

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS MECÁNICA DE SUELOS**

**ABATIMIENTO DE LA EXPANSIÓN MEDIANTE LA  
MODIFICACIÓN DE SUELOS Y APLICACIÓN DE CARGA**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presenta:

**Juan Carlos Rodríguez Uribe**

Dirigido por

**Dra. Teresa López Lara**

**DEPFI, UAQ**

**CENTRO UNIVERSITARIO  
QUERÉTARO, ORO. FEBRERO 2018**



Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Maestría en Ciencias  
 (Mecánica de Suelos)

**ABATIMIENTO DE LA EXPANSIÓN MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE SUELOS Y APLICACIÓN DE CARGA**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ciencias

**Presenta:**

Ing. Juan Carlos Rodríguez Uribe

**Dirigido por:**

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara  
 Presidente

\_\_\_\_\_  
 Presidente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
 Secretario

\_\_\_\_\_  
 Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel  
 Vocal

\_\_\_\_\_  
 Vocal

Dr. Eduardo Rojas González  
 Suplente

\_\_\_\_\_  
 Suplente

M.I. Alfredo Zepeda Garrido  
 Suplente

\_\_\_\_\_  
 Suplente

DR. MANUEL TOLEDANO AYALA  
 Director de la Facultad de Ingeniería

DRA. MA GUADALUPE FLAVIA LOARCA PIÑA  
 Director. de Investigación y Posgrado

## RESUMEN

En ingeniería los problemas referentes a suelos expansivos son bastante comunes y de gran importancia económica debido a los agrietamientos que ocasionan en las estructuras que son colocadas sobre este tipo de material. Los cambios de humedad principalmente, entre otros factores, provocan un cambio volumétrico de los suelos expansivos. Este trabajo trata el abatimiento de la expansión de suelos por medio de la combinación del tratamiento químico del suelo por medio de cal y aplicación de sobrecarga, que son solo algunas de varias alternativas posibles para resolver el problema. La finalidad es encontrar la dosificación menor u óptima de cal en la estabilización de suelo y la carga máxima que abatan la expansión, así como ofrecer diferentes combinaciones de ambas. Las soluciones de mejoramiento de suelos con materiales generalmente se utilizan con dosificaciones que en su mayoría han sido determinadas ignorando la existencia de las cargas transmitidas por la estructura. Por lo tanto, esta investigación pretende aprovechar el efecto de las cargas sobre suelos expansivos modificados, lo que repercutirá en ahorro del material estabilizante y por lo tanto del costo de la estabilización. El desarrollo de la presente investigación dejó las siguientes conclusiones, para este suelo expansivo en particular (arcilla de alta compresibilidad), el contenido de cal, sin considerar carga, que abate la expansión del suelo es del 6%, respecto a su peso seco. Asimismo, la sobrecarga que abate la expansión del suelo de forma considerable es la de 10 ton. , la cual disminuye la expansión a valores menores de 1%. De la combinación de ambas soluciones (carga y estabilización con cal) se comprueba que la carga efectivamente contribuye en el abatimiento de la expansión del suelo al disminuir la dosificación de cal determinada (6%), quedando arreglos de 2 toneladas con 4% de cal respecto a peso seco y 4 toneladas con 2% de cal respecto al peso seco.

**(Palabras clave:** suelo expansivo, estabilización, arcilla, cimentación).

## SUMMARY

In engineering problems are added to expansive are quite common and of great economic importance due to the cracks that cause in the structures that are placed on this type of material. Changes in humidity mainly, among other factors, cause a volumetric change of the expansive soils. This work deals with the abatement of soil expansion through the combination of soil chemical treatment through the application of overload, which is just some of several alternatives to solve the problem. The purpose is to find the lower dose than the most adequate for the stabilization of the soil and the maximum load for the expansion, as well as the different combinations of both. The solutions of improvement of floors with materials are generally used with dosages that have been mostly determined, ignoring the existence of the loads transmitted by the structure. Therefore, this research aims to take advantage of the effect of the loads on modified soils, which will affect the saving of stabilizing material and therefore the cost of stabilization. The development of the present investigation of the following conclusions, for this expansive soil in particular, the lime content, without considering load, which reduces the soil expansion of 6%, with respect to its dry weight. Likewise, the overload that reduces soil expansion considerably is that of 10 shades that decrease the expansion to values lower than 1%. From the combination of solutions for loading and stabilization with lime it is verified that the load is useful in the abatement of the expansion of the soil to reduce the dosage of calitación (6%), being arranged of 2 tons with 4% of heat with respect to a dry weight and 4 tons with 2% lime with respect to dry weight.

