



**UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPÍRITU SANTO**

**FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL**

**ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE SUELOS EXPANSIVOS UTILIZANDO  
POLÍMEROS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN QUE SE PRESENTA COMO REQUISITO PREVIO A  
OPTAR EL GRADO DE INGENIERO CIVIL**

**NOMBRE DE LA ESTUDIANTE:  
GÉNESIS GABRIELA AYALA AVELLÁN**

**NOMBRE DE LA TUTORA:  
ING. CARMEN ROSA TERREROS CAICEDO**

**SAMBORONDÓN, SEPTIEMBRE, 2017**

## **CERTIFICADO FINAL DE APROBACION DEL TUTOR**

En mi calidad de tutor de la estudiante Génesis Gabriela Ayala Avellán que cursa en la Escuela de Ingeniería Civil, dictado en la Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil de la UEES.

CERTIFICO:

Que he revisado el trabajo de tesis con el título: **ESTABILIZACIÓN Y CONTROL DE SUELOS EXPANSIVOS UTILIZANDO POLÍMEROS**, presentado por la estudiante **GÉNESIS GABRIELA AYALA AVELLÁN** con cedula de ciudadanía N °. 1310949738, como requisito previo para optar el Grado Académico de Ingeniería Civil, y considero que dicho trabajo investigativo reúne los requisitos y méritos suficientes necesarios de carácter académico y científico, para presentarse a la Defensa Final.

Tutor: Ing. Carmen Terreros

Samborondón, Septiembre 2017

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar el presente trabajo a mi familia, por ser el pilar fundamental en mi formación y convertirme en la persona que soy actualmente, llena de metas y desafíos cumplidos y por cumplir.

Dedico también este trabajo a mis profesores por compartir sus conocimientos y sabiduría conmigo en estos años universitarios.

- Génesis Gabriela Ayala Avellán

## **RECONOCIMIENTO**

Agradezco a Dios por guiarme en cada momento de mi vida, por ayudarme en esta meta más cumplida, y por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida.

Agradezco a toda mi familia por ser mi fortaleza y mi guía en mi vida, gracias a ellos he logrado muchos objetivos propuestos, por lo que estoy profundamente agradecida.

Agradezco a la Ing. Carmen Terreros por ser la tutora de este trabajo, gracias a su paciencia, conocimientos y sabiduría con la cual pude culminar satisfactoriamente con este proyecto.

Agradezco a la UEES por todo este tiempo universitario y por todo el aporte hacia mí brindado para el crecimiento de mi formación personal y profesional.

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación se realizó a partir de información existente en el Ecuador de suelos expansivos, con la finalidad de poder determinar parámetros óptimos de utilización de polímeros para su correcta estabilización.

Como lo mencionan varios Autores, entre ellos Márquez, 2006, los suelos expansivos están formados por muchos minerales de arcilla que tienen propiedades de gran absorción de agua y retención de la misma, produciendo un incremento de volumen en el mineral que disminuye drásticamente cuando se seca (retracción). Este fenómeno puede ser perjudicial para la construcción porque no es constante el incremento de volumen, originando distintos empujes relativos, por hundimiento y generan asentamientos importantes cuando se produce la retracción (p.3).

Como complemento con lo anterior dicen Patrone & Prefumo, s.f. que muchos fenómenos atribuidos a asentamientos del suelo u otros problemas en realidad eran debidos a procesos de hinchamiento por parte de los suelos expansivos (p.1).

Se realizó un procedimiento completo para la obtención de resultados comenzando por el muestreo de suelos y clasificación, para de esta manera tener definidas las características del mismo.

Adicionalmente, después de haber caracterizado al material expansivo se procedió a estabilizarlo químicamente con polímeros, realizando una vez más ensayos de clasificación y caracterización con suelo mezclado con estos elementos.

Finalmente, se llegó a obtener las conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos para el correcto uso y dosificación del polímero con la finalidad de obtener resultados técnicos y económicos favorables.

# Contenido

Introducción .....	10
Capítulo I Generalidades.....	11
1.1. Antecedentes .....	11
1.2. Descripción del problema.....	11
1.3. Delimitación del objetivo .....	13
1.4. Preguntas de investigación .....	13
1.5. Objetivos .....	13
1.5.1. Objetivo general.....	13
1.5.2. Objetivos específicos .....	13
1.6. Justificación.....	13
Capítulo II Marco Teórico .....	15
2.1. Clasificación del suelo .....	15
2.1.1. Sistema de clasificación AASHTO.....	15
2.1.2. Sistema de clasificación SUCS .....	18
2.2. Consistencia del suelo .....	22
2.2.1. Limite líquido.....	22
2.2.2. Límite plástico .....	24
2.2.3. Límite de contracción .....	24
2.2.4. Índice de liquidez .....	25
2.3. Suelos expansivos .....	26

2.3.1.	Composición de los suelos expansivos .....	28
2.3.2.	Efectos de los suelos expansivos .....	30
2.4.	Estabilización de suelos .....	37
2.4.1.	Métodos de estabilización de suelos .....	38
2.4.2.	Control de estabilización.....	40
2.5.	Polímeros.....	40
2.5.1.	Características de los polímeros.....	42
2.5.2.	Razones por las que se debe utilizar polímeros para estabilización del suelo ...	42
Capítulo III Metodología .....		44
3.1.	Muestreo.....	44
3.2.	Caracterización del suelo natural .....	45
3.2.1.	Granulometría .....	45
3.2.2.	Humedad natural.....	45
3.2.3.	Límites de Atterberg .....	46
3.2.4.	Próctor modificado.....	47
3.2.5.	Evaluación del potencial expansivo.....	48
3.3.	Caracterización del suelo estabilizado con polímero .....	50
3.3.1.	Límites de Atterberg .....	50
Capítulo IV. Ensayos y resultados .....		57
4.1.	Proceso de Estabilización en Obra .....	101
4.2.	Costo de estabilización de suelo con Polímero .....	102

Capítulo v. Conclusiones y recomendaciones.....	104
Anexos.....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Límites de Atterberg.....	23
Figura 2 Copa de Casagrande .....	24
Figura 3 Efecto de la secuencia humedecimiento - carga en una arcilla expansiva .....	33

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de suelo según AASHTO.....	16
Tabla 2 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava .....	19
Tabla 3 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos arenosos .....	20
Tabla 4 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos .....	21
Tabla 5 Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos .....	30
Tabla 6 Ubicación de las muestras.....	44
Tabla 7 Humedad de las muestras analizadas.....	46
Tabla 8 Límites de Atterberg en suelos naturales.....	47
Tabla 9 Prueba Próctor Modificado.....	48
Tabla 10 Expansión libre con muestra natural.....	50
Tabla 11 Ensayo de expansión controlada.....	50
Tabla 12 Límites del suelo estabilizado con polímero.....	51
Tabla 13 Límites del suelo natural.....	51
Tabla 14 Prueba Próctor modificado con polímero .....	52
Tabla 15 Prueba Próctor modificado en suelo natural .....	52

Tabla 16 Valores de ensayo de expansión libre en suelo estabilizado .....	54
Tabla 17 Valores de ensayo de expansión libre con suelo natural .....	54
Tabla 18 Ensayo de expansión controlada en suelo estabilizado .....	56
Tabla 19 Ensayo de expansión controlada en suelo natural .....	56
Tabla 20 Reducción de expansión .....	106
Tabla 21 Reducción de presión de expansión.....	107

## **Introducción**

Este trabajo de investigación tiene el objetivo de determinar la cantidad de polímero óptima para la estabilización de suelos expansivos encontrados en la provincia del Guayas a partir de información existente brindada por la UEES.

Las obras civiles, vías de comunicación y demás tipos de infraestructura se asientan en el suelo, por lo que es de vital importancia que este sea de buena calidad y cumpla con especificaciones para no tener problemas constructivos.

Con la realización de la investigación geotécnica del suelo en cuestión y su respectivo análisis una vez mezclado con el polímero, se obtendrá no solamente un suelo con características mecánicas mejoradas sino también una valoración económica del costo de este tipo de estabilización.

## **Capítulo I Generalidades**

### **1.1. Antecedentes**

A finales de la década de 1930-1940 especialistas a nivel mundial identificaron a los suelos expansivos como una de las principales causas de los daños experimentados en las estructuras, tanto a nivel de edificaciones como en cimentaciones y vías de comunicación.

A partir de este descubrimiento, los problemas de ingeniería que eran atribuidos a asentamientos y consolidación, se redirigieron a un nuevo fenómeno: el hinchamiento.

Las pérdidas anuales a nivel global por problemas producidos por suelos expansivos ascienden a millones de dólares, y en una época donde se debe optimizar la canalización de recursos el estudio del comportamiento de los suelos expansivos y su control es primordial.

### **1.2. Descripción del problema**

El suelo posee diferentes características dependiendo de su composición. Los suelos expansivos están compuestos principalmente de silicatos con una estructura molecular de disposición laminar y los enlaces que unen las láminas entre sí representan fuerzas relativamente débiles, lo cual permite el acceso de agua a la estructura entre capas provocando un desequilibrio de cargas eléctricas incrementando el espacio entre capas por efecto de repulsión eléctrica lo que conlleva a su vez a un incremento del volumen neto del suelo, generando la denominada presión de hinchamiento, causante de serios problemas en las diferentes obras de Ingeniería. Al generarse la presión de hinchamiento, esta provoca que las obras civiles (cimentaciones, edificios, carreteras, etc.) sufran daños y se destruyan, lo que causa problemas funcionales que a la larga generan gastos muy elevados.

La investigación de una solución o mitigación de los efectos es de vital importancia para la Ingeniería, puesto que uno de los preceptos fundamentales es la de dar solución a los problemas que se presenten y de esta manera optimizar recursos y brindar una mejor funcionalidad a las obras que se construyan.

Hasta ahora, existen diversos tratamientos para este problema, a nivel general, sin embargo, es importante tratar el tema desde un punto de vista a nivel particular y con elementos que se tengan en el medio, como el caso de los polímeros.

El procedimiento propuesto para el desarrollo del tema es el siguiente:

1. Ubicar en base a investigaciones previas los lugares donde existan suelos expansivos en el Ecuador.
2. Una vez ubicados los lugares, determinar uno particular para el análisis del suelo y la experimentación.
3. Realizar los ensayos de laboratorio correspondientes para determinar las características del suelo, determinar su expansibilidad, realizar correlaciones con las teorías propuestas y buscar las alternativas de estabilización.
4. Realizar ensayos de laboratorio con el suelo de estudio más polímeros para determinar las características modificadas del suelo y los resultados de su estabilización.
5. Plantear una aplicación para la comprobación de los resultados.

En la experimentación y el proceso de análisis, se espera que el suelo modificado sea capaz de disminuir y en el mejor de los casos suprimir su expansibilidad, cambiando sus características y su composición, para mejorar el desempeño de las obras civiles.

### **1.3. Delimitación del objetivo**

- El estudio está limitado a la caracterización del suelo expansivo y su estabilización mediante el uso de polímeros de tipo Calypso L y M.
- Dentro de la investigación también se realizan ensayos del material estabilizado para conocer las nuevas características mecánicas del mismo, estos ensayos son: Límites de Atterberg, expansión y compactación.

### **1.4. Preguntas de investigación**

Se plantean las siguientes preguntas para la investigación:

1. ¿Dónde hay suelos expansivos?
2. ¿Qué características tienen los suelos expansivos?
3. ¿Es recomendable la utilización de polímeros para estabilizar suelos expansivos?
4. ¿Cuál es el porcentaje óptimo de polímero para estabilizar suelos?

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Lograr una estabilización adecuada de suelos expansivos mediante la utilización de polímeros.

#### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar a los suelos expansivos mediante ensayos de clasificación y de expansión.
- Realizar el análisis con suelos de baja, mediana y alta expansividad.
- Determinar porcentaje óptimo de polímero a utilizarse en cada caso.
- Determinar un costo aproximado de estabilizar suelos expansivos con polímero.

### **1.6. Justificación**

La investigación se la realiza con la finalidad de dar una solución a los problemas que presentan las obras civiles que se construyen en sectores donde hay la presencia de suelos expansivos. Estos han influido de gran manera en el deterioro del desempeño de estas obras, causando

demasiados daños tanto funcionales como económicos, por lo que se debe tomar medidas que permitan una disminución significativa de los perjuicios que se puedan generar.

Al realizar esta investigación, se pretende dar alternativas que mejoren las condiciones constructivas cuando se presenten los problemas de expansibilidad.

## Capítulo II Marco Teórico

### 2.1. Clasificación del suelo

De acuerdo a Braja Das, 2001 los suelos se clasifican en grupos basados en sus características físicas y mecánicas. Los sistemas de clasificación brindan un lenguaje común para poder expresar las características generales de los suelos, que resultarían infinitas sin una descripción a detalle. En la actualidad existen dos sistemas de clasificación que usan la distribución por tamaño del grano y la plasticidad del suelo. Los sistemas son: Sistema de clasificación AASHTO y Sistema de Clasificación SUCS.

#### 2.1.1. Sistema de clasificación AASHTO

Se desarrolló en 1929 adoptado por la Asociación Americana para la construcción de carreteras del Estado. Ha sufrido varias revisiones y modificaciones propuestas por los comités de clasificación de materiales del Consejo de Investigaciones de Carreteras.

El sistema que actualmente se encuentra en uso se muestra en la Tabla 1. De acuerdo con este método, el suelo se clasifica en siete grupos mayores, del A-1 al A-7. Los suelos que se encuentran dentro de los grupos de A-1 al A-3 son suelos granulares, donde el 35 % o menos de las partículas pasan por el tamiz No. 200.

Los suelos de los cuales más del 35 % pasan por el tamiz 200 se clasifican dentro de los grupos del A-4 al A-7, o gruesos con más del 35% de finos estando formados por material de tipo limo y arcilla.

El sistema de clasificación de basa en los siguientes criterios:

##### a) **Tamaño del grano**

**Grava:** fracción que pasa el tamiz de 75 mm. y es retenida en la malla No. 10.

**Arena:** fracción que pasa el tamiz No. 10 y es retenida en el tamiz 200.

**Limo y arcilla:** fracción que pasa el tamiz 200.

Tabla 1 Clasificación de suelo según AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% ó menos pasa el tamiz N.200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz N. 200)			
Clasificación por grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, porcentaje que pasa											
2.00 mm (N. 10)	50 max.	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
0.425 mm (N. 40)	30 max.	50 max.	51 min.	----	----	----	----	----	----	----	----
0.075 mm (N. 200)	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características fracción que pasa el tamiz N. 40											
Límite Líquido	----	----	----	40 max.	41 max.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Índice de plasticidad	6 max.		N.P.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Material constituyente más común	Fragmento roca grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas arcillosas y limosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Comportamiento general como subrasante	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente: [http://www.rocamix.com.do/images/analisis\\_tabla1.gif](http://www.rocamix.com.do/images/analisis_tabla1.gif)

## b) Plasticidad

**Limo:** Partículas cuyo índice de plasticidad es igual o menor a 10.

**Arcilla: Partículas** con índice de plasticidad igual o mayor a 11.

Si existe presencia de material granular, estos se excluyen de la porción de muestra que se está clasificando, pero el porcentaje se registra.

Para clasificar un suelo con respecto a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,** los datos se revisan de izquierda a derecha mediante un proceso de eliminación.

Para la evaluación de la calidad de un suelo para su utilización como material de subrasante se incorpora un número denominado índice de grupo (IG) junto a los grupos de suelo. Este número se escribe en paréntesis después de la designación de grupo. El índice de grupo está dado por la ecuación:

*Ecuación 1*

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

**Donde:**

*F = porcentaje que pasa el tamiz 200*

*LL = límite líquido*

*PI = índice de plasticidad*

El primer término de la ecuación 1 es el índice de grupo parcial que se determina partiendo del límite líquido. El segundo término es el índice de grupo parcial que se determina a partir del índice de plasticidad.

Existen algunas reglas que se deben seguir para la determinación del índice de grupo:

- Si el resultado es un número negativo, se tome el IG igual a 0.
- El IG calculado se redondea al entero más cercano.
- IG va desde 0 a 20, 0 para excelente y 20 para pésimo.
- Los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, y A-3 siempre es 0.

- Para los grupos A-2-6 y A-2-7 se debe calcular el IG utilizando el grupo parcial para índice de plasticidad.

En general, se puede decir que la calidad de un suelo como material para subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo.

### **2.1.2. Sistema de clasificación SUCS**

De acuerdo a (Das, 2001), surgió inicialmente como una idea propuesta por Casagrande en el año de 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos los clasifica en dos grandes categorías:

#### **a. Suelos de grano grueso**

Son de naturaleza tipo grava y arena con porcentaje pasante del tamiz 200 inferior al 50 % (Das, 2001, p.39). Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava y S significa arena.

#### **b. Suelos de grano fino**

Son suelos cuyo porcentaje de partículas que pasan el tamiz 200 es superior al 50 %. Los símbolos de grupo comienzan con el prefijo M para limo inorgánico, C arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos. (Das, 2001, p.39).

