos". X. Congreso panamericano de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones. México.



- Vijayvergiya, V.N. y Ghazzaly (1973). "Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays". Proceeding of the 3<sup>rd</sup>. International Conference on Expansive Soils. Haya Israel.
- Wray, W.K., (1984). "The principle of Soils Suction and its Geotechnical Engineering Applications". 5<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils. Adelaide, South Australia.
- Zepeda Garrido, (1989), "Cimentaciones sobre arcillas expansivas", capitulo III. Trabajo de Investigación, UAQ, México.
- Zepeda Garrido, y Lorence R., (1990), "Arcilla expansiva, presión de expansión y comportamiento esfuerzo-deformación en pruebas en el odómetro, UAQ, México.
- Zepeda, G. J. A. y Castañeda A. H. (1992). "Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana", Curso Internacional de Mecánica de Suelos arcillosos, Universidad Autónoma de Querétaro y Universidad de Laval (Canadá) Québec, Querétaro, Qro., UAQ. México.
- Zepeda G., J. A. (2004). "Mecánica de suelos no saturados". Editado por José Alfredo Zepeda Garrido, Editorial Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México.

# ANEXOS

Localización del muestreo Jurica Querétaro México	
Tabla A	94
Tabla de equivalencias	95
Conceptos de estadística aritmética	97
	98

# Croquis de localización del muestreo Jurica, Querétaro

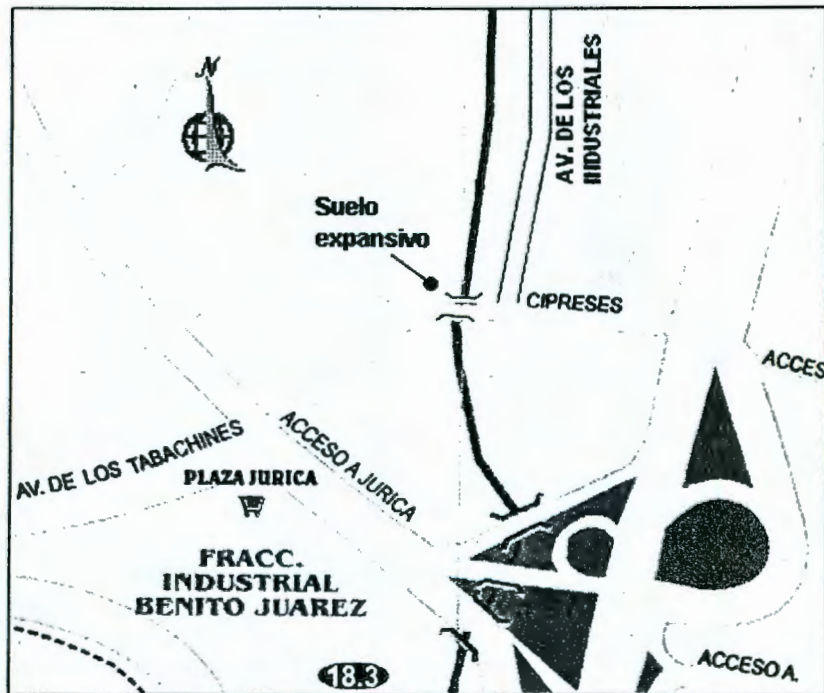




Tabla A

Ensayo no.	Tiempo (horas)	W	GW
1	0	30.43	89.94
	4	30.56	90.13
	8	30.92	90.65
	12	31.20	91.05
	24	33.26	93.89
	48	34.52	95.54
2	0	30.15	89.53
	4	30.88	90.6
	8	31.15	90.98
	12	31.20	91.05
	24	33.26	93.89
	48	34.52	95.54
3	0	29.15	88.03
	4	31.66	91.7
	8	32.07	92.28
	12	32.85	93.34
	24	33.45	94.14
	48	33.69	94.46
4	0	29.54	88.63
	4	29.63	88.76
	8	30.45	89.97
	12	31.13	90.96
	24	32.47	92.83
	48	32.88	93.38
5	0	28.96	87.74
	4	29.35	88.34
	8	30.91	90.64
	12	31.39	91.32
	24	34.12	95.02
	48	34.88	96
6	0	27.15	84.88
	4	31.52	91.51
	8	31.96	92.12
	12	32.10	92.32
	24	34.26	95.2
	48	34.61	95.65
7	0	30.43	89.94
	4	30.87	90.58
	8	31.05	90.84
	12	31.16	91
	24	34.49	95.5
	48	34.52	95.54
8	0	21.9	75.43
	4	29.3	88.26
	8	31.45	91.41
	12	34.12	95.02
	24	34.65	95.7
	48	36.8	98.36
9	0	21.9	75.43
	4	26.55	83.89
	8	30.49	90.03
	12	32.72	93.17
	24	32.98	93.52
	48	35.58	96.87
10	0	21.9	75.93
	4	32.73	93.18
	8	33.09	93.66
	12	33.52	94.24
	24	33.97	94.83
	48	35.43	96.69