**(Key words:** expansive soil, stabilization, clay, foundations).

## AGRADECIMIENTOS

**“Los labios de la sabiduría permanerán cerrados excepto para el oído capaz de comprender “.....Kybalion (Hermes Trismegito).**

A Dios, por que estoy vivo y consciente.

A mis padres Celia Uribe y Josè R. Rodríguez† , a quienes profundamente agradezco todo el apoyo incansable e incondicional en el escenario de la vida para hacer que esto suceda.

A mis hermanos Cesar, Araceli, Ernesto y Miguel, a mi sobrina “Monys” por estar a mi lado siempre.

A todos mis amigos:  
Marquito, Miguel, Fermin, Cesar, Max, Lupita, David, Lázaro,,Omar, ....

A mi gran Familia que encontré en el camino de la vida.

Al Dr. Juan Serrano Arellano por su apoyo incondicional y por elevar mi nivel de conciencia.

Al Arq. Ascención Evanan Olvera Alvarado por sus consejos y sus grandes charlas de filosofía.

A mis ex-alumnas ahora colegas.....Zaira, Alicia y Jaqueline por su apoyo y comprensión.

A Donghu y German por su apoyo.

Al Sr. Alejo por su apoyo total hacia esta investigación

A mi colega Julio Cosme Pola y su gran familia.

A todos mis docentes de la maestría...por darme su conocimiento y mostrarme que la mecánica de suelos se aprende por medio de la filosofía.

**Por supuesto a la Dra. Teresa López Lara asesora de esta tesis por su apoyo y voto de confianza después de este tiempo, le agradezco por que me brindo una oportunidad de seguir adelante al igual que al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza ...Gracias.**