Otros símbolos utilizados para la clasificación son:

- W: bien graduado
- P: mal graduado
- L: baja plasticidad (LL menor a 50)
- H: alta plasticidad (LL mayor a 50)

**Tabla 2 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos tipo grava**

Símbolo de grupo	Criterios
GW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual que 4; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
GP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para GW
GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea <i>A</i> (figura 2.12) o el índice de plasticidad menor que 4
GC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea <i>A</i> (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
GC-GM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
GW-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GM
GW-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GW y GC
GP-GM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GM
GP-GC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para GP y GC

**Fuente:**(Das, 2001)

**Tabla 3 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos arenosos**

Símbolo de grupo	Criterios
SW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_u = D_{60}/D_{10}$ mayor que o igual a 6; $C_z = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 y 3
SP	Menos de 5% pasa la malla No. 200; no cumple ambos criterios para SW
SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican debajo de la línea <i>A</i> (figura 2.12); o índice de plasticidad menor que 4
SC	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg se grafican arriba de la línea <i>A</i> (figura 2.12); índice de plasticidad mayor que 7
SC-SM	Más de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 2.12
SW-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM
SW-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SC
SP-SM	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SM
SP-SC	Porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC

**Fuente:**(Das, 2001)

**Tabla 4 Sistema Unificado de Clasificación; símbolos de grupo para suelos limosos y arcillosos**

<b>Símbolo de grupo</b>	<b>Criterios</b>
CL	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI > 7$ ; se grafica sobre o arriba de la línea <i>A</i> (véase zona CL en la figura 2.12)
ML	Inorgánico; $LL < 50$ ; $PI < 4$ ; o se grafica debajo de la línea <i>A</i> (véase la zona ML en la figura 2.12)
OL	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL < 50$ (véase zona OL en la figura 2.12)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica sobre o arriba de la línea <i>A</i> (véase la zona CH en la figura 2.12)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$ ; $PI$ se grafica debajo de la línea <i>A</i> (véase la zona MH en la figura 2.12)
OH	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$ ; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la figura 2.12)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la figura 2.12
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

**Fuente:**(Das, 2001)

## **2.2. Consistencia del suelo**

Braja Das, 2001 menciona que:

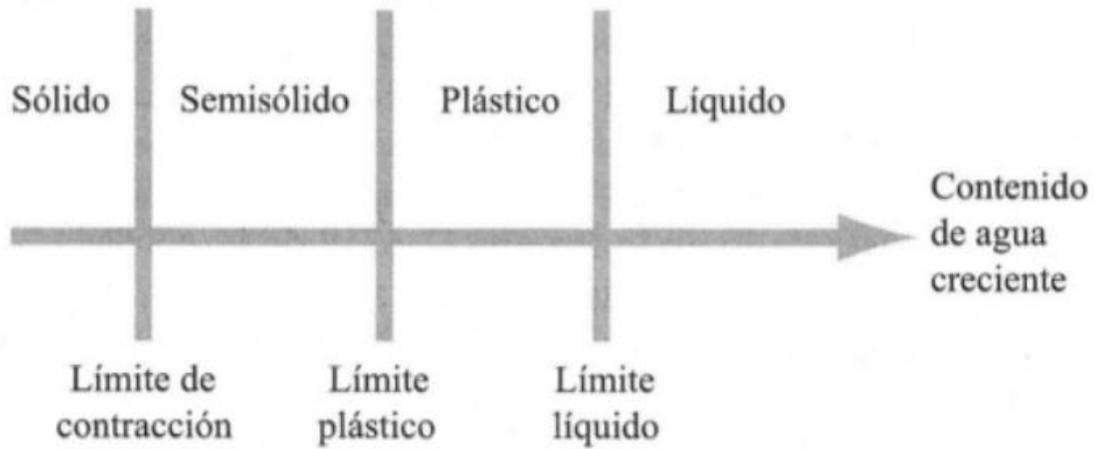
Cuando existen minerales de arcilla en un suelo de grano fino, éste puede ser remodelado en presencia de alguna humedad sin desmoronarse. Esta naturaleza cohesiva es debida al agua absorbida que rodea a las partículas de arcilla. A principios de 1900, un científico sueco, Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido.

El contenido de agua, en porcentaje, en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, se define como el límite de contracción. El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico es el límite plástico, y de estado plástico a líquido es el límite líquido. Esos límites se conocen también como límites Atterberg (p.27).

### **2.2.1. Limite líquido**

“Un diagrama esquemático de un dispositivo para determinar el límite líquido consiste en una copa de bronce y una base de hule dura. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela.” (Das, 2001, p.27). Para la prueba del límite líquido se coloca una pasta en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar. Luego con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10 mm. El contenido de agua, en porcentaje requerido para cerrar una distancia de 12,7 mm lo largo del fondo de la ranura a los 25 golpes se define como límite líquido. El procedimiento para la prueba de límite líquido está dado en la Prueba D-4318 de la ASTM.

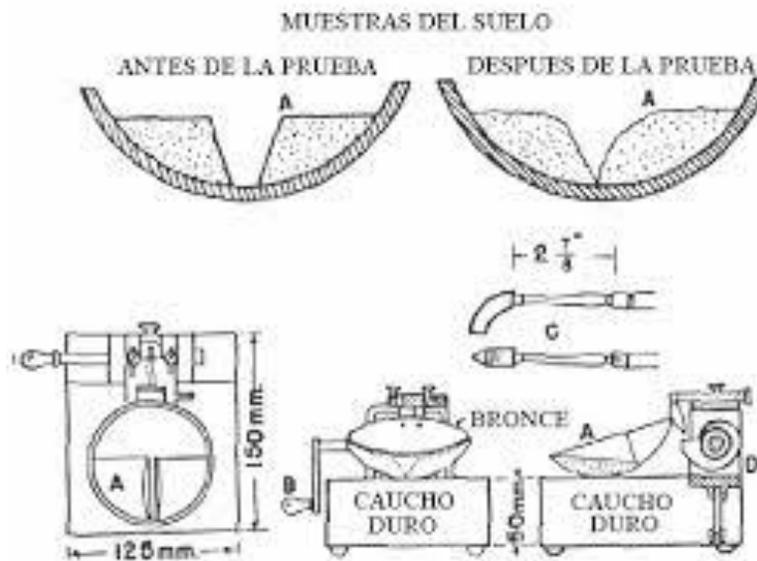
**Figura 1 Límites de Atterberg**



**Fuente:** (Das, 2001)

Casagrande (1932) concluyó que cada golpe en un dispositivo estándar para límite líquido corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^2$  (equivalente  $0.1 \text{ k N/m}^2$ ). Por consiguiente, el límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de  $25 \text{ g/cm}^2$  (equivalente  $2.5 \text{ k N/m}^2$ ).

**Figura 2 Copa de Casagrande**



**Fuente:** (Rodas, 1982)

### 2.2.2. Límite plástico

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre la placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal hasta que los rollitos presenten fisuras.

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo, o  $PI = LL - PL$

El procedimiento para la prueba del límite plástico se da en la prueba D-4318 de la ASTM.

### 2.2.3. Límite de contracción

La masa de suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de equilibrio en la que más pérdida de agua

conducirá a que no haya cambio de volumen. El contenido de agua, en porcentaje, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa, se define como límite de contracción. Las pruebas del límite de contracción (Prueba D-427 de la ASTM) se efectúan en el laboratorio con un recipiente de porcelana de aproximadamente 44 mm de diámetro y 13 mm de altura. El interior del recipiente está recubierto con aceite de petróleo que luego se llena completamente con suelo húmedo. El exceso de suelo que queda fuera del borde se retira con una regleta. Se registra la masa de suelo dentro del recipiente. Luego, la masa de suelo en el recipiente se seca en el horno. El volumen de la masa de suelo secada en horno se determina por el desplazamiento de mercurio. Como el manejo del mercurio es peligroso, la prueba D-4943 de la ASTM describe un método de inmersión de la masa de suelo seco en una vasija de cera derretida. La masa de suelo revestida de cera es enfriada. Su volumen se determina sumergiéndola en agua.

#### **2.2.4. Índice de liquidez**

La consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural se define por una razón llamada índice de liquidez (LI):

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

Donde  $w$  = contenido de agua del suelo in situ.

El contenido de agua in situ de una arcilla sensitiva es mayor que el límite líquido. En tal caso,  $LI > 1$ .

Esos suelos al remodelarlos, se transforman en una forma viscosa que fluye como un líquido.

Los depósitos de suelos que están fuertemente sobreconsolidados tienen un contenido de agua natural menor que el límite plástico. En ese caso,  $LI < 1$ .

Los valores del índice de liquidez para algunos de esos suelos son negativos.

### **2.3. Suelos expansivos**

Actualmente ha cobrado importancia el estudio de comportamiento de las arcillas expansivas en vista del creciente número de obras en las que es necesario trabajar con ellas. Como su nombre lo implica, arcillas expansivas son aquellas que son susceptibles de sufrir un apreciable aumento de volumen durante la construcción o la operación de una estructura (Badillo & Rodríguez, 2006). Una arcilla tiende siempre a la expansión volumétrica al ser aliviada de cargas preactuantes; las características de expansividad guardan estrecha relación con las de compresibilidad, pudiéndose hacer la afirmación de que las arcillas más expansivas en descarga son también fuertemente compresibles en proceso de carga en la rama virgen de su curva de compresibilidad. La disminución de los esfuerzos efectivos, como quiera que se produzcan, es el factor que más coadyuva a provocar expansión, siempre que exista la posibilidad de que el suelo tome agua y transcurra el tiempo necesario para que el fenómeno se desarrolle; existen, sin embargo, otros factores que influyen en la expansividad de las arcillas, aun cuando no varíen las cargas superficiales o aun que aumenten.

Tanto la compresibilidad como la expansividad de los suelos se han estudiado hasta la fecha prácticamente con la sola ayuda de la prueba de consolidación estándar, es decir, atendiendo únicamente a su proceso de deformación unidimensional; poco trabajo se ha hecho en relación a los cambios volumétricos que ocurren en las arcillas bajo esfuerzos cortantes actuando adicionalmente esfuerzos normales, como sería el caso de estudios efectuados en pruebas triaxiales bajo diferentes trayectorias de esfuerzos. Al considerar esfuerzos normales y cortantes combinados resulta conveniente referir los estados de esfuerzos a los llamados esfuerzos octaédricos (el esfuerzo normal octaédrico es simplemente el promedio aritmético

de los esfuerzos principales  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$ ), el esfuerzo cortante octaédrico está dado por la expresión

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} ;$$

Estos esfuerzos pueden interpretarse como un promedio de los esfuerzos normales y tangenciales, respectivamente y son los esfuerzos normal y tangencial que obran en un plano igualmente inclinado con respecto a las tres direcciones principales, es decir, un plano cuya normal tiene cosenos directores  $1/\sqrt{3}$  con respecto a un sistema coordenado alineado a las direcciones principales. El hecho de que al considerar el espacio  $\sigma_1, \sigma_2$  y  $\sigma_3$  se tenga ocho de estos planos y de que formen un octaedro regular, explica el nombre que se le ha dado a este plano (plano octaédrico).

Considerando en primer lugar, únicamente esfuerzos isotrópicos, es decir, esfuerzos normales de igual magnitud en las tres direcciones principales, se tendrá que una arcilla experimentará disminución de volumen para todo incremento de tales esfuerzos; esta disminución será mayor en el intervalo virgen de la curva de compresibilidad y menor en el de recompresión. Al disminuir los esfuerzos isotrópicos ocurrirán expansiones siguiendo una curva de descarga en el plano  $e \sim p$ .

Los esfuerzos cortantes que existen en cualquier estado triaxial de esfuerzos que no sea isotrópico tienden a distorsionar el suelo, causando con ello una perturbación estructural que conduce a una degradación, en la que la estructura queda en condiciones tales que los esfuerzos normales producen cambios adicionales de volumen (arcillas normalmente consolidadas); esta perturbación es tanto mayor cuanto mayor sean los esfuerzos cortantes

actuantes y su efecto es muy apreciable cuando los valores del esfuerzo cortante se acercan a la resistencia del material a tal tipo de esfuerzos. En arcillas fuertemente preconsolidadas, los esfuerzos cortantes, al perturbar la estructura tienden a liberar por así decirlo, el efecto de preconsolidación y este efecto de preconsolidación puede ser la causa de la parte mayoritaria de la expansión total y de hecho así sucede si los esfuerzos cortantes actuantes son altos respecto a la resistencia del material.

En la prueba de consolidación, que como se dijo, es prácticamente la única que hasta hoy se ha usado extensamente para estudiar expansión de arcillas en el laboratorio, los esfuerzos cortantes juegan un papel muy limitado en las deformaciones del suelo; por ello esta prueba difícilmente puede considerarse como base experimental para establecer criterios sobre expansión. Solamente en casos reales en que se produzca de cerca las condiciones de tal prueba podrán usarse con confianza. En consecuencia, muchos de los criterios que hoy prevalecen sobre el comportamiento de arcillas expansivas, adolecen de esta limitación.

La expansión de arcillas sujetas a estados tridimensionales de esfuerzos en cámara triaxial fue estudiada principalmente por Henkel en el Colegio Imperial de la Universidad de Londres. Una interpretación teórica de sus resultados ha sido presentada por Juárez-Badillo.

### **2.3.1. Composición de los suelos expansivos**

Se identifican como suelos expansivos, propiamente dichos, aquellos que tienen entre sus componentes minerales las montmorilonitas. Todas las arcillas tienen, de una forma u otra, algún potencial de expansión en el sentido de que ganan o pierden agua según las condiciones ambientales. Dentro de los componentes activos de las arcillas expansivas están los minerales activos

## Características de los suelos expansivos

La prueba de consolidación estándar es prácticamente la única que se ha usado extensamente hasta el presente para estudiar compresibilidad y expansibilidad de las arcillas. En trazado semilogarítmico de  $e \sim p$ , la curva virgen de compresión se aproxima mucho a una línea recta y la compresibilidad del suelo esta adecuadamente descrita por el índice de compresibilidad,  $C_c$  definido por la ecuación:

$$e = e_0 - C_c \log \frac{\bar{p}}{p_0}$$

La curva de expansión se asemeja menos a una línea recta, pero aún puede considerarse como tal, al menos para grados de preconsolidación no muy altos. Esta curva de expansión también puede representarse, por lo tanto, por una expresión de la forma:

$$e = e_0 - C_s \log \frac{\bar{p}}{p_0}$$

En donde  $C_s$  es el llamado índice de expansibilidad. Este es el índice que se ha usado para cuantificar el grado de expansibilidad de una arcilla. En la práctica puede afirmarse que a un mayor  $C_c$ , corresponde un mayor  $C_s$ .

Como en el caso de la compresibilidad, se ha encontrado que la expansibilidad depende del tipo mineral de arcilla que la componga y que esa expansibilidad aumenta en el orden caolinita, illita, montmorilonita. Los cationes de absorción juegan un papel muy importante en la expansibilidad (como en la compresibilidad). El  $\text{Li}^+$  y el  $\text{Na}^+$  son los cationes que producen la expansibilidad mayor, mientras que el  $\text{Fe}^{+++}$  es de los que producen la expansibilidad menor.

En la práctica se ha adoptado como una medida relativa de la expansibilidad de una arcilla el incremento de volumen, expresado en porcentajes del volumen total inicial de una muestra

secada al aire y puesta a saturar en un consolidómetro estándar bajo una presión de 0,70 ton/m<sup>2</sup> (1 lb/pulg<sup>2</sup>). El criterio cuantitativo anterior se ha correlacionado con el contenido coloidal (porcentaje de partículas menores que 0,001 mm), el índice de plasticidad y el límite de contracción. Estos tres conceptos proporcionan una identificación adecuada para fines prácticos. La Tabla 5 es la que propone W.G. Holtz, para la identificación de las arcillas expansivas.

**Tabla 5 Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos**

Datos de prueba de identificación			Expansión probable. Cambio volumétrico en % (seco a saturado)	Grado de expansión
Contenido coloidal (% < 0,001 mm)	Índice de plasticidad	Límite de contracción		
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20 – 31	25 - 41	7 - 12	20 - 30	Alto
13 – 23	15 - 28	10 - 16	10 - 20	Medio
<15	<18	>15	<10	Bajo

**Fuente:** ( W.G. Holtz, citado por Badillo & Rodríguez, 2006)

### 2.3.2. Efectos de los suelos expansivos

Un caso frecuente de la practica en donde se tienen problemas involucrados a las arcillas expansivas es el de las construcciones en mantos superficiales de arcillas que han estados sujetos a periodos largos de evaporación. Debido al efecto de la evaporación, el agua cerca de la superficie trabaja a tensión, induciéndose un flujo ascendente. Suponiendo que de no

existir la evaporación el nivel freático coincidiera con las superficies del terreno, el efecto de la evaporación hace que, en una cierta profundidad, la distribución de presiones no sea la hidrostática sino la correspondiente a un flujo ascendente y que las magnitudes de los esfuerzos en el agua sean de tensión. Lo anterior hace que el punto de presión nula (nivel freático) se abata. Si la evaporación es de suficiente intensidad, la costra superficial puede aún llegar a estar solo parcialmente saturada (arcilla desecada).

Si con las condiciones anteriores, se construye una estructura, el efecto sobre la arcilla localizada bajo la obra, en el área ocupada por la misma, es el de suprimir prácticamente la evaporación. Esto hace que, con el tiempo, el flujo ascendente tiende a restituir las presiones normales correspondientes al caso de no tener evaporación; es decir, la distribución de presiones neutras tenderá a la hidrostática con nivel freático en la superficie del terreno. Lo anterior causa que las presiones efectivas disminuyan fuertemente con la consiguiente expansión del material bajo el área cargada (excepto en el caso de que el peso de la edificación compense la disminución de los esfuerzos efectivos, caso que por otra parte no es el más común). Esta expansión producirá levantamientos en la edificación, que serán mayores en la zona central del área cargada y menores en las zonas de la periferia. Se ha supuesto que la altura potencial de ascensión capilar del suelo es mayor que la profundidad del nivel freático bajo la superficie del área cargada. Esta expansión de la arcilla ocurrirá aun en época de sequía, ya que es motivada solo por la construcción de la edificación, los cambios climáticos así con el aprovisionamiento superficial del agua (como por riego o fuga de agua de una tubería) pueden dar lugar a expansiones y compresiones periódicas de la arcilla bajo cimientos pocos profundos.