11	0	28.7	87.34
	4	32.89	93.4
	8	33.56	94.29
	12	33.78	94.58
	24	33.97	94.83
	48	35.69	97.01
12	0	28.7	87.34
	4	32.56	92.55
	8	33.83	94.64
	12	34.81	95.91
	24	35.49	96.76
	48	36.53	98.03
13	0	19.5	70.44
	4	28.52	87.06
	8	34.16	94.64
	12	35.64	96.95
	24	36.2	97.62
	48	37.9	99.65
14	0	19.5	70.44
	4	27.65	85.69
	8	33.21	93.83
	12	33.54	94.26
	24	35.96	97.34
	48	37.2	98.83
15	0	16.8	64.21
	4	30.6	90.19
	8	31.76	91.84
	12	32.15	92.39
	24	33.95	94.8
	48	35.77	97.11
16	0	16.8	64.21
	4	31.45	91.41
	8	32	92.18
	12	32.42	92.76
	24	29.41	88.43
	48	35.21	96.41
17	0	14.9	59.37
	4	30.36	89.84
	8	31.02	90.8
	12	31.95	92.11
	24	33.87	94.7
	48	34.66	95.72
18	0	16.90	64.45
	4	31.98	92.15
	8	33.41	94.09
	12	33.87	94.7
	24	33.87	94.7
	48	34.01	94.88
19	0	14.52	58.35
	4	33.65	94.41
	8	34.12	95.02
	12	34.23	95.16
	24	34.23	95.16
	48	34.57	95.6
20	0	23.15	77.85
	4	32.86	93.36
	8	35.63	96.93
	12	32.01	97.4
	24	36.66	98.19
	48	36.70	98.24

21	0	24.87	81
	4	33.95	94.8
	8	34.15	95.06
	12	34.41	95.40
	24	34.52	95.54
	48	34.67	95.73
22	0	18.16	67.43
	4	34.39	95.37
	8	34.45	95.45
	12	34.52	95.54
	24	34.63	95.68
	48	34.74	95.82
23	0	18.53	68.28
	4	33.99	94.85
	8	34.29	95.24
	12	34.81	95.91
	24	34.93	96.06
	48	35.03	96.19
24	0	24.35	80.07
	4	32.86	93.36
	8	33.41	94.09
	12	33.67	94.43
	24	33.88	94.71
	48	34.27	95.22
25	0	15.87	61.69
	4	33.12	93.71
	8	33.21	93.83
	12	33.54	94.26
	24	33.76	94.55
	48	33.92	94.76
26	0	17.61	66.15
	4	32.91	93.42
	8	33.15	93.75
	12	33.42	94.1
	24	33.57	94.3
	48	33.72	94.5
27	0	20.68	72.95
	4	34.45	95.45
	8	34.55	95.58
	12	34.72	95.79
	24	34.81	95.91
	48	34.88	96
28	0	20.12	71.77
	4	33.92	94.76
	8	34.67	95.73
	12	34.79	95.88
	24	34.84	95.95
	48	34.97	96.11
29	0	21.30	74.22
	4	32.93	95.25
	8	33.11	93.69
	12	33.32	93.97
	24	34.10	95
	48	34.30	95.25
30	0	16.52	63.52
	4	34.95	96.08
	8	35.02	96.17
	12	35.08	96.25
	24	35.14	96.32
	48	35.26	96.42

## Tabla de equivalencias

Altura de agua cm	pF	Lb/plg <sup>2</sup>	Kgf/cm <sup>2</sup>	Kpa	bars
1	0	0.014	0.001	0.0981	0.00098
10	1	0.142	0.010	0.9810	0.00980
10 <sup>2</sup>	2	1.422	.100	9.8100	0.09800
10 <sup>3</sup>	3	14.220	1.000	98.1000	0.98000
10 <sup>4</sup>	4	142.200	10.000	981.0000	9.81000
10 <sup>5</sup>	5	1422.000	100.000	9810.0000	98.10000
10 <sup>6</sup>	6	14220.000	1000.000	98100.0000	981.00000
10 <sup>7</sup>	7	142200.000	10000.000	981000.0000	9810.00000



## Conceptos de Estadística aritmética

### Media Aritmética:

Se calcula al sumar los valores de un conjunto y al dividir el resultado de esta suma entre el número total de valores que forman el conjunto.

La fórmula para determinar la media aritmética es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \dots\dots\dots \text{Ec. A}$$

Donde:

- $\bar{X}$  = media aritmética
- n = es el número total de datos
- $X_i$  = es cada uno de los valores de los datos del conjunto

### Desviación estándar:

Puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de las medidas nos da la precisión de estas. Se representa por el símbolo S.

La fórmula para determinar la desviación estándar:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \dots\dots\dots \text{Ec. B}$$

### Coefficiente de variación:

Se utiliza para comparar la dispersión en dos conjuntos de datos, debido a que al comparar las desviaciones estándar puede conducir a resultados ilógicos o también cuando las unidades en que se midan las desviaciones estándar pueden ser diferentes (kg. vs Años).

Su fórmula es la siguiente:

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} (100) \dots\dots\dots \text{Ec. C}$$