**“Como es arriba es abajo y como es abajo es arriba “  
.Kybalion (Hermes Trismegito).**

## INDICE GENERAL

|  | Pág.                         |
|--|------------------------------|
| RESUMEN .....  | III                          |
| SUMMARY.....   | IV                           |
| AGRADECIMIENTOS.....   | V                            |
| INDICE GENERAL.....  | VI                           |
| INDICE DE FIGURAS .....                                      | IX                           |
| INDICE DE TABLAS.....  | XIII                         |
| SIMBOLOGÍA .....   | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| I. INTRODUCCIÓN.....   | 1                            |
| 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA. ....                           | 4                            |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN. ....                                      | 5                            |
| 1.4 OBJETIVOS PARTICULARES. ....                             | 6                            |
| 1.5 HIPÓTESIS. ....  | 6                            |
| 2. MARCO TEÓRICO. ....                                       | 7                            |
| 2.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.....                 | 7                            |
| 2.2 IDENTIFICACION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS. ....            | 15                           |
| 2.2.1 Distribución geográfica de los suelos expansivos. .... | 15                           |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.2 Zona Activa de los suelos expansivos. ....  | 17        |
| <b>2.3 CRITERIOS PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN.....</b>   | <b>21</b> |
| 2.3.1 Prueba de los límites de Atterberg. ....  | 21        |
| 2.3.2 Prueba de volumen constante. ....   | 22        |
| 2.3.3 Prueba de expansión libre no restringida.....   | 24        |
| 2.3.4 Porcentaje de expansión.....  | 25        |
| 2.3.5 Presión de expansión.....   | 25        |
| 2.3.6 Norma ASTM 04546-03. ....   | 26        |
| <b>2.4 IMPACTO DEL COMPORTAMIENTO DE SUELO EXPANSIVO EN<br/>LAS EDIFICACIONES. ....</b>   | <b>30</b> |
| <b>2.5 EFECTOS DE LAS EDIFICACIONES SOBRE SUELOS<br/>EXPANSIVOS.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>2.6 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO – ESTABILIZACIÓN DE LOS<br/>SUELOS EXPANSIVOS. ....</b>  | <b>35</b> |
| <b>3. DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....</b>   | <b>52</b> |
| <b>3.2 Extracción de muestras y caracterización del suelo. ....</b>   | <b>52</b> |
| <b>3.3 Metodología.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>3.4 Preparación de la muestra.....</b>   | <b>53</b> |
| 3.4.1 Suelo natural.....  | 53        |
| 3.4.2 Suelo modificado.....   | 54        |
| 3.4.3 Preparación de suelo – cal.....   | 54        |
| 3.4.4 Cal empleada.....   | 56        |
| 3.4.5 Preparación de las probetas. ....   | 56        |
| 3.4.6 Curado. ....  | 56        |
| 3.4.7 Proporciones de mezcla con cal. ....  | 57        |
| 3.4.8 Pruebas de Compactación.....  | 57        |
| 3.4.9 Peso específico relativo de sólidos. ....   | 59        |
| 3.4.10 Cambios volumetricos por saturación. ....  | 59        |
| 3.4.11 Determinación de la cantidad de cal que abatió la expansión del<br>suelo sin considerar la carga. ....                                   | 60        |
| 3.4.12 Determinación de la descarga que abate la expansión del suelo<br>natural sin estabilizarlo con cal. ....                                 | 60        |
| 3.4.13 Determinación de las combinaciones ideales de descarga junto<br>con la cantidad de cal requerida que abaten la expansión del suelo. .... | 61        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. RESULTADOS.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>4.1 Identificación del tipo de suelo natural en estudio y modificado con cal.....</b>                            | <b>49</b> |
| <b>4.2 Determinación de la Sobrecarga que abate la expansión del suelo natural, sin estabilizarlo con cal. ....</b> | <b>49</b> |
| <b>4.3 Determinación de la compactación ideal del suelo natural y estabilizado con cal. ....</b>                    | <b>52</b> |
| <b>4.4 Determinación de la cantidad de cal que abate la expansión del suelo, sin considerar sobrecargas. ....</b>   | <b>54</b> |
| <b>4.6 Determinación de la combinación de sobrecarga y cantidad de cal que abate la expansión del suelo. ....</b>   | <b>56</b> |
| <b>5. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>REFERENCIAS.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>7</b>  |