### **2.3.2.1. Levantamientos y asentamientos de estructuras**

Las expansiones y compresiones del suelo en los ciclos de humedecimiento y secado antes mencionados pueden causar daños apreciables en las estructuras que se construyan sobre aquél; en especial las zapatas y las losas poco profundas susceptibles a esos cambios. La magnitud de las expansiones depende de las cargas actuantes sobre el suelo y es obvio que aquellas serán mayores cuanto menores sean éstas. Por lo general, los levantamientos debidos a expansiones son causa de problemas más serios que los asentamientos convencionales, debido a que son más difíciles de corregir una vez que han ocurrido.

En la práctica cuando se sospecha un problema de arcillas expansivas lo primero que debe hacerse es utilizar la Tabla 5, que dará idea de la magnitud del fenómeno que se enfrenta. Una vez que se sabe que existirá un problema importante de expansibilidad, deberán hacerse pruebas de laboratorio más serias; la prueba de consolidación estándar es la más común. Las muestras a obtener deberán ser realmente representativas, usándose muestras lo más inalteradas que sea posible, cuando se trabaje con suelos naturales y muestras compactadas guardando todas las similitudes con el prototipo, cuando se quiera medir expansiones de estructuras hechas con suelos que habrán de compactarse en el prototipo; en estas últimas pruebas podrán usarse muestras inalteradas, en las que se conserve, sin embargo, el contenido de agua original, pues el secado puede producir cambios irreversibles en la estructura del material.

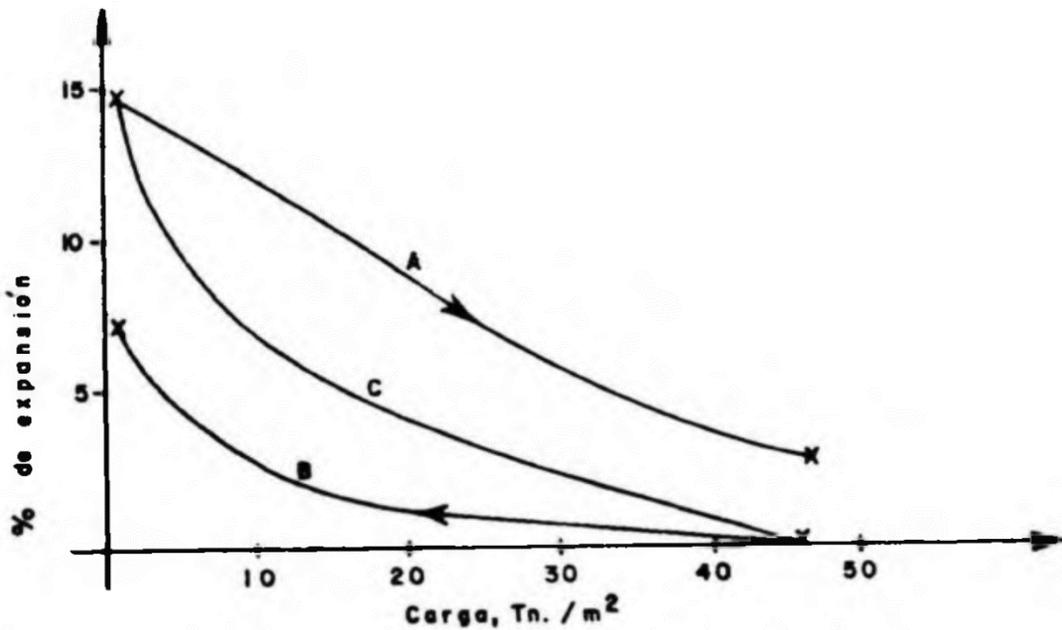
Al preparar los consolidómetros con especímenes debe de cuidarse de no modificar la estructura de la arcilla ni su contenido de humedad, por las mismas razones debe ser muestra inalterada.

Un factor muy importante es la secuencia de humedecimiento y carga a que se someta la muestra durante la prueba, pues esta deberá representar fielmente a la que tendrá lugar en el

prototipo. Se obtienen diferencias fuertes en las características de expansibilidad de una arcilla según que, durante la prueba, la carga preceda al humedecimiento o que este tenga lugar antes que el proceso de carga. Por ejemplo, si la cimentación de una estructura va a quedar cargada antes de que ocurra el humedecimiento de su suelo de cimentación, los especímenes deben cargarse antes de permitir su humedecimiento; recíprocamente, si el terreno de cimentación tiene un nivel freático alto, de manera que la arcilla se expanda antes de que la carga de la estructura actúe, las muestras deberán saturarse por completo antes de ser cargadas.

Como ilustración de las diferencias anteriores, se presenta la gráfica de la Figura 3, en la que se muestran curvas típicas de la relación cambio de volumen-carga de una misma arcilla expansiva.

**Figura 3 Efecto de la secuencia humedecimiento - carga en una arcilla expansiva**



**Fuente:** (Badillo & Rodríguez, 2006)

La curva A muestra el efecto de humedecer primero el suelo bajo una carga de  $0,7 \text{ ton/m}^2$  ( $1 \text{ lb/pulg}^2$ ), dejándole que absorba toda el agua que desee, para cargarlo posteriormente en incrementos, de modo que se consolide la muestra bajo cada incremento, obteniéndose volúmenes decrecientes a medida que aumenta la carga aplicada en cada incremento. La curva B, por lo contrario, se ha obtenido cargando primero el espécimen a una carga inicial tal que contrarreste la tendencia de la expansión de la muestra, de manera que, al ponerla en condiciones de absorber agua, no lo haga bajo esa carga; si ahora esa carga reduce (en decrementos) se obtiene la curva B, expandiéndose el suelo según va absorbiendo agua bajo cargas decrecientes.

La curva C muestra las expansiones que se obtienen para la arcilla sujeta a prueba cuando el espécimen se carga primeramente a una cierta presión intermedia cualquiera y posteriormente se permite que tome agua, hasta llegar a una condición de equilibrio; esta curva permite conocer que expansión llegara a tener la arcilla probada cuando absorba agua sujeta a diferentes cargas. Nótese que, como se había anticipado, la expansión final es menor cuanto mayor sea la carga a que está sujeta la arcilla. La curva C, contiene el primer punto de la A, puesto que este indica la expansión de la arcilla cuando se satura bajo carga de  $0,7 \text{ ton/m}^2$ , condición común para ambas curvas; también contiene el primer punto de la curva B, pues en este la arcilla se dejó expandir bajo la presión de expansión en ambos casos.

En una obra pueden distinguirse, como es sabido, las etapas de construcción y de vida útil de la estructura. En la primera, dependiendo sobre todo del clima, puede producirse secado o humedecimiento del suelo sobre el que se apoyará la estructura. Durante la vida útil el contenido de agua del suelo bajo la obra suele, por lo general, aumentar. Para precisar mejor la magnitud de las expansiones que puedan llegar a producirse será preciso anticipar estas condiciones reales de secado o humedecimiento a fin de reproducirlas en los especímenes de

prueba, antes de cargarlos y de permitir su expansión. Resulta obvio que los mayores problemas de expansión ocurren cuando durante la construcción tienen lugar un secado del suelo de apoyo, en tanto que, si este se satura antes de terminar la obra, las expansiones serán menores y aun podrán llegar a convertirse en compresiones que dan lugar a asentamientos. Los problemas más graves de expansión se producen en estructuras extensas que comunican cargas pequeñas al suelo y en las que este esté sujeto a condiciones que impliquen su saturación con el tiempo; por ejemplo, las zapatas ligeras, recubrimientos de concreto para canales, paredes o pisos de piscinas, etc.

Entre los métodos más populares y exitosos que se han empleado para reducir a un mínimo los problemas de expansión en estructuras ligeras, pueden mencionarse los siguientes:

1. Puede sobre excavarse la sección por excavar y rellenar el espacio generado con material granular en cantidad suficiente como para impedir la expansión por el peso del relleno. El tratamiento es especialmente eficiente si el relleno se coloca después que se haya producido por lo menos parcialmente la expansión esperada; en este caso habrá que cuidar el asentamiento que pudiera presentarse en el material expandido bajo cargas relativamente importantes.
2. Pueden tomarse precauciones para impedir el aumento del contenido de agua en el terreno de soporte. Para ello se han usado especialmente en canales y estructuras similares, recubrimientos plásticos y asfálticos entre las losas de concreto y el terreno, juntas flexibles impermeables, etc., pero en general es difícil poder confiar en que por mucha que se la protección que se adopte para el suelo vaya éste a permanecer realmente protegido.
3. Puede tratarse al suelo con algún procedimiento que lo haga menos expansivo. El método más elemental consiste en remoldear el suelo hasta una cierta profundidad y volverlo a

colocar compactando a humedad mayor que la anterior original y con un peso volumétrico menor que el que tenía antes en el lugar; el suelo resulta así ser menos expansivo. El procedimiento anterior requiere un estudio cuidadoso de las propiedades mecánicas del suelo así obtenido para verificar que la estructura no sufra asentamientos o que el propio suelo no pierda capacidad de carga o características de buen soporte, antes de que empiece a operar el mecanismo de la expansión.

Otros procedimientos comunes para restar expansividad al suelo consiste en la adición de cal o cemento en la proporción conveniente; el buen mezclado de suelo y aditivo suele ser el aspecto básico a cuidar en estos tratamientos, hoy facilitados por la puesta en uso de mezcladores mecánicos de excelente rendimiento.

4. Pueden disminuirse mucho los malos efectos de la expansión del suelo con el uso de elementos estructurales apropiados y flexibles que se adapten a los movimientos impuestos sin sufrir daños. Estos diseños constituyen un problema estructural y, por ello, no serán detallados en este lugar,

Si las cargas que transmite la estructura son de magnitud moderadamente importante, además de los cuatro procedimientos arriba vistos, se ha hecho uso de los siguientes:

1. Concentrar las cargas que envía la estructura al subsuelo en zapatas, que transmitan una presión tal, que impida su levantamiento por expansión.
2. Usar pilotes, pilas y cajones de cimentación apoyados en estratos no sujetos a fenómenos de expansión. En este caso deberá cuidarse la tensión que se producirá a lo largo del fuste de los elementos de cimentación cuando se expanda el manto arcilloso superior; para ello se ha recurrido a ensanchar la base de los pilotes o pilas y reforzar convenientemente sus conexiones con el resto de los elementos de cimentación.

En estructuras pesadas a veces no es necesario tomar medidas especiales para evitar expansiones, ya que la carga que se transmite al terreno pone a la estructura a cubierto de movimientos verticales ascendentes; sin embargo, deben siempre efectuarse pruebas de expansión bajo las cargas reales, para verificar que cimentaciones flexibles diseñadas no estén sujetas a levantamientos perjudiciales ni asentamientos.

Una solución que se ha usado frecuentemente en muchos problemas conectados con la expansión en estructuras relativamente ligeras de naturaleza no hidráulicas (edificaciones, por ejemplo), consiste en hacer la cimentación a base de algún elemento que quede libre de los movimientos de expansión superficial, bien sea por apoyarse en un manto no expansivo o bien por transmitir suficiente presión como para contrarrestar el levantamiento, en la forma ya citada en otras soluciones antes mencionadas; los restantes elementos estructurales deberán construirse en forma tal que no se apoyen directamente en el suelo, sino que dejen entre ellos y el suelo un colchón de aire por el que éste circule libremente. El efecto de este aire es permitir la evaporación normal del suelo, tal como existía antes de colocar la estructura; así el suelo pierde la más común causa de saturación y ya no sufrirá expansiones por conservarse en la frontera con el aire los meniscos en los canalículos del suelo, garantizándose así la permanencia del estado de tensiones en el agua, producto de la evaporación y, correspondientemente, de los esfuerzos efectivos actuantes en la estructura de la arcilla, que garantizan la inexistencia de expansiones apreciables.

#### **2.4. Estabilización de suelos**

Las zonas de soporte de cargas preferiblemente deben ser zonas que resistan como soporte, evitando suelos débiles o expansivos. “Para estabilizar un suelo se requiere de la aplicación de procesos que alteran sus propiedades iniciales, y se logra una mejora en el

comportamiento del material desde el punto de vista resistente, incrementando o protegiendo sus características mecánicas, estabilidad de volumen, capacidad de drenaje, entre otras” (Fratelli, 1993). Adicionalmente Sánchez, 2014 menciona que el proceso necesario para la estabilización depende de las características y propiedades físicas de cada suelo. Es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad.

Existen diversos tipos de suelos que necesitan ser mejorados, entre ellos están:

- Suelos de relleno
- Suelos colapsables
- Suelos expansivos
- Suelos blandos, erosionables y dragados

#### **2.4.1. Métodos de estabilización de suelos**

Para la estabilización de terrenos que no están en su aptitud completa para experimentar cargas se los someten a tratamientos con productos químicos o en su defecto procesos físicos o mecánicos para disminuir la plasticidad y mejorar así el rendimiento para la carga.

Cada uno de estos métodos emplea diferentes productos o combinaciones para efectuar la estabilización del mismo. Se utiliza elementos como la cal, productos asfálticos, cemento Portland, cenizas, sales, resinas, aceite sulfonado, entre otros.

Las características para el mejoramiento del suelo dependen de las condiciones de mejoramiento que necesite para su posterior utilización conteniendo características mecánicas estables para los propósitos de su utilización posterior. Los tratamientos de mejora pueden ser aplicables in situ o por la construcción de rellenos artificiales.

#### **2.4.1.1. Mecánico**

El método mecánico consiste en utilizar equipos mecánicos para lograr estabilizar el suelo sin la utilización de reacciones químicas de importancia. Entre los métodos de mejoramiento están:

- Compactación
- Vibro flotación
- Precarga

Los efectos de estos métodos que producen en el suelo varían desde aumentar la resistencia al corte, disminuir la compresibilidad para no permitir asentamientos futuros, reducir la permeabilidad por medio de disminuir la relación de vacíos.

#### **2.4.1.2. Físico**

Para la realización de la estabilización de suelo mediante este método es con uso de equipos mecánicos, entre las técnicas de este método se encuentran:

- Mezcla de suelos: Unir dos o más suelos que se complementen con las propiedades físicas faltantes, logrando así obtener un nuevo material de calidad. Lo que se pretende mejorar es la plasticidad del suelo y la granulometría. Pero este método por sí solo no llega a considerar los efectos deseados, por lo que comúnmente es acompañado por una compactación del suelo.
- Estabilización por compactación: Esta técnica se realiza en todas las obras en donde su materia prima es el suelo. El objetivo es aumentar la resistencia al corte para estabilizar el suelo, disminuir la compresibilidad para reducir los asentamientos en el suelo, disminuir la relación de vacíos que existieren para contraer la permeabilidad, así como otras propiedades.

- Utilización de Geotextiles: Los geotextiles son materiales permeables que no se degradan y se emplean básicamente como filtro, control del suelo, transporte de lodos. Estos materiales cumplen diferentes funciones entre ellas impermeabilizar estratos, facilitar el drenaje, permitir la filtración, reforzar la masa del suelo para estabilización del mismo.

#### **2.4.1.3. Químico**

El método químico requiere la utilización de componentes entre los cuales se destacan:

- Cal: Utilizada para disminuir la plasticidad y potencial de hinchamiento de los suelos generando así una estabilidad. Es comúnmente utilizada en suelos arcillosos.
- Cemento Portland: Aumenta la resistencia del suelo, utilizado en suelos arenosos.
- Productos asfálticos: utilizado en material triturado que no tenga cohesión.
- Cloruros: Especialmente utilizado el cloruro de sodio y calcio que se lo emplea en arcillas y limos.
- Estabilización con polímeros: generan una mayor resistencia y permeabilización, generado en carpetas asfálticas necesarias (pgs.29-32).

#### **2.4.2. Control de estabilización**

Utilizar los polímeros como estabilizadores ayuda a mejorar la cohesión y resistencia de suelos, controlando polvos, son amigables con el medio ambiente causando un menor impacto al suelo, no representa riesgo para la salud de las personas por lo que no deben utilizar protectores nasales y reducen los tiempos de construcción.

#### **2.5. Polímeros**

Para Lara, Hernández, Horta, Coronado, & Castaño, (2010) la palabra polímero proviene de dos palabras griegas: “poli”, que significa muchos, y “meros”, que significa parte. Las

moléculas compuestas de al menos dos unidades manométricas diferentes se les llama polímeros. El número de unidades manométricas contenidas en el polímero recibe el nombre de grado de polimerización. La molécula de un polímero final puede constituirse de miles de unidades que se repiten y cada una se denomina "mero o unidad manométrica". Los altos polímeros artificiales son los obtenidos por transformación química de los altos polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular. Los altos polímeros sintéticos son los que se obtienen por vía puramente sintética a partir de sustancias de bajo peso molecular; por ejemplo, el nylon, polietileno, estireno, etc.

Algunos de los "productos geosintéticos" son fabricados mediante polímeros, como son los productos geotextiles y geomembranas que tienen cuatro funciones principales: separación, al evitar o minimizar la mezcla de materiales de diferente granulometría; filtración y drenaje, al evitar la migración de partículas de suelo permitiendo el libre flujo de agua y gases; refuerzo, al soportar tensiones, estabilizar la masa del suelo y proteger geomembranas; e impermeabilización, al formar una barrera que impide el paso de fluidos y partículas de suelo. Los geoproductos se aplican a una amplia variedad de obras, como taludes y muros de tierra, terraplenes en suelos blandos, control de erosión, almacenamientos, cortinas de presas, canales, vías de comunicación, sistemas de filtración y drenaje, disposición de residuos, entre otros (pgs. 162-163).

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el mismo para modificar sus propiedades físicas y químicas, disminuyendo así la susceptibilidad a la oxidación. (Coyoptl & Salinas, 2006, pg14)

### **2.5.1. Características de los polímeros**

- El efecto principal de la adición de polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) mejorando el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.
- Incorporar polímeros con asfaltos hace que aumente la Cohesión interna, disminuya la susceptibilidad térmica, mejora la flexibilidad, elasticidad y el comportamiento de fatiga a bajas temperaturas, también ayuda al aumento de la resistencia por envejecimiento.
- Los polímeros disminuyen de la susceptibilidad térmica al pavimento, se obtienen mezclas rígidas con altas temperaturas de servicio, reduciendo el ahuellamiento; y se llega a obtener mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el nivel de fisuramiento.
- Se limita la exudación del asfalto: a mayor viscosidad de la mezcla, tiene menor tendencia a fluir y mayor elasticidad.

### **2.5.2. Razones por las que se debe utilizar polímeros para estabilización del suelo**

Existen muchas razones por las cuales utilizar asfaltos combinados con polímeros. Algunas de ellas son las siguientes:

- Mejoramiento en la adherencia (polímeros tienen en su composición cadenas cortas), como también en la cohesión.
- Aumento de la trabajabilidad, la compactación.

- el módulo de mezcla también se amplía permitiendo la reducción de hasta el 20% de los espesores por este módulo.
- Los polímeros tienen mayor resistencia al agua.
- Reduce el costo de su mantenimiento a lo largo del tiempo.
- Tiene mayor resistencia al derrame de combustibles y al envejecimiento.

## Capítulo III Metodología

### 3.1. Muestreo

En base a información brindada por parte de la UEES, se procedió a localizar los puntos donde se encuentran los tipos de suelo a investigar. Para fines de la investigación se realizó el muestreo en tres puntos para determinar el potencial de expansión de tres tipos de suelo. Los puntos donde se realizó el muestreo y sus características son los siguientes:

**Tabla 6 Ubicación de las muestras**

Muestra	Ubicación	Coordenadas (Zona 17 S)	
		Norte(m.)	Este(m.)
M-1	Recinto Puente Lucía	9780201.47	613677.09
M-2	El Buijo	9769995.00	627161.00
M-3	Samborondón	9783777.72	641943.70

Debido a la dificultad para la obtención de muestras estas fueron tomadas únicamente de manera alterada. Se procedió a limpiar la superficie del terreno y a realizar una excavación para liberar al material de raíces y material inservible.

Una vez que se ha llegado al nivel deseado se realizó la obtención de muestra, aproximadamente dos sacos en cada punto para poder realizarlos ensayos propuestos.

### **3.2. Caracterización del suelo natural**

Las características del suelo son fundamentales para poder realizar un análisis correcto del mismo. Sabiendo estas características se determina el tipo de suelo, las condiciones que este presenta y sus posibles virtudes y problemas.

Para el problema propuesto, las características determinadas son las siguientes:

- Granulometría
- Humedad natural
- Límites de Atterberg
- Compactación y humedad optima (próctor modificado)
- Potencial de expansión

#### **3.2.1. Granulometría**

La granulometría, como se explicó en el marco teórico, consiste en la evaluación del tamaño de las partículas del suelo.

El análisis granulométrico realizado arroja valores de material pasante del tamiz 200 superiores al cincuenta por ciento, por lo que para realizar una correcta clasificación se debe utilizar los valores de límites de consistencia.

#### **3.2.2. Humedad natural**

Se conoce como humedad de un suelo a la relación entre el peso del agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida:

$$w = 100 \frac{W_w}{W_s}$$

Donde:

$W_w$  = peso del agua de la muestra

$W_s$  = peso seco del suelo

La humedad de las muestras analizadas son las siguientes:

**Tabla 7 Humedad de las muestras analizadas**

Muestra	Humedad (%)
M-1	24.1
M-2	26.1
M-3	33.1

### 3.2.3. Límites de Atterberg

Los Límites de Atterberg como se describió en el marco teórico, nos indican la consistencia que tiene el suelo y se representan a través de humedades de este cuando se encuentra en estado sólido y pasa a estado plástico y líquido.

Estos límites están íntimamente relacionados con la plasticidad del suelo, como Atterberg hizo ver, la plasticidad no es una característica común de todos los suelos sino de los suelos finos y además no es una característica permanente sino circunstancial y dependiente del contenido de agua.

Para el caso en estudio, los límites necesarios son el límite líquido y el límite plástico, y con estos resultados el índice plástico.

En estado natural, es decir sin polímeros, los resultados de límite líquido, plástico e índice de plasticidad de los suelos analizados han sido los siguientes:

**Tabla 8 Límites de Atterberg en suelos naturales**

Muestra	Límite Líquido (LL)	Límite Plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP)
M-1	56	21.08	34.9
M-2	35.7	25.03	10.7
M-3	30.3	9.95	20.3

### 3.2.4. Próctor modificado

Es un ensayo que relaciona la humedad del suelo con su peso unitario seco, describiendo una curva denominada curva de compactación. Este procedimiento se lo realiza en un molde de cuatro o seis pulgadas de diámetro con un pistón de diez libras que cae desde una altura de 18 pulgadas, generando así una energía de compactación de 56000 lb.pie/pie<sup>3</sup> (Próctor modificado AASHTO T-180-A)

Este ensayo se aplica para suelos que poseen el 30 % o menos de sus partículas en peso retenidas en el tamiz 3/4, por lo que para el estudio realizado es aplicable.

El equipo utilizado para el estudio es el siguiente:

- Molde de cuatro pulgadas
- Pistón
- Balanza
- Horno de secado

Al tratarse de suelo de partículas finas, se debe utilizar el material que pasa por el tamiz No. 4, el cual se debe poner dividido en cinco capas y compactarlo con 25 golpes con el pistón de diez libras.

Una vez terminado el proceso de compactación se pesa la muestra, el molde y se calcula la humedad.

El proceso se repite las veces que sea necesario de tal manera que los valores del peso volumétrico suban y bajen formando una curva tipo Gauss.

En el presente estudio se realizó el ensayo próctor modificado para las muestras en su estado natural.

Se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 9 Prueba Próctor Modificado**

Prueba Próctor Modificado		
Muestra	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (Kg/m <sup>3</sup> )
M-1	15.0	1670
M-2	26.0	1425
M-3	9.0	1710

### 3.2.5. Evaluación del potencial expansivo

Para establecer una evaluación de potencial expansivo se puede identificar de las siguientes formas:

- Identificación Mineralógica: realizada mediante métodos y análisis para determinar la composición de los suelos con diferentes métodos como son: difracción por rayos X, análisis térmico diferencial, análisis de absorción de colorantes, análisis químicos, análisis por microscopio electrónico.

- Métodos indirectos de potencial expansivo: consiste en predecir el potencial expansivo del suelo, mediante una forma cualitativa. Se basa en medidas de expansión directa sobre muestras remodeladas en condiciones de humedad y densidad prefijadas.
- Medidas directas de la expansión del suelo: utilizados para medir la potencialidad del suelo en esta tesis. Consiste en medir la expansión del suelo al saturarlo con diferentes presiones aplicadas en la muestra.

Para el presente trabajo de investigación se realizaron ensayos de expansión libre y controlada, con el detalle que se encuentra a continuación.

### **3.2.5.1. Ensayos de hinchamiento**

#### **Ensayo de hinchamiento libre**

Este ensayo determina la presión necesaria para controlar el volumen inicial de la muestra de suelo expansivo. Es decir, permita determinar la fuerza con que se hincha el suelo.

Es el 1% de la elevación máxima para presión nula en relación de la longitud de la probeta al inicio del ensayo.

Las pruebas que se realizan para determinar este ensayo son edométricas o basadas en succión; tienden a simular factores relevantes de fenómenos que se pueden estar dando en el lugar de origen de la muestra. Para lograr este ensayo se han propuesto varias metodologías, con el fin de obtener los resultados esperados. Las principales divergencias pueden ser:

- Magnitud de recarga y secuencias de cargas
- Tamaño de la muestra
- Forma de la muestra
- Valor humedad inicial de la muestra
- Momento de saturación

- Magnitud de la precarga
- Secuencia de carga
- Forma de simular condiciones naturales en el edómetro

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 10 Expansión libre con muestra natural**

Ensayo de expansión libre			
Muestra	Humedad inicial (w%)	Humedad final (w%)	Expansión (%)
M-1	9.76	34.26	10.04
M-2	4.18	33.65	5.87
M-3	11.23	52.5	26.36

### Ensayo de presión de hinchamiento

Este ensayo es aplicado en un laboratorio sobre la muestra de estudio sobre un suelo expansivo para que al contacto con el agua la probeta se mantenga con su volumen inicial, es decir para que la variación de su volumen sea 0.

Se realizó el ensayo obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 11 Ensayo de expansión controlada**

Ensayo de expansión controlada			
Muestra	Humedad inicial (w%)	Humedad final (w%)	Esfuerzo expansivo (Kg/cm <sup>2</sup> )
M-1	9.76	34.26	1.466
M-2	4.18	33.65	0.248
M-3	11.23	52.5	0.947

### 3.3. Caracterización del suelo estabilizado con polímero

#### 3.3.1. Límites de Atterberg

Con la finalidad de determinar cambios en la consistencia del suelo debido a la utilización del polímero se optó por realizar los ensayos de límites de Atterberg con el suelo modificado.

Se esta manera se realizó de acuerdo a las normas los ensayos de límite líquido y límite plástico (ASTM D – 4318 y ASTM D – 427) respectivamente, obteniendo los resultados que se detallan a continuación:

**Tabla 12 Límites del suelo estabilizado con polímero**

<b>Suelo estabilizado (1.5% de polímero)</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Límite Líquido (LL)</b>	<b>Límite Plástico (LP)</b>	<b>Índice de plasticidad (IP)</b>
M-1	44	26.8	17.2
M-2	22.6	16.1	6.5
M-3	21	7.25	13.75

**Tabla 13 Límites del suelo natural**

<b>Muestra</b>	<b>Límite Líquido (LL)</b>	<b>Límite Plástico (LP)</b>	<b>Índice de plasticidad (IP)</b>
M-1	56	21.08	34.9
M-2	35.7	25.03	10.7
M-3	30.3	9.95	20.3

### **3.3.1.1. Próctor modificado**

Al igual que los anteriores ensayos, este se realiza siguiendo las mismas especificaciones del ensayo realizado con suelo natural.

Al suelo se lo ha estabilizado con el valor de 1.5 % al igual que en los límites de Atterberg.

Para el ensayo de próctor modificado se ha utilizado lo especificado en la norma ASTM – 1557 y se ha determinado los siguientes resultados:

**Tabla 14 Prueba Próctor modificado con polímero**

<b>Suelo estabilizado (1.5% de polímero)</b>		
<b>Prueba Próctor Modificado</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad seca máxima (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
M-1	15	1740
M-2	18.5	1525
M-3	12	1780

**Tabla 15 Prueba Próctor modificado en suelo natural**

<b>Prueba Próctor Modificado</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad seca máxima (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
M-1	15.0	1670
M-2	26.0	1425
M-3	9.0	1710

### **3.3.1.2. Ensayos de hinchamiento**

Los ensayos de hinchamiento se los realiza para determinar la expansividad o aumento del volumen en una muestra tomada de suelo cohesivo. Cuando los suelos son expansivos al momento de humedecerse se verifica las condiciones de compactación. Depende de la humedad del suelo para su nivel de hinchamiento, es decir que cuanto más seco este el suelo tiene mayor posibilidad de que se hinche o tienda a colapsar; dependiendo de la presión externa que se aplique sobre el suelo, sea superior o inferior a la presión de hinchamiento.

El cambio de volumen de suelo arcilloso es resultado directo de la disponibilidad y variación de la cantidad de agua que posea.

Cuando se requiere medir la expansividad de un suelo saturado o parcialmente saturado, se recurre a ensayos realizados con el edómetro.

#### **3.3.1.2.1. Ensayo de hinchamiento libre**

Para realizar el ensayo de hinchamiento libre es necesario contar con una muestra inalterada de suelo, colocada en el edómetro. Posteriormente se lo calibra a 0 al lector de deformación y se inunda la muestra, hasta un nivel en que el agua pueda penetrar la pastilla de suelo por la piedra porosa inferior. Se mide el hinchamiento final que se expresa en un porcentaje de espesor inicial de la muestra y se determina el porcentaje de hinchamiento libre.

Como no se puede aplicar presiones sobre esta muestra, se debe colocar el lector de deformación sobre el pistón de carga, con lo cual habrá menos errores en la medida de deformaciones. Una vez que la muestra haya sido inundada después de un tiempo prudencial para que se produzca una expansión, se varía la carga y se obtiene el comportamiento carga –deformación en condiciones de inundación.

Para este ensayo, se realizó una estabilización del suelo expansivo con porcentajes del 0.5 %, 0.75 %, 1.00 % y 1.50 %, arrojando los siguientes resultados:

**Tabla 16 Valores de ensayo de expansión libre en suelo estabilizado**

Suelo estabilizado				
Ensayo de expansión libre				
Muestra	Porcentaje de polímero (%)	Humedad inicial (w%)	Humedad final (w%)	Expansión (%)
M-1	0.5	29.67	42.99	2.27
	0.75	29.64	44.04	1.73
	1.00	28.20	43.47	1.31
	1.50	0.99	12.83	0.85
M-2	0.5	26.06	37.1	1.51
	0.75	17.9	39.79	1
	1	27.95	41.19	0.69
	1.5	29.91	43.57	0.51
M-3	0.5	34.38	51.79	13.88
	0.75	27.14	55	13.03
	1	32.63	59.58	8.87
	1.5	35.08	65.52	7.48

**Tabla 17 Valores de ensayo de expansión libre con suelo natural**

Ensayo de expansión libre			
Muestra	Humedad inicial (w%)	Humedad final (w%)	Expansión (%)
M-1	9.76	34.26	10.04
M-2	4.18	33.65	5.87
M-3	11.23	52.5	26.36

### 3.3.1.2.2. Ensayo de presión de hinchamiento

Este ensayo se lo realiza prácticamente de forma similar al ensayo anterior, con la diferencia de que al medir el hinchamiento de la muestra se deben añadir cargas para no permitirlo. La presión máxima para que no produzca un proceso de hinchamiento se la llama “presión de hinchamiento”.

Una vez que se aplica la presión máxima sobre la muestra se van retirando cargas y se miden los hinchamientos producidos. El hinchamiento bajo carga nula en este tipo de ensayo es inferior al hinchamiento libre (menor a la carga de 0,1 kgs/cm<sup>2</sup>).

En este ensayo el hinchamiento es igual y contrario al movimiento de comprensión que se experimenta con el equipo, producido por la carga aplicada, se realizó el ensayo para cada dosificación de polímero, con los resultados siguientes:

**Tabla 18 Ensayo de expansión controlada en suelo estabilizado**

<b>Suelo estabilizado</b>				
<b>Ensayo de expansión controlada</b>				
<b>Muestra</b>	<b>Porcentaje de polímero (%)</b>	<b>Humedad inicial (w%)</b>	<b>Humedad final (w%)</b>	<b>Esfuerzo expansivo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
M-1	0.5	29.67	42.99	0.321
	0.75	29.64	44.04	0.297
	1.00	28.20	43.47	0.138
	1.50	0.99	12.83	0.087
M-2	0.5	26.06	37.1	0.119
	0.75	17.9	39.79	0.098
	1	27.95	41.19	0.078
	1.5	29.91	43.57	0.071
M-3	0.5	34.38	51.79	0.659
	0.75	27.14	55	0.632
	1	32.63	59.58	0.385
	1.5	35.08	65.52	0.316

**Tabla 19 Ensayo de expansión controlada en suelo natural**

<b>Ensayo de expansión controlada</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Humedad inicial (w%)</b>	<b>Humedad final (w%)</b>	<b>Esfuerzo expansivo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
M-1	9.76	34.26	1.466
M-2	4.18	33.65	0.248
M-3	11.23	52.5	0.947

## **Capítulo IV. Ensayos y resultados**

## CONTENID DE HUMEDAD NATURAL

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía, El Buijo, Samborondón  
**Muestra:** M-1, M-2, M-3  
**Fecha:** Mayo 16/2016

MUESTRA M-1				
Recipiente No.		1	2	3
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	243.5	245.6	244.8
	Recipiente + peso seco	202.6	203.1	201.8
	Peso de agua	40.9	42.5	43
	Peso de recipiente	26.8	27.2	29.9
	Peso seco	175.8	175.9	171.9
Contenido de agua		23.3	24.2	25.0
<b>Humedad natural</b>		<b>24.1</b>		

MUESTRA M-2				
Recipiente No.		4	5	6
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	264.6	267.9	267.8
	Recipiente + peso seco	215.2	217.8	218.6
	Peso de agua	49.4	50.1	49.2
	Peso de recipiente	27.3	26.8	27
	Peso seco	187.9	191	191.6
Contenido de agua		26.3	26.2	25.7
<b>Humedad natural</b>		<b>26.1</b>		

MUESTRA M-3				
Recipiente No.		7	8	9
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	287.5	288.6	284.2
	Recipiente + peso seco	220.3	224.6	221.7
	Peso de agua	67.2	64	62.5
	Peso de recipiente	27.1	27.3	26.9
	Peso seco	193.2	197.3	194.8
Contenido de agua		34.8	32.4	32.1
<b>Humedad natural (w%)</b>		<b>33.1</b>		

$$w\% = \frac{(\text{recipiente} + \text{peso humedo}) - (\text{recipiente} + \text{peso seco})}{(\text{recipiente} + \text{peso seco}) - (\text{recipiente})}$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

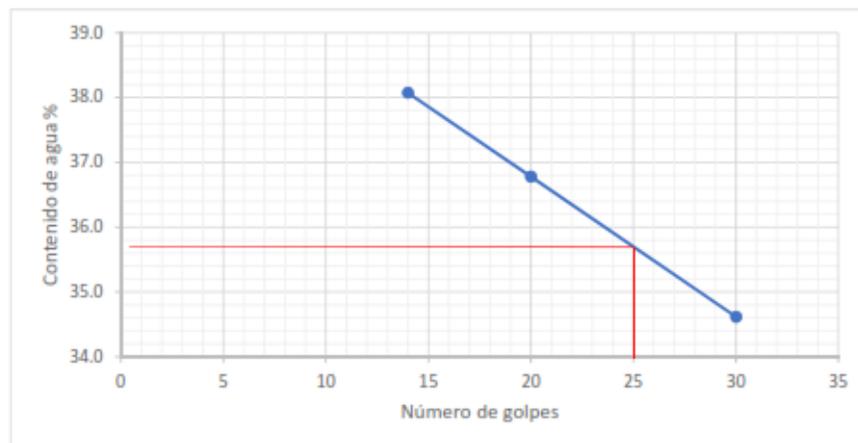
Verificado por: Génesis Ayala A.



### LÍMITES DE ATTERBERG

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2  
**Fecha:** Mayo 16/2016

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente No.		17	20	21
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	15.3	17	15.2
	Recipiente + peso seco	12.57	13.8	12.68
	Peso de agua	2.73	3.2	2.52
	Peso de recipiente	5.4	5.1	5.4
	Peso seco	7.17	8.7	7.28
Contenido de agua %		38.1	36.8	34.6
Número de golpes		14	20	30



LÍMITE PLÁSTICO				
Recipiente No.		12	14	24
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	29.1	28.5	28.9
	Recipiente + peso seco	25.2	24.3	25.3
	Peso de agua	3.9	4.2	3.6
	Peso de recipiente	9.3	9.4	9.2
	Peso seco	15.9	14.9	16.1
Contenido de agua %		24.5	28.2	22.4
Límite plástico		25.03		

**LL =** 35.7                      **IP =** 10.7  
**LP =** 25.03                    **SUCS :** CL

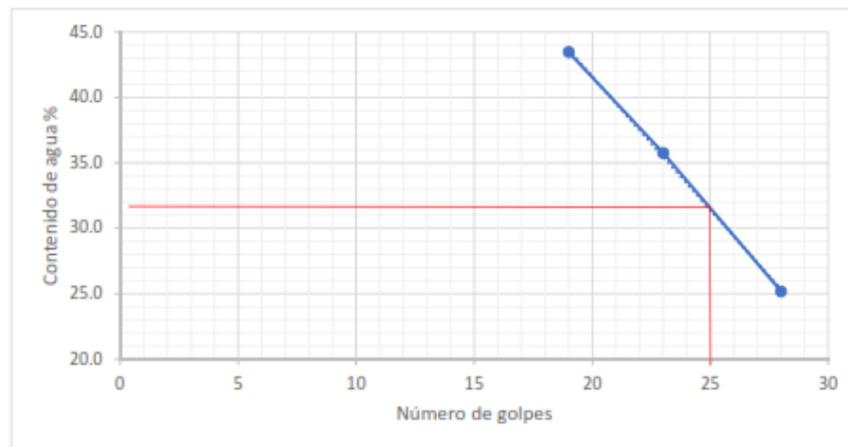
**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Realizado por:** G.A.S.P.                                      **Verificado por:** Génesis Ayala A.

### LÍMITES DE ATTERBERG

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3  
**Fecha:** Mayo 16/2016

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente No.		S	X	R
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	22.2	22.6	22.7
	Recipiente + peso seco	17.2	18.2	19.3
	Peso de agua	5	4.4	3.4
	Peso de recipiente	5.7	5.9	5.8
	Peso seco	11.5	12.3	13.5
Contenido de agua %		43.5	35.8	25.2
Número de golpes		19	23	28



LÍMITE PLÁSTICO				
Recipiente No.		CC	CV	CN
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	31.3	31.2	31.3
	Recipiente + peso seco	29.3	29.1	29.4
	Peso de agua	2	2.1	1.9
	Peso de recipiente	9.1	9.2	9.2
	Peso seco	20.2	19.9	20.2
Contenido de agua %		9.9	10.6	9.4
Límite plástico		9.95		

**LL =** 30.3                      **IP =** 20.3  
**LP =** 9.95                      **SUCS :** CL

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

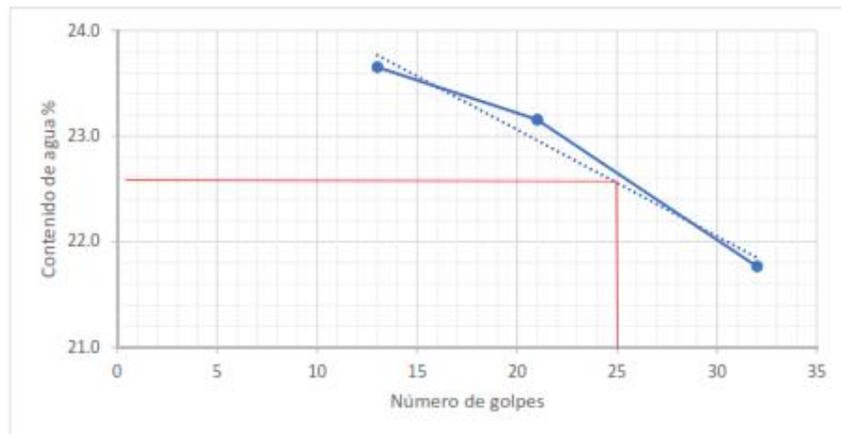
Verificado por: Génesis Ayala A.



### LIMITES DE ATTERBERG

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2/polimero 1.5 %  
**Fecha:** Mayo 16/2016

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente No.		U	I	O
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	16.8	16.9	16.7
	Recipiente + peso seco	14.6	14.7	14.68
	Peso de agua	2.2	2.2	2.02
	Peso de recipiente	5.3	5.2	5.4
	Peso seco	9.3	9.5	9.28
Contenido de agua %		23.7	23.2	21.8
Número de golpes		13	21	32



LÍMITE PLÁSTICO				
Recipiente No.		N	NN	LM
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	30.6	30	30.4
	Recipiente + peso seco	27.3	27.35	27.6
	Peso de agua	3.3	2.65	2.8
	Peso de recipiente	9.3	9.4	9.2
	Peso seco	18	17.95	18.4
Contenido de agua %		18.3	14.8	15.2
Límite plástico		16.10		

**LL =** 22.6                      **IP =** 6.5  
**LP =** 16.10                      **SUCS :** CL

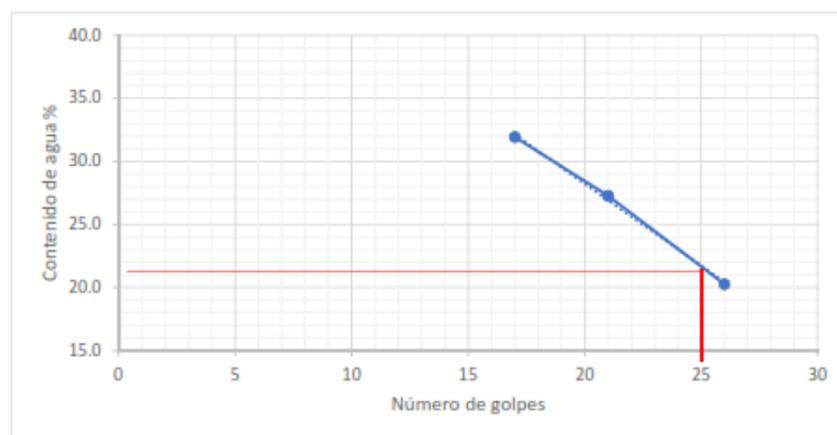
**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Realizado por:** G.A.S.P.                      **Verificado por:** Génesis Ayala A.

### LIMITES DE ATTERBERG

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3/polimero 1.5 %  
**Fecha:** Mayo 16/2016

LÍMITE LÍQUIDO				
Recipiente No.		SS	XC	DF
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	24.7	24.1	24.2
	Recipiente + peso seco	20.1	20.2	21.1
	Peso de agua	4.6	3.9	3.1
	Peso de recipiente	5.7	5.9	5.8
	Peso seco	14.4	14.3	15.3
Contenido de agua %		31.9	27.3	20.3
Número de golpes		17	21	26



LÍMITE PLÁSTICO				
Recipiente No.		C1	C2	C5
Peso en gramos (g)	Recipiente + peso humedo	32.4	32.6	32.7
	Recipiente + peso seco	30.2	30.15	30.3
	Peso de agua	2.2	2.45	2.4
	Peso de recipiente	9	9.1	9.03
	Peso seco	21.2	21.05	21.27
Contenido de agua %		10.4	11.6	10.3
Límite plástico		7.25		

**LL =** 21                                      **IP =** 13.8  
**LP =** 7.25                                    **SUCS :** CL

Observaciones: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

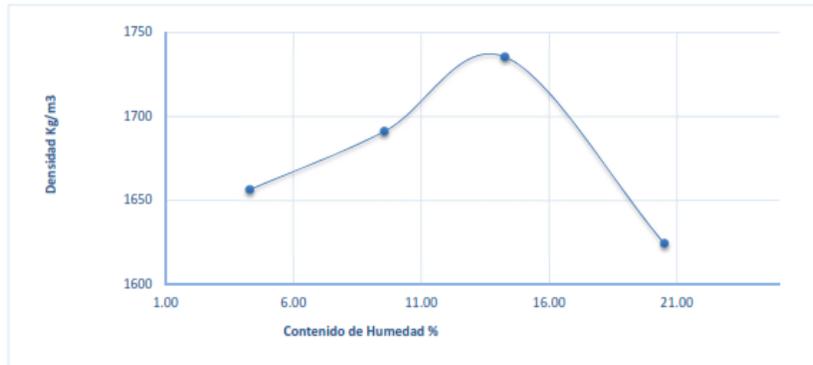
Realizado por: G.A.S.P.                                      Verificado por: Génesis Ayala A.

PROCTOR MODIFICADO												
VOLUMEN DEL CILINDRO:	0.000944	m <sup>3</sup>	PROYECTO:	Tesis de grado								
PESO DEL CILINDRO:	4.300	kg	MUESTRA:	M-1								
GOLPES POR CAPA:	25		UBICACIÓN:	Recinto Puente Lucía								
NÚMERO DE CAPAS:	5		POLÍMERO:	0.00%								
Cantidad de agua	Recipiente	Recipiente e + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	7	298.6	285.00	28.80	13.60	256.20	5.31	5.814	1.514	1.053	1.438	1523
130	14	356.6	324.50	30.90	32.10	293.60	10.93	6.005	1.705	1.109	1.537	1628
260	x	220.2	193.40	22.70	26.80	170.70	15.70	6.113	1.813	1.157	1.567	1660
390	41	259.3	216.30	22.50	43.00	193.80	22.19	6.071	1.771	1.222	1.449	1535
CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD:				<u>15.00</u> %								
DENSIDAD SECA MÁXIMA:				<u>1670</u> kg/m <sup>3</sup>								
OBSERVACIONES:												
Realizado por: G.A.S.P.						Verificado por: Génesis Ayala A.						

**PROCTOR MODIFICADO**

<b>VOLUMEN DEL CILINDRO:</b>	0.000944	m <sup>3</sup>	<b>PROYECTO:</b>	Tesis de grado
<b>PESO DEL CILINDRO:</b>	4.300	kg	<b>MUESTRA:</b>	M-1
<b>GOLPES POR CAPA:</b>	25		<b>UBICACIÓN:</b>	Recinto Puente Lucía
<b>NÚMERO DE CAPAS:</b>	5		<b>POLÍMERO:</b>	1.50%

Cantidad de agua	Recipiente	Recipiente + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	vo	277.8	267.60	30.30	10.20	237.30	4.30	5.931	1.631	1.043	1.564	1657
130	iii	302.9	279.10	30.10	23.80	249.00	9.56	6.049	1.749	1.096	1.596	1691
260	q	228.7	203.90	30.10	24.80	173.80	14.27	6.172	1.872	1.143	1.638	1735
390	10	272.0	230.80	29.90	41.20	200.90	20.51	6.148	1.848	1.205	1.534	1624



CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD: 15.00 %

DENSIDAD SECA MÁXIMA: 1740 kg/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

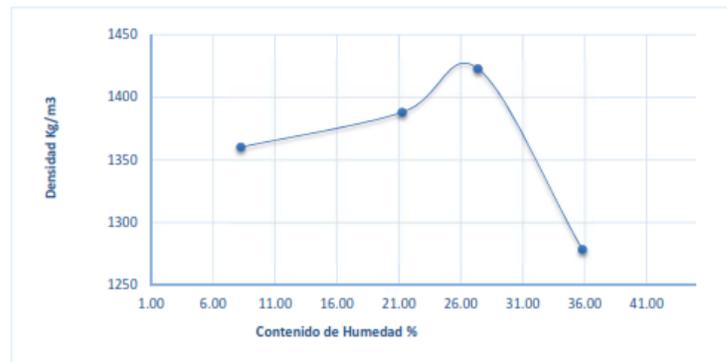
Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por: Génesis Ayala A.

**PROCTOR MODIFICADO**

VOLUMEN DEL CILINDRO:	0.000944	m <sup>3</sup>	PROYECTO:	Tesis de grado
PESO DEL CILINDRO:	4.300	kg	MUESTRA:	M-2
GOLPES POR CAPA:	25		UBICACIÓN:	El Buijo
NÚMERO DE CAPAS:	5		POLÍMERO:	0.00%

Cantidad de agua	Recipiente	Recipient e + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	2	27.5	25.90	6.50	1.60	19.40	8.25	5.690	1.390	1.082	1.284	1360
170	14	44.4	38.00	7.90	6.40	30.10	21.26	5.889	1.589	1.213	1.310	1388
340	24	64.4	52.00	6.70	12.40	45.30	27.37	6.011	1.711	1.274	1.343	1423
510	5	48.3	37.70	8.10	10.60	29.60	35.81	5.939	1.639	1.358	1.207	1278



CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD: 26.00 %

DENSIDAD SECA MÁXIMA: 1425 kg/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por: Génesis Ayala A.

<b>PROCTOR MODIFICADO</b>												
<b>VOLUMEN DEL CILINDRO:</b>		0.000944		m <sup>3</sup>	<b>PROYECTO:</b>		Tesis de grado					
<b>PESO DEL CILINDRO:</b>		4.300		kg	<b>MUESTRA:</b>		M-2					
<b>GOLPES POR CAPA:</b>		25			<b>UBICACIÓN:</b>		El Buijo					
<b>NÚMERO DE CAPAS:</b>		5			<b>POLÍMERO:</b>		1.50%					
Cantidad de agua	Recipiente	Recipiente + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	17	201.5	188.00	28.50	13.50	159.50	8.46	5.702	1.402	1.085	1.293	1369
130	36	222.2	199.30	26.70	22.90	172.60	13.27	5.901	1.601	1.133	1.413	1497
260	a	165.3	140.60	22.40	24.70	118.20	20.90	6.040	1.740	1.209	1.439	1525
390	mk	230.0	184.90	23.20	45.10	161.70	27.89	5.956	1.656	1.279	1.295	1372

**CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD:** 18.50 %

**DENSIDAD SECA MÁXIMA:** 1525 kg/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

Realizado por: G.A.S.P.
Verificado por: Génesis Ayala A.

PROCTOR MODIFICADO												
VOLUMEN DEL CILINDRO:		0.000944		m <sup>3</sup>	PROYECTO:		Tesis de grado					
PESO DEL CILINDRO:		4.300		kg	MUESTRA:		M-3					
GOLPES POR CAPA:		25			UBICACIÓN:		Samborondón					
NÚMERO DE CAPAS:		5			POLÍMERO:		0.00%					
Cantidad de agua	Recipiente	Recipiente e + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	vo	89.6	86.90	8.10	2.70	78.80	3.43	5.886	1.586	1.034	1.533	1624
120	iii	63.5	60.00	7.70	3.50	52.30	6.69	6.004	1.704	1.067	1.597	1692
240	2	60.7	55.30	6.50	5.40	48.80	11.07	6.086	1.786	1.111	1.608	1703
360	b4	61.0	53.60	7.90	7.40	45.70	16.19	6.061	1.761	1.162	1.516	1605

CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD: 9.00 %

DENSIDAD SECA MÁXIMA: 1710 kg/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

Realizado por: G.A.S.P. Verificado por: Génesis Ayala A.

PROCTOR MODIFICADO												
VOLUMEN DEL CILINDRO:		0.000944 m <sup>3</sup>		PROYECTO:		Tesis de grado						
PESO DEL CILINDRO:		4.300 kg		MUESTRA:		M-3						
GOLPES POR CAPA:		25		UBICACIÓN:		Samborondón						
NÚMERO DE CAPAS:		5		POLÍMERO:		1.50%						
Cantidad de agua	Recipiente	Recipiente + peso húmedo	Recipiente + peso seco	Peso de recipiente	Peso de agua	Peso seco	Humedad	Peso cilindro + suelo húmedo	Peso suelo húmedo	1 + w/100	Peso suelo seco	Densidad seca
cm <sup>3</sup>	Nº	g.	g.	g.	g.	g.	%	kg	kg		kg	kg/m <sup>3</sup>
en	14	318.1	307.30	23.20	10.80	284.10	3.80	5.893	1.593	1.038	1.535	1626
120	14	301.4	281.70	31.90	19.70	249.80	7.89	6.061	1.761	1.079	1.632	1729
240	13	271.4	243.80	29.10	27.60	214.70	12.86	6.197	1.897	1.129	1.681	1781
360	5	289.7	250.30	29.80	39.40	220.50	17.87	6.186	1.886	1.179	1.600	1695

CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD: 12.00 %

DENSIDAD SECA MÁXIMA: 1780 kg/m<sup>3</sup>

OBSERVACIONES:

Realizado por: G.A.S.P. Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>484.80</u>	Wh + Rec = <u>155.90</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>112.90</u>
Wh = <u>91.10</u>	- Rec = <u>31.00</u>
Ws = <u>81.90</u>	Wh = <u>124.90</u>
P. agua Ww = <u>9.20</u>	Ws = <u>81.90</u>
w = Ww/Ws = <u>11.23</u> %	P. agua Ww = <u>43.00</u>
	w = Ww/Ws = <u>52.50</u> %
Wi = <u>11.23</u> %	Wf = <u>52.50</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{3.000 \times 10}{31.669}$ = 0.947 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>490.00</u>	Wh + Rec = <u>145.90</u>
- Anillo = <u>395.50</u>	Ws + Rec = <u>116.40</u>
Wh = <u>94.50</u>	- Rec = <u>30.30</u>
Ws = <u>86.10</u>	Wh = <u>115.60</u>
P. agua Ww = <u>8.40</u>	Ws = <u>86.10</u>
w = Ww/Ws = <u>9.76</u> %	P. agua Ww = <u>29.50</u>
Wi = <u>9.76</u> %	w = Ww/Ws <u>34.26</u> %
	Wf = <u>34.26</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{4.644 \times 10}{31.669} = 1.466$ kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>490.00</u>	Wh + Rec = <u>154.80</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>123.40</u>
Wh = <u>97.20</u>	- Rec = <u>30.10</u>
Ws = <u>93.30</u>	Wh = <u>124.70</u>
P. agua Ww = <u>3.90</u>	Ws = <u>93.30</u>
w = Ww/Ws = <u>4.18</u> %	P. agua Ww = <u>31.40</u>
Wi = <u>4.18</u> %	w = Ww/Ws <u>33.65</u> %
	Wf = <u>33.65</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.786 \times 10}{31.669}$ = 0.248 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 0.50%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>491.90</u>	Wh + Rec = <u>136.80</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>107.90</u>
Wh = <u>98.20</u>	- Rec = <u>30.00</u>
Ws = <u>77.90</u>	Wh = <u>106.80</u>
P. agua Ww = <u>20.30</u>	Ws = <u>77.90</u>
w = Ww/Ws = <u>26.06</u> %	P. agua Ww = <u>28.90</u>
Wi = <u>26.06</u> %	w = Ww/Ws <u>37.10</u> %
	Wf = <u>37.10</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.375 \times 10}{31.669} = 0.119$ kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>484.30</u>	Wh + Rec = <u>127.80</u>
- Anillo = <u>395.30</u>	Ws + Rec = <u>97.80</u>
Wh = <u>89.00</u>	- Rec = <u>22.40</u>
Ws = <u>75.40</u>	Wh = <u>105.40</u>
P. agua Ww = <u>13.60</u>	Ws = <u>75.40</u>
w = Ww/Ws = <u>18.04</u> %	P. agua Ww = <u>30.00</u>
Wi = <u>18.04</u> %	w = Ww/Ws <u>39.79</u> %
	Wf = <u>39.79</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.310 \times 10}{31.669}$ = 0.098 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 1%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO		DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>586.70</u>		Wh + Rec = <u>129.00</u>
- Anillo = <u>490.10</u>		Ws + Rec = <u>97.90</u>
Wh = <u>96.60</u>		- Rec = <u>22.40</u>
Ws = <u>75.50</u>		Wh = <u>106.60</u>
P. agua Ww = <u>21.10</u>		Ws = <u>75.50</u>
w = Ww/Ws = <u>27.95</u> %		P. agua Ww = <u>31.10</u>
		w = Ww/Ws <u>41.19</u> %
Wi = <u>27.95</u> %		Wf = <u>41.19</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.246 \times 10}{31.669} = 0.078$ kg/cm <sup>2</sup>		

Observaciones:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 1.50%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>583.70</u>	Wh + Rec = <u>138.00</u>
- Anillo = <u>487.70</u>	Ws + Rec = <u>105.80</u>
Wh = <u>96.60</u>	- Rec = <u>31.90</u>
Ws = <u>73.90</u>	Wh = <u>106.10</u>
P. agua Ww = <u>22.10</u>	Ws = <u>73.90</u>
w = Ww/Ws = <u>29.91</u> %	P. agua Ww = <u>32.20</u>
Wi = <u>29.91</u> %	w = Ww/Ws <u>43.57</u> %
	Wf = <u>43.57</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.225 \times 10}{31.669} =$	0.071 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1 Polímero 0.50%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>488.10</u>	Wh + Rec = <u>149.30</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>118.00</u>
Wh = <u>94.40</u>	- Rec = <u>45.20</u>
Ws = <u>86.10</u>	Wh = <u>104.10</u>
P. agua Ww = <u>21.60</u>	Ws = <u>72.80</u>
w = Ww/Ws = <u>29.67</u> %	P. agua Ww = <u>31.30</u>
Wi = <u>29.67</u> %	w = Ww/Ws <u>42.99</u> %
	Wf = <u>42.99</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{4.644 \times 10}{31.669} = 1.466$ kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>488.90</u>	Wh + Rec = <u>150.00</u>
- Anillo = <u>395.30</u>	Ws + Rec = <u>118.20</u>
Wh = <u>93.60</u>	- Rec = <u>46.00</u>
Ws = <u>72.20</u>	Wh = <u>104.00</u>
P. agua Ww = <u>21.40</u>	Ws = <u>72.20</u>
w = Ww/Ws = <u>29.64</u> %	P. agua Ww = <u>31.80</u>
Wi = <u>29.64</u> %	w = Ww/Ws <u>44.04</u> %
	Wf = <u>44.04</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.942 \times 10}{31.669} = 0.297 \text{ kg/cm}^2$	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1 Polímero 1%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>486.90</u>	Wh + Rec = <u>126.80</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>95.20</u>
Wh = <u>93.20</u>	- Rec = <u>22.50</u>
Ws = <u>72.70</u>	Wh = <u>104.30</u>
P. agua Ww = <u>20.50</u>	Ws = <u>72.70</u>
w = Ww/Ws = <u>28.2</u> %	P. agua Ww = <u>31.60</u>
Wi = <u>28.2</u> %	w = Ww/Ws <u>43.47</u> %
	Wf = <u>43.47</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{0.437 \times 10}{31.669} = 0.138 \text{ kg/cm}^2$	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1 Polímero 1.5%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO		DESPUÉS DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	<u>487.40</u>	Wh + Rec =	<u>132.70</u>
- Anillo =	<u>395.30</u>	Ws + Rec =	<u>121.00</u>
Wh =	<u>92.10</u>	- Rec =	<u>29.80</u>
Ws =	<u>91.20</u>	Wh =	<u>102.90</u>
P. agua Ww =	<u>0.90</u>	Ws =	<u>91.20</u>
w = Ww/Ws =	<u>0.99</u> %	P. agua Ww =	<u>11.70</u>
Wi =	<u>0.99</u> %	w = Ww/Ws	<u>12.83</u> %
		Wf =	<u>12.83</u> %
Esfuerzo Expansivo =	<u>0.275 x 10</u>	=	0.087 kg/cm <sup>2</sup>
	31.669		

Observaciones: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P. Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 0.50%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>484.00</u>	Wh + Rec = <u>132.00</u>
- Anillo = <u>393.70</u>	Ws + Rec = <u>97.20</u>
Wh = <u>90.30</u>	- Rec = <u>30.00</u>
Ws = <u>67.20</u>	Wh = <u>102.00</u>
P. agua Ww = <u>23.10</u>	Ws = <u>67.20</u>
w = Ww/Ws = <u>34.38</u> %	P. agua Ww = <u>34.80</u>
Wi = <u>34.38</u> %	w = Ww/Ws <u>51.79</u> %
	Wf = <u>51.79</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{2.088 \times 10}{31.669} = 0.659 \text{ kg/cm}^2$	

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>484.30</u>	Wh + Rec = <u>131.20</u>
- Anillo = <u>395.30</u>	Ws + Rec = <u>92.70</u>
Wh = <u>89.00</u>	- Rec = <u>22.70</u>
Ws = <u>70.00</u>	Wh = <u>108.50</u>
P. agua Ww = <u>19.00</u>	Ws = <u>70.00</u>
w = Ww/Ws = <u>27.14</u> %	P. agua Ww = <u>38.50</u>
Wi = <u>27.14</u> %	w = Ww/Ws <u>55.00</u> %
	Wf = <u>55.00</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{2.000 \times 10}{31.669}$	= 0.632 kg/cm <sup>2</sup>

Observaciones:

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P. Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 1%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO	DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>578.70</u>	Wh + Rec = <u>129.00</u>
- Anillo = <u>490.10</u>	Ws + Rec = <u>89.20</u>
Wh = <u>88.60</u>	- Rec = <u>22.40</u>
Ws = <u>66.80</u>	Wh = <u>106.60</u>
P. agua Ww = <u>21.80</u>	Ws = <u>66.80</u>
w = Ww/Ws = <u>32.63</u> %	P. agua Ww = <u>39.80</u>
Wi = <u>32.63</u> %	w = Ww/Ws <u>59.58</u> %
	Wf = <u>59.58</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{1.219 \times 10}{31.669}$ = 0.385 kg/cm <sup>2</sup>	

Observaciones:

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

## ENSAYO DE EXPANSION CONTROLADA

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 1.5%  
**Fecha:**

### HUMEDAD

ANTES DEL ENSAYO		DESPUÉS DEL ENSAYO
Wh + Anillo = <u>577.50</u>		Wh + Rec = <u>130.80</u>
- Anillo = <u>487.40</u>		Ws + Rec = <u>89.10</u>
Wh = <u>90.10</u>		- Rec = <u>22.40</u>
Ws = <u>66.70</u>		Wh = <u>108.40</u>
P. agua Ww = <u>23.40</u>		Ws = <u>66.70</u>
w= Ww/Ws = <u>35.08</u> %		P. agua Ww = <u>41.70</u>
		w= Ww/Ws <u>62.52</u> %
Wi = <u>35.08</u> %		Wf = <u>62.52</u> %
Esfuerzo Expansivo = $\frac{1.000 \times 10}{31.669} = 0.316 \text{ kg/cm}^2$		

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

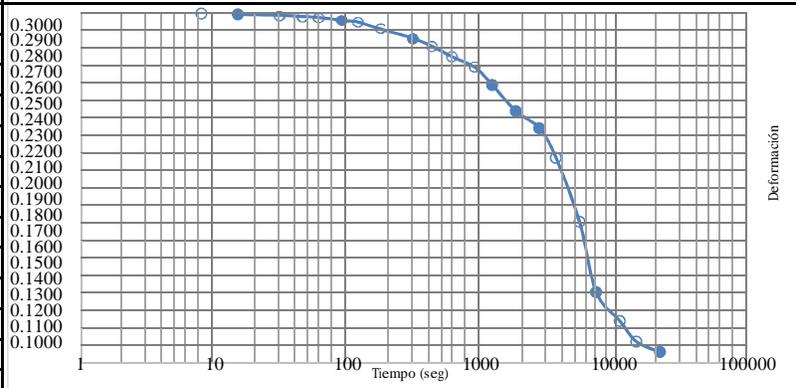
Realizado por: G.A.S.P.                      Verificado por: Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	12:35	0.3000
8 "		0.2997
15 "		0.2992
30 "		0.2987
45 "		0.2980
1 min	12:36	0.2974
1 1/2 "	12:35	0.2958
2 "	12:37	0.2947
3 "	12:38	0.2905
5 "	12:40	0.2858
7 "	12:42	0.2811
10 "	12:45	0.2750
15 "	12:50	0.2686
20 "	12:55	0.2588
30 "	13:05	0.2439
45 "	13:20	0.2341
1 hora	13:35	0.2171
1 1/2 "	14:05	0.1806
2 "	14:35	0.1403
3 "	15:35	0.1238
4 "	16:35	0.1119
6 "	18:35	0.1060
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	484.80	Wh + Rec =	155.90
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	112.90
Wh =	91.10	- Rec =	31.00
Ws =	81.90	Wh =	124.90
P.agua Ww =	9.20	Ws =	81.90

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.1977}{0.75} \times 100 = 26.36 \%$$

Observaciones:

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucía  
**Muestra:** M-1  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"	GRÁFICO			
0 seg	11:55	0.2000				
8 "		0.1998				
15 "		0.1996				
30 "		0.1988				
45 "		0.1974				
1 min	11:56	0.1961				
1 1/2 "	11:55	0.1938				
2 "	11:57	0.1914				
3 "	11:58	0.1868				
5 "	12:00	0.1790				
7 "	12:02	0.1720				
10 "	12:05	0.1674				
15 "	12:10	0.1600				
20 "	12:15	0.1511				
30 "	12:25	0.1406			<b>HUMEDAD</b>	
45 "	12:40	0.1364			ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO
1 hora	12:55	0.1350			Wh + Anillo = 490.00	Wh + Rec = 145.90
1 1/2 "	13:25	0.1326			- Anillo = 395.50	Ws + Rec = 116.40
2 "	13:55	0.1300			Wh = 94.50	- Rec = 30.30
3 "	14:55	0.1274			Ws = 86.10	Wh = 115.60
4 "	15:55	0.1263	P.agua Ww = 8.40	Ws = 86.10		
6 "	17:55	0.1257				
9 "						
12 "						
24 "	11:55	0.1247				
36 "						

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0753 \times 100}{0.75} = 26.36 \%$$

Observaciones:

---



---



---

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado

**Ubicación:** El Buijo

**Muestra:** M-2

**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"	GRÁFICO	
0 seg	10:50	0.2000		
8 "		0.1998		
15 "		0.1991		
30 "		0.1985		
45 "		0.1956		
1 min	10:51	0.1934		
1 1/2 "	10:50	0.1896		
2 "	10:52	0.1858		
3 "	10:53	0.1858		
5 "	10:55	0.1770		
7 "	10:57	0.1733		
10 "	11:00	0.1706		
15 "	11:05	0.1691		
20 "	11:10	0.1679		
30 "	11:20	0.1660		
45 "	11:35	0.1649		
1 hora	11:50	0.1638		
1 1/2 "	12:20	0.1628		
2 "	12:50	0.1619		
3 "	13:50	0.1608		
4 "	14:50	0.1599		
6 "	16:50	0.1589		
9 "	19:50	0.1583		
12 "				
24 "	10:50	0.1560		
36 "				

**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	490.00	Wh + Rec =	154.80
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	123.40
Wh =	97.20	- Rec =	30.10
Ws =	93.30	Wh =	124.70
P.agua Ww =	3.90	Ws =	93.30

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0440 \times 100}{0.75} = 5.87 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

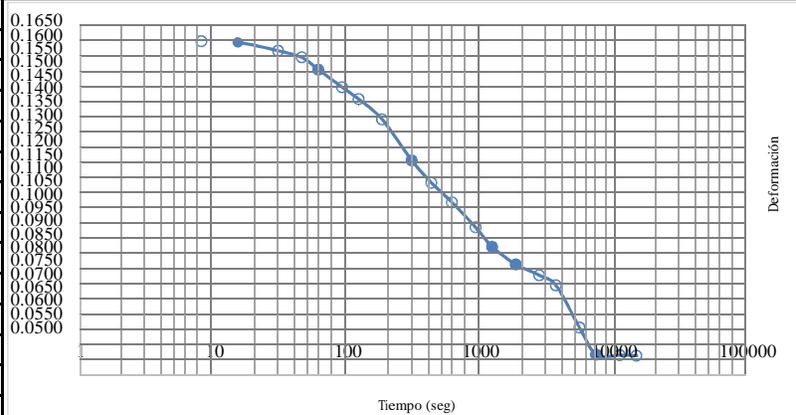
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 0.50%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	9:20	0.1600
8 "		0.1593
15 "		0.1589
30 "		0.1562
45 "		0.1540
1 min	9:21	0.1500
1 1/2 "	9:20	0.1442
2 "	9:22	0.1403
3 "	9:23	0.1336
5 "	9:25	0.1201
7 "	9:27	0.1128
10 "	9:30	0.1063
15 "	9:35	0.0981
20 "	9:40	0.0917
30 "	9:50	0.0859
45 "	10:05	0.0823
1 hora	10:20	0.0790
1 1/2 "	10:50	0.0651
2 "	11:20	0.0562
3 "	12:20	0.0560
4 "	13:20	0.0559
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	484.00	Wh + Rec =	132.00
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	97.20
Wh =	90.30	- Rec =	30.10
Ws =	67.20	Wh =	102.00
P.agua Ww =	23.10	Ws =	67.20

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.1041 \times 100}{0.75} = 13.88 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

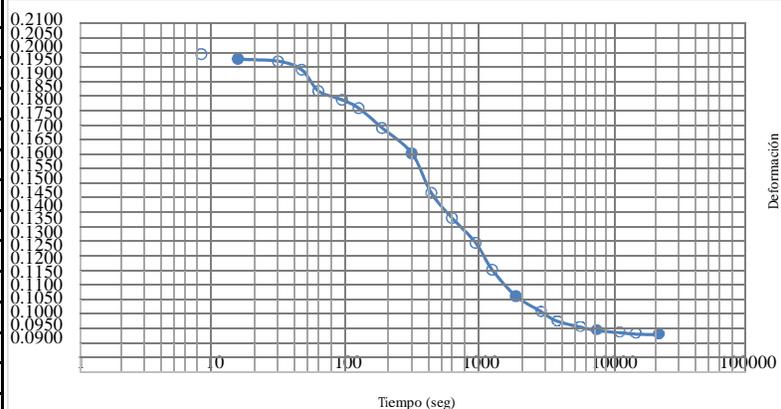
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	10:15	0.2000
8 "		0.1987
15 "		0.1970
30 "		0.1962
45 "		0.1933
1 min	10:16	0.1860
1 1/2 "	10:15	0.1830
2 "	10:17	0.1801
3 "	10:18	0.1733
5 "	10:20	0.1646
7 "	10:22	0.1510
10 "	10:25	0.1424
15 "	10:30	0.1339
20 "	10:35	0.1246
30 "	10:45	0.1156
45 "	11:00	0.1106
1 hora	11:15	0.1071
1 1/2 "	11:45	0.1050
2 "	12:15	0.1038
3 "	13:15	0.1030
4 "	14:15	0.1025
6 "	16:15	0.1023
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	484.00	Wh + Rec =	131.20
- Anillo =	395.30	Ws + Rec =	92.70
Wh =	89.00	- Rec =	22.70
Ws =	70.00	Wh =	108.50
P.agua Ww =	<del>19.00</del>	Ws =	<del>70.00</del>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0977 \times 100}{0.75} = 13.03 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

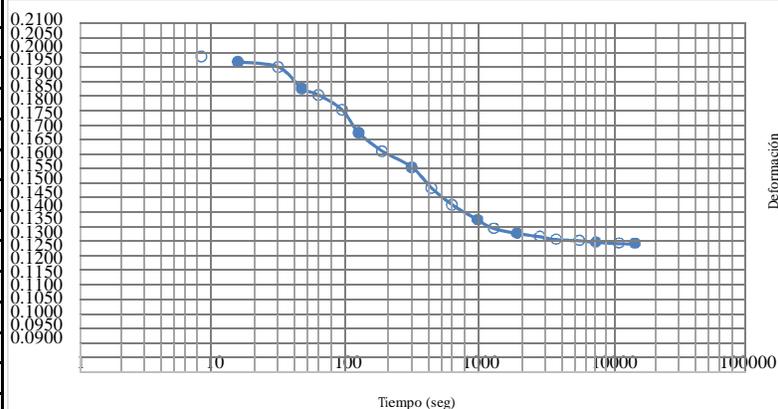
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 1%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	11:20	0.2000
8 "		0.1979
15 "		0.1961
30 "		0.1943
45 "		0.1870
1 min	11:21	0.1847
1 1/2 "	11:20	0.1796
2 "	11:22	0.1718
3 "	11:23	0.1654
5 "	11:25	0.1599
7 "	11:27	0.1528
10 "	11:30	0.1470
15 "	11:35	0.1422
20 "	11:40	0.1390
30 "	11:50	0.1372
45 "	12:05	0.1360
1 hora	12:20	0.1350
1 1/2 "	12:50	0.1346
2 "	13:20	0.1340
3 "	14:20	0.1336
4 "	15:20	0.1335
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	578.70	Wh + Rec =	129.00
- Anillo =	490.10	Ws + Rec =	89.20
Wh =	88.60	- Rec =	22.40
Ws =	66.80	Wh =	106.60
P.agua Ww =	21.80	Ws =	66.80

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0665 \times 100}{0.75} = 8.87 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

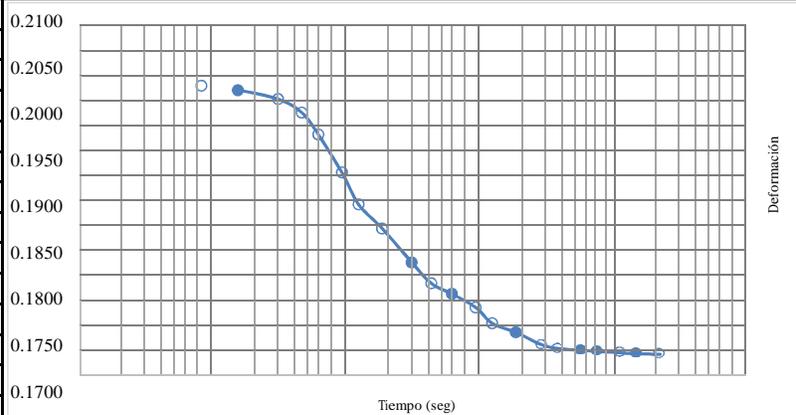
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Samborondón  
**Muestra:** M-3 Polímero 1.5%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	12:50	0.2000
8 "		0.1977
15 "		0.1968
30 "		0.1950
45 "		0.1923
1 min	12:51	0.1879
1 1/2 "	12:50	0.1803
2 "	12:52	0.1739
3 "	12:53	0.1691
5 "	12:55	0.1623
7 "	12:57	0.1581
10 "	13:00	0.1560
15 "	13:05	0.1533
20 "	13:10	0.1501
30 "	13:20	0.1483
45 "	13:35	0.1460
1 hora	13:50	0.1451
1 1/2 "	14:20	0.1447
2 "	14:50	0.1445
3 "	15:50	0.1442
4 "	16:50	0.1440
6 "	18:50	0.1439
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	577.50	Wh + Rec =	130.80
- Anillo =	487.40	Ws + Rec =	89.10
Wh =	90.10	- Rec =	22.40
Ws =	66.70	Wh =	108.40
P.agua Ww =	<u>23.40</u>	Ws =	<u>66.70</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0561 \times 100}{0.75} = 7.48 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

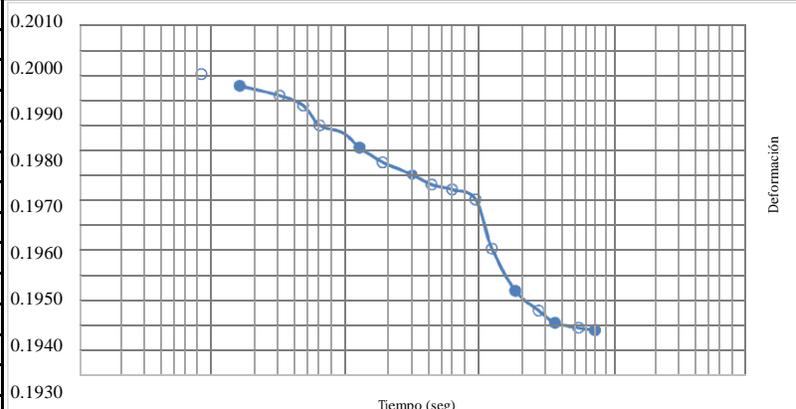
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 0.5%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	12:25	0.2000
8 "		0.1990
15 "		0.1986
30 "		0.1982
45 "		0.1978
1 min	12:26	0.1970
1 1/2 "	12:25	0.1967
2 "	12:27	0.1961
3 "	12:28	0.1955
5 "	12:30	0.1950
7 "	12:32	0.1946
10 "	12:35	0.1944
15 "	12:40	0.1940
20 "	12:45	0.1920
30 "	12:55	0.1903
45 "	13:10	0.1895
1 hora	13:25	0.1890
1 1/2 "	13:55	0.1888
2 "	14:25	0.1887
3 "		
4 "		
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	491.90	Wh + Rec =	136.80
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	107.90
Wh =	98.20	- Rec =	30.00
Ws =	77.90	Wh =	106.80
P.agua Ww =	<u>20.30</u>	Ws =	<u>77.90</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0113 \times 100}{0.75} = 1.51 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

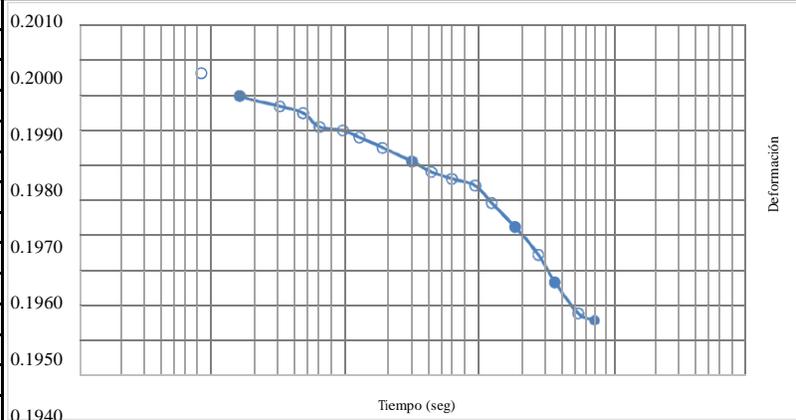
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	12:40	0.2000
8 "		0.1996
15 "		0.1990
30 "		0.1987
45 "		0.1985
1 min	12:41	0.1981
1 1/2 "	12:40	0.1980
2 "	12:42	0.1978
3 "	12:43	0.1975
5 "	12:45	0.1971
7 "	12:47	0.1968
10 "	12:50	0.1966
15 "	12:55	0.1964
20 "	13:00	0.1959
30 "	13:10	0.1952
45 "	13:25	0.1944
1 hora	13:40	0.1936
1 1/2 "	14:10	0.1927
2 "	14:40	0.1925
3 "		
4 "		
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	484.20	Wh + Rec =	127.80
- Anillo =	395.30	Ws + Rec =	97.80
Wh =	88.90	- Rec =	22.40
Ws =	75.40	Wh =	105.40
P.agua Ww =	<u>13.50</u>	Ws =	<u>75.40</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0075 \times 100}{0.75} = 1.00 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

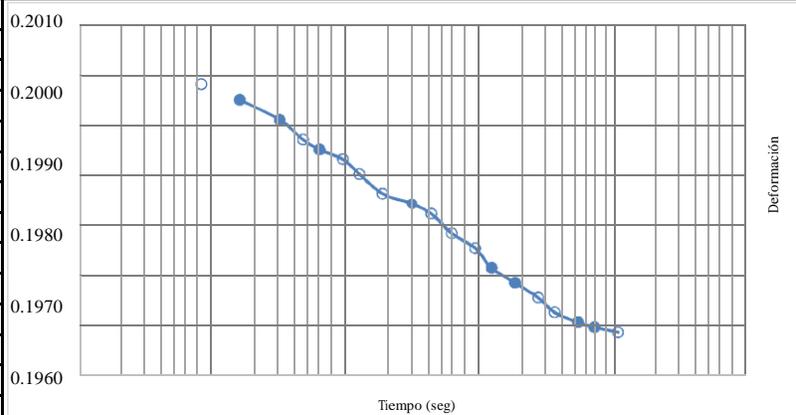
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 1%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	14:20	0.2000
8 "		0.1998
15 "		0.1995
30 "		0.1991
45 "		0.1987
1 min	14:21	0.1985
1 1/2 "	14:20	0.1983
2 "	14:22	0.1980
3 "	14:23	0.1976
5 "	14:25	0.1974
7 "	14:27	0.1972
10 "	14:30	0.1968
15 "	14:35	0.1965
20 "	14:40	0.1961
30 "	14:50	0.1958
45 "	15:05	0.1955
1 hora	15:20	0.1952
1 1/2 "	15:50	0.1950
2 "	16:20	0.1949
3 "	17:20	0.1948
4 "		
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	586.70	Wh + Rec =	129.00
- Anillo =	490.10	Ws + Rec =	97.90
Wh =	96.60	- Rec =	22.40
Ws =	75.50	Wh =	106.60
P.agua Ww =	21.10	Ws =	75.50

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0075 \times 100}{0.75} = 1.00 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

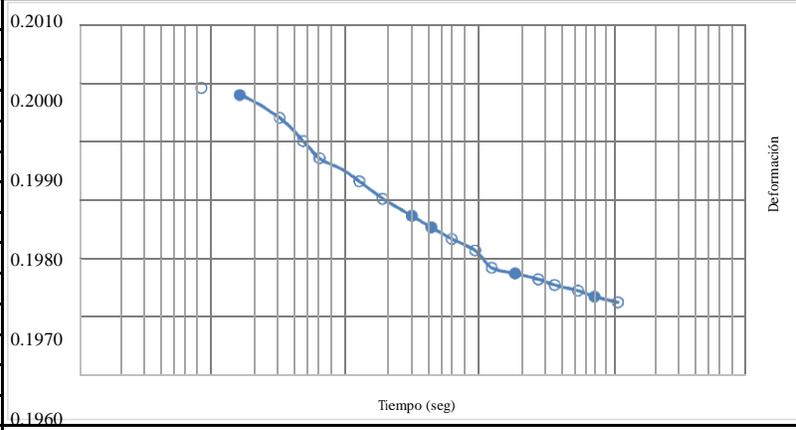
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** El Buijo  
**Muestra:** M-2 Polímero 1.5%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	14:25	0.2000
8 "		0.1999
15 "		0.1998
30 "		0.1994
45 "		0.1990
1 min	14:26	0.1987
1 1/2 "	14:25	0.1985
2 "	14:27	0.1983
3 "	14:28	0.1980
5 "	14:30	0.1977
7 "	14:32	0.1975
10 "	14:35	0.1973
15 "	14:40	0.1971
20 "	14:45	0.1968
30 "	14:55	0.1967
45 "	15:10	0.1966
1 hora	15:25	0.1965
1 1/2 "	15:55	0.1964
2 "	16:25	0.1963
3 "	17:25	0.1962
4 "		
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	583.70	Wh + Rec =	138.00
- Anillo =	487.70	Ws + Rec =	105.80
Wh =	96.00	- Rec =	31.90
Ws =	73.90	Wh =	106.10
P.agua Ww =	<u>22.10</u>	Ws =	<u>73.90</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0038 \times 100}{0.75} = 0.51 \%$$

Observaciones: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

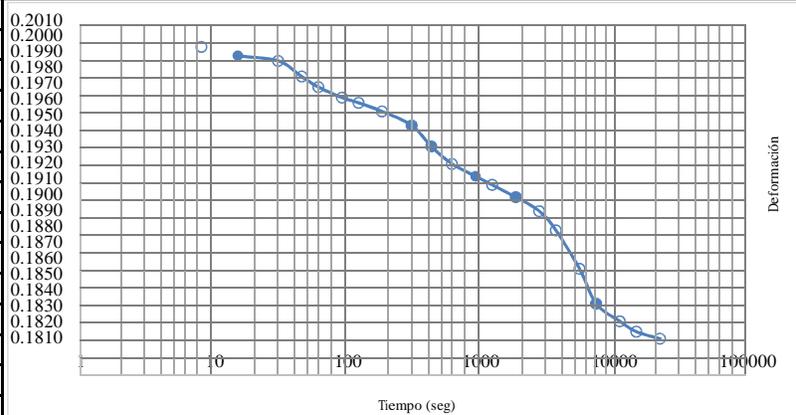
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucia  
**Muestra:** M-1 Polímero 0.5%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	13:40	0.2000
8 "		0.1997
15 "		0.1992
30 "		0.1989
45 "		0.1980
1 min	13:41	0.1974
1 1/2 "	13:40	0.1968
2 "	13:42	0.1965
3 "	13:43	0.1960
5 "	13:45	0.1952
7 "	13:47	0.1940
10 "	13:50	0.1930
15 "	13:55	0.1923
20 "	14:00	0.1918
30 "	14:10	0.1911
45 "	14:25	0.1903
1 hora	14:40	0.1892
1 1/2 "	15:10	0.1870
2 "	15:40	0.1850
3 "	16:40	0.1840
4 "	17:40	0.1834
6 "	19:40	0.1830
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	488.10	Wh + Rec =	149.30
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	118.00
Wh =	94.40	- Rec =	45.20
Ws =	72.80	Wh =	104.10
P.agua Ww =	<u>21.60</u>	Ws =	<u>72.80</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0170 \times 100}{0.75} = 2.27 \%$$

Observaciones:

---



---



---

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

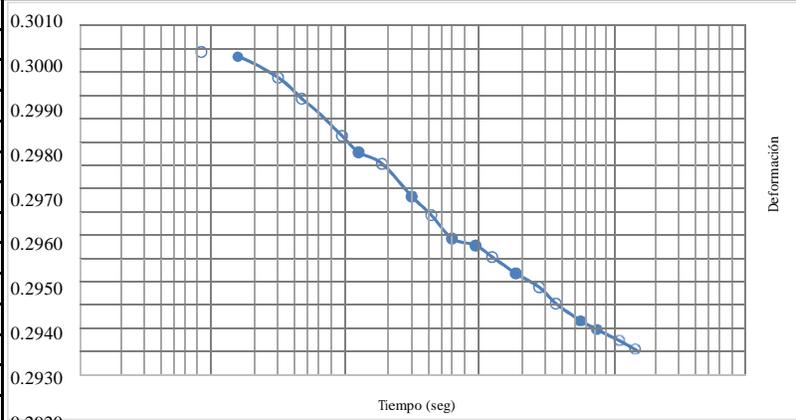
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucia  
**Muestra:** M-1 Polímero 0.75%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	13:20	0.3000
8 "		0.2998
15 "		0.2996
30 "		0.2987
45 "		0.2978
1 min	13:21	0.2972
1 1/2 "	13:20	0.2962
2 "	13:22	0.2955
3 "	13:23	0.2950
5 "	13:25	0.2936
7 "	13:27	0.2928
10 "	13:30	0.2918
15 "	13:35	0.2915
20 "	13:40	0.2910
30 "	13:50	0.2903
45 "	14:05	0.2897
1 hora	14:20	0.2890
1 1/2 "	14:50	0.2883
2 "	15:20	0.2879
3 "	16:20	0.2874
4 "	17:20	0.2870
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	488.90	Wh + Rec =	150.00
- Anillo =	395.30	Ws + Rec =	118.20
Wh =	93.60	- Rec =	46.00
Ws =	72.20	Wh =	104.00
P.agua Ww =	<u>21.40</u>	Ws =	<u>72.20</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0130 \times 100}{0.75} = 1.73 \%$$

Observaciones:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

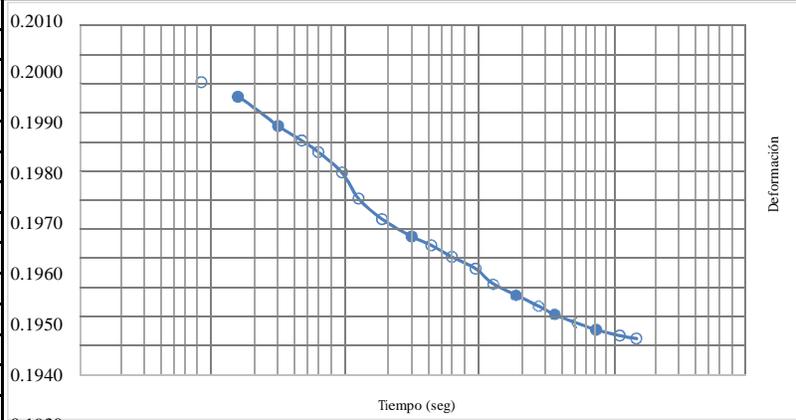
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucia  
**Muestra:** M-1 Polímero 1%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	13:08	0.2000
8 "		0.1990
15 "		0.1985
30 "		0.1975
45 "		0.1970
1 min	13:09	0.1966
1 1/2 "	13:08	0.1959
2 "	13:10	0.1950
3 "	13:11	0.1943
5 "	13:13	0.1937
7 "	13:15	0.1934
10 "	13:18	0.1930
15 "	13:23	0.1926
20 "	13:28	0.1921
30 "	13:38	0.1917
45 "	13:53	0.1913
1 hora	14:08	0.1910
1 1/2 "	14:38	0.1907
2 "	15:08	0.1905
3 "	16:08	0.1903
4 "	17:08	0.1902
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	486.90	Wh + Rec =	126.80
- Anillo =	393.70	Ws + Rec =	95.20
Wh =	93.20	- Rec =	22.50
Ws =	72.20	Wh =	104.30
P.agua Ww =	<u>20.50</u>	Ws =	<u>72.70</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0098 \times 100}{0.75} = 1.31 \%$$

Observaciones:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

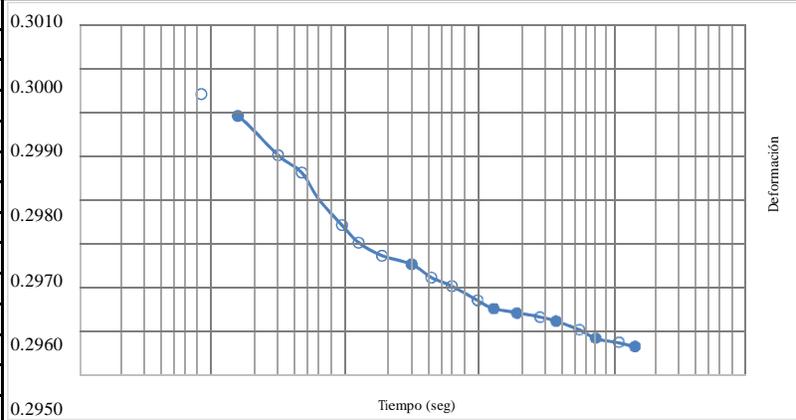
Génesis Ayala A.

**ENSAYO DE EXPANSION LIBRE**

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Ubicación:** Recinto Puente Lucia  
**Muestra:** M-1 Polímero 1.5%  
**Fecha:**

PERIODO	TIEMPO	LECTUR A DIAL 0.000"
0 seg	12:50	0.3000
8 "		0.2994
15 "		0.2989
30 "		0.2980
45 "		0.2976
1 min	12:51	0.2970
1 1/2 "	12:50	0.2964
2 "	12:52	0.2960
3 "	12:53	0.2957
5 "	12:55	0.2955
7 "	12:57	0.2952
10 "	13:00	0.2950
15 "	13:05	0.2947
20 "	13:10	0.2945
30 "	13:20	0.2944
45 "	13:35	0.2943
1 hora	13:50	0.2942
1 1/2 "	14:20	0.2940
2 "	14:50	0.2938
3 "	15:50	0.2937
4 "	16:50	0.2936
6 "		
9 "		
12 "		
24 "		
36 "		

**GRÁFICO**



**HUMEDAD**

ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Wh + Anillo =	487.40	Wh + Rec =	132.70
- Anillo =	395.30	Ws + Rec =	121.00
Wh =	92.10	- Rec =	29.80
Ws =	91.20	Wh =	102.90
P.agua Ww =	<u>0.90</u>	Ws =	<u>91.20</u>

$$\% \text{ Expansión} = \frac{0.0064 \times 100}{0.75} = 0.85 \%$$

Observaciones:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Realizado por: G.A.S.P.

Verificado por:

Génesis Ayala A.

#### **4.1. Proceso de Estabilización en Obra**

Es necesario tener en claro en porcentaje óptimo de polímero a ser utilizado. Una vez que se tiene los resultados necesarios, en campo se necesita el siguiente equipo de acuerdo a varios autores, entre ellos (Nesterenko, 2014):

- Motoniveladora con escarificadores
- Camión cisterna
- Rodillo liso compactador

Para proceder con la estabilización del suelo en campo se debe seguir el siguiente procedimiento, aclarando que es un procedimiento general y tomando en cuenta que este puede ser modificado dependiendo del volumen y de la maquinaria que tenga el constructor.

- En primer lugar, se debe determinar el área que va a ser intervenida.
- Posterior a esto y teniendo los resultados necesarios, se debe calcular el espesor del firme a ser estabilizado y a su vez el volumen de suelo, para poder calcular la cantidad de polímero a usarse.
- El siguiente paso es escarificar el suelo a la profundidad calculada anteriormente, utilizando la motoniveladora con escarificadores.
- Posteriormente, se debe aplicar el polímero de manera uniforme en el suelo escarificado con la ayuda de un camión cisterna.
- Una vez que el polímero ha sido aplicado en el suelo, este debe ser mezclado y re-escarificado, de tal manera que el polímero ingrese y penetre en el suelo expansivo.
- Una vez realizado los pasos anteriores, se procede con la conformación del material y su posterior compactación.

## 4.2. Costo de estabilización de suelo con Polímero

Para determinar el costo de una estabilización de este tipo en primer lugar se realiza el análisis de precios unitarios de este rubro.

### ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

RUBRO :

DETALLE : Estabilización con polímero

<i>EQUIPO DESCRIPCION</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>TARIFA B</i>	<i>COSTO HORA C=AxB</i>	<i>RENDIMIENTO R</i>	<i>COSTO D=CxR</i>
Herramienta Menor 5% de M.O.					0.01
Motoniveladora	1.00	40.00	40.00	0.020	0.80
Rodillo Vibratorio	1.00	45.00	45.00	0.020	0.90
Tanquero	1.00	25.00	25.00	0.020	0.50
<b>SUBTOTAL M</b>					<b>2.21</b>

<i>MANO DE OBRA DESCRIPCION</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>JORNAL/HR B</i>	<i>COSTO HORA C=AxB</i>	<i>RENDIMIENTO R</i>	<i>COSTO D=CxR</i>
Operador motoniveladora OP C1	1.00	3.82	3.82	0.020	0.08
Operador de rodillo vibratorio OP C2	1.00	3.64	3.64	0.020	0.07
Chofer licencia tipo D CH C1	1.00	5.00	5.00	0.020	0.10
<b>SUBTOTAL N</b>					<b>0.25</b>

<i>MATERIALES DESCRIPCION</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>PRECIO UNIT. B</i>	<i>COSTO C=AxB</i>
Polímero	LT	15.000	1.20	18.00
<b>SUBTOTAL O</b>				<b>18.00</b>

<i>TRANSPORTE DESCRIPCION</i>	<i>UNIDAD</i>	<i>CANTIDAD A</i>	<i>TARIFA B</i>	<i>COSTO C=AxB</i>
<b>SUBTOTAL P</b>				<b>0.00</b>

<b>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)</b>	20.46
<b>INDIRECTOS (%)</b>	0.00%
<b>UTILIDAD (%)</b>	0.00%
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>	20.46
<b>VALOR UNITARIO</b>	<b>20.46</b>

SON: DIECISIETE DÓLARES CON CUARENTA Y SEIS CENTAVOS

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA

En primer lugar, se establece una unidad de medida, para este caso la unidad es el metro cúbico.

Se determina también el costo horario del equipo a utilizar. Para el análisis realizado se estableció un costo de 40 dólares para la motoniveladora, 45 dólares para el rodillo y 25 dólares para el tanquero.

También se establece el costo de la mano de obra para este rubro. Se necesita un operador de motoniveladora, cuyo salario horario es de 3.82 dólares, un operador de rodillo con un costo de 3.64 dólares por hora y un chofer con licencia tipo D, con un costo de 5.00 dólares.

El costo referencial del polímero utilizado es de 1.20 dólares por litro. En este caso, al tener un porcentaje óptimo de 1.50 % se necesita una cantidad de 15 litros por metro cúbico de suelo a estabilizar.

El rendimiento para este análisis se ha establecido en un valor de 0.02.

Realizando los cálculos correspondientes, se tiene un costo por metro cúbico de 20.46 dólares.

## Capítulo v. Conclusiones y recomendaciones

- Debido a las condiciones del suelo y a las condiciones climáticas que se presentaron cuando se procedió con el muestreo se pudo obtener únicamente muestras alteradas, por lo que no se procedió la realización del ensayo de Lambe, puesto que este requiere muestras inalteradas para moldearlas para poder proceder. Por esta razón se realizaron los ensayos de expansión libre y expansión controlada.

- La influencia del polímero alteró de manera significativa en las condiciones físico – mecánicas del mismo. En los ensayos de límites de Atterberg se produjeron cambios tanto en el límite líquido, límite de plasticidad y por consiguiente en el índice de plasticidad.

El límite líquido decreció en todos los casos, a razón de 21.43, 36.69 y 30.69 % en las muestras M-1, M-2 y M-3, respectivamente.

Para el caso del límite plástico en las muestras M-2 y M-3 se obtuvieron decrecimientos de 35.68 y 27.14 respectivamente mientras que para la muestra M-1 se obtuvo un crecimiento de 27.13 %.

El índice de plasticidad sufrió variaciones del 50.72, 39.25 y 32.27 % para las muestras M-1, M-2 y M-3, respectivamente.

- La prueba proctor modificada, que es un indicador de la resistencia al corte de los suelos, también sufrió alteraciones debido a la utilización del polímero. La compactación es conflictiva y complicada cuando se trata de suelos con alta

plasticidad, como son los suelos parte del presente trabajo, siendo prácticamente suelos que no se prestan para compactarse.

Durante los ensayos de laboratorio al suelo sin estabilizar, se produjeron diferentes problemas para poder obtener los puntos para graficar las curvas de compactación. Sin embargo, al aplicar los productos químicos el suelo de entrada se volvió más manejable, y al haberse reducido sus problemas de consistencia se pudo realizar con mayor facilidad los ensayos.

La densidad seca máxima tuvo tasas de crecimiento en las muestras M-1, M-2 y M-3 de 4.02, 6.56 y 3.93 respectivamente, con el consecuente incremento de la resistencia al corte en la misma proporción.

Sin embargo, un parámetro que llamó mucho la atención fue el de humedad óptima, puesto que a groso modo se pensaba que iba a disminuir en el material estabilizado, pero las tasas de variación fueron de 0.0 para la muestra M-1, decreciente de 40.54 % para la muestra M-2 y creciente de 25.0 % para la muestra M-3.

Dados los valores indicados, se concluye una vez más y se coincide con la mayoría de autores en temas geotécnicos que los suelos expansivos, aunque hayan sido estabilizados, tienen un comportamiento impredecible.

- Los ensayos de expansión libre resultan ser un gran indicador en cuanto a la capacidad de aumentar el volumen de los suelos y a su vez la capacidad que tienen los polímeros para evitar que esto suceda, la tabla adjunta nos demuestra que el primero es una gran alternativa para poder evitar los cambios volumétricos que tienen esta clase de suelos de manera eficaz.

**Tabla 20 Reducción de expansión**

Reducción de expansión		
Muestra	Porcentaje de polímero (%)	Porcentaje de reducción (%)
M-1	0.5	77.4
	0.75	82.8
	1	87.0
	1.5	91.5
M-2	0.5	74.3
	0.75	83.0
	1	88.2
	1.5	91.3
M-3	0.5	47.3
	0.75	50.6
	1	66.4
	1.5	71.6

Se puede apreciar que con el valor de 1.50 % de polímero se puede controlar el cambio volumétrico de los suelos expansivos hasta en un 91.5 %, lo cual prácticamente anula la expansividad de los mismos.

- El ensayo de expansión controlada nos ofrece una valoración cuantitativa más profunda de la presión ejercida por el suelo cuando sufre contacto con el agua, es así que con los ensayos realizados se tiene que el plímero anula la presión que ejerce el suelo expansivo hasta en un 94.1 %, como se indica en la tabla que se adjunta.

**Tabla 21 Reducción de presión de expansión**

Reducción de presión de expansión		
Muestra	Porcentaje de polímero (%)	Porcentaje de reducción (%)
M-1	0.5	78.1
	0.75	79.7
	1	90.6
	1.5	94.1
M-2	0.5	52.0
	0.75	60.5
	1	68.5
	1.5	71.4
M-3	0.5	30.4
	0.75	33.3
	1	59.3
	1.5	66.6

- Con respecto a los ensayos de expansión realizados se recomienda catalogar a los suelos analizados de la siguiente forma:
  - Por aumento volumétrico
    - M-3: alta expansividad
    - M-1: media expansividad
    - M-2: baja expansividad
  - Por presión de expansión
    - M-1: alta expansividad
    - M-3: media expansividad
    - M-2: baja expansividad

Se recomienda usar polímero para la estabilización de suelos expansivos por las siguientes razones:

#### Facilidad de trabajo

- Como se explicó en la teoría, el procedimiento para utilizar este tipo de estabilización en obra es sencillo a comparación de otros tipos de estabilización. No se necesita una gran cantidad de máquinas ni una gran cantidad de personal.

#### Menor impacto ambiental

- Con los métodos tradicionales, se necesita gran cantidad de maquinaria y además una gran cantidad de materiales, los cuales necesitan ser conseguidos en canteras o minas o a su vez necesitan grandes cantidades de energía para ser producidos, como el caso del cemento.

Con respecto al costo, la estabilización con polímero es un poco más costosa que el resto de estabilizaciones. Sin embargo, al tener una mayor facilidad de trabajo y al poderse realizar en menor tiempo representa una mejor relación en cuanto al costo y a beneficio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Badillo, J., & Rodríguez, R. (2006). *Mecánica de suelos tomo 3 Flujo de aguas en suelos*. México: Limusa.
- Coyoptl, R. M., & Salinas, M. (2006). *Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/maxil\\_c\\_r/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/)
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Thomson Learning.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, fundaciones y Muros*. Caracas.
- Lara, T. L., Hernández, J., Horta, J., Coronado, A., & Castaño, V. (2010). Estabilización volumétrica de arcillas con polímeros. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Retrieved from <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/MAY10/lopez.pdf>
- Márquez, J. javier. (2006). *Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras en ingeniería*.
- Nesterenko, Darko (2014) Estabilización de suelos con el polímero Polycom. Recuperado de <https://prezi.com/dkanmaamipz-/estabilizacion-de-suelos-con-el-polimero-polycom/>
- Patrone, J., & Prefumo, J. E. (n.d.). *La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y Control*. Retrieved from [http://www.um.edu.uy/\\_upload/\\_descarga/web\\_descarga\\_204\\_Accindesuelosexpansivos..Nmero4.pdf](http://www.um.edu.uy/_upload/_descarga/web_descarga_204_Accindesuelosexpansivos..Nmero4.pdf)
- Sánchez, M. (2014). *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector calcical del cantón Tosagua provincia de Manabí*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/11180/TESIS-PUCE-SánchezAlbánMaría.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## **Anexos**