## INDICE DE FIGURAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Estructura representativa de la arcilla expansiva (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006).....   | 9           |
| Figura 2. El diagrama muestra la interacción de minerales de arcilla con el ambiente. (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006). ....  | 10          |
| Figura 3. Arreglo de las partículas de arcilla (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006).....  | 11          |
| Figura 4. Estructura química de la montmorilonita (Fuente: propia).....   | 12          |
| Figura 5. Arreglo químico de una partícula de arcilla que muestra su configuración especial (Fuente: propia). ....  | 12          |
| Figura 6. a) Macro estructura de un suelo arcilloso no saturado; (b) representación conceptual que demuestran los posibles mecanismos de deformación (Fuente: Lei et al, 2014)..... | 15          |
| Figura 7. Distribución de los suelos expansivos en el Mundo (Fuente: Zepeda, 1989).....   | 16          |
| Figura 8. Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Fuente: Zepeda, 1989). ....  | 17          |
| Figura 9. Zona activa de los suelos expansivos (Fuente: López, 2012)....  | 18          |
| Figura 10. Perfiles de succión mátrica bajo las condiciones de flujo superficial (Fredlund, 1996).....  | 19          |
| Figura 11. Relación de humedad - profundidad con relación al mecanismo de expansión contracción del suelo no saturado (Fredlund, 1996). ....  | 20          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 12. Diagrama tridimensional esfuerzo – deformación que muestra los contornos de esfuerzo efectivo constante en un suelo parcialmente saturado .....   | 23 |
| Figura 13. Esfuerzo vertical (Método A para determinar la presión de expansión “con expansión libre” bajo una presión de 1 kPa (ASTM, D 4546-03).....  | 26 |
| Figura 14. Método B para determinar la presión de expansión, con expansión por inundación, bajo la sobrecarga estimada in situ o alguna otra descarga de estructura (ASTM, D 4546-03).....                       | 27 |
| Figura 15. Método C para determinar la presión de expansión, a volumen constante, inundando la muestra (ASTM, D 4546-03). ....   | 28 |
| Figura 16. Agrietamiento de la estructura por movimiento perimetral provocada por la expansión de la arcilla (Fuente: Propia). ....  | 31 |
| Figura 17. Agrietamiento de la estructura provocado por la expansión de la arcilla (Fuente: Propia).....   | 32 |
| Figura 18. Agrietamiento de la estructura por movimiento céntrico (Fuente: Propia).....  | 33 |
| Figura 19. Métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación (Fuente: Propia). ....   | 38 |
| Figura 20. Descarga de una estructura ligera al material expansivo (Fuente: Propia).....   | 39 |
| Figura 21. Estabilización con agentes químicos como la cal para estabilizar el medio y con ello abatir la expansión (Fuente: Propia).....  | 40 |
| Figura 22. Estrategia para estabilizar el medio por medio de la pre saturación (pre- humedecimiento) con el fin de establecer un equilibrio en el medio y con ello minimizar la expansión (Fuente: Propia). .... | 41 |
| Figura 23. Método de sustitución el cual consiste el cambiar el material expansivo por un material inerte. (Fuente: Propia).....   | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24. Como alternativa para mitigar los efectos adversos del movimiento del medio se aísla la estructura haciendo uso de membranas impermeables (Fuente: Propia).....                   | 43 |
| Figura 25. Modelos gráficos que ejemplifican el comportamiento de la estructura vs el material expansivo (Fuente: Propia). ....  | 44 |
| Figura 26. Renders esquemáticos de las actuaciones de los métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación (Fuente: Propia)..... | 45 |
| Figura 27. Localización del predio en donde de donde se extrajeron las muestras para la realización del ensayos. ....  | 52 |
| Figura 28. Copa de Casagrande para la obtención de límite líquido (Fuente: propia).....  | 54 |
| Figura 29. Ensaye de Copa de Casagrande para la obtención de límite líquido (Fuente: propia). ....   | 54 |
| Figura 30. Muestras de material en bolsas de distintos contenidos de porcentaje de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco) (Fuente: Obtención propia).....                                     | 55 |
| Figura 31. Muestras de material clasificado en distintos contenidos de porcentaje de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco) (Fuente: Obtención propia).....                                   | 56 |
| Figura 32. Equipo especializado para realizar ensaye de proctor estándar (Fuente: propia).....   | 58 |
| Figura 33. Colocación del material arcilloso en el molde de compactación (Fuente: propia).....   | 58 |
| Figura 34. Enrase del molde con el objetivo de realizar el ensaye de compactación Proctor estándar (Fuente: propia). ....  | 59 |
| Figura 35. Elementos que integran el consolidometro para realizar el ensaye de expansión libre (Fuente: propia). ....  | 60 |
| Figura 36. Muestra natural en el consolidometro (Fuente: propia). ....   | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 37 Ensaye de expansión para identificar la carga que abate la expansión sobre el terreno natural, colocación de la carga de sitio (Fuente: propia)..... | 61 |
| Figura 38. Ensayes de las muestras dosificadas con cal y con aplicación de carga (Fuente:propia).....  | 62 |
| Figura 39. Clasificación del suelo natural y modificado con cal dentro de la Carta de Plasticidad. ....  | 49 |
| Figura 40. Ensayes de expansión del suelo natural con cargas de 2, 4, 6, 8 y 10 Ton, sin estabilizarlo.....  | 51 |
| Figura 41. Expansión del suelo no tratado y no tratado con sobrecarga....  | 52 |
| Figura 42. Compactación Proctor Estándar del suelo natural. ....   | 53 |
| Figura 43. Compactación Proctor Estándar del suelo natural y con distintos contenidos de cal. ....   | 53 |
| Figura 44. Ensayes de expansión en muestras inalteradas del suelo natural y estabilizado con 2,4 y 6 % de cal. ....  | 55 |
| Figura 45. Expansión del suelo natural y tratado con cal. ....   | 56 |
| Figura 46. Ensayes de expansión del suelo natural con un 2% de cal y cargas de 2.4 y 6 Ton.....  | 58 |
| Figura 47 Ensayes de expansión del suelo natural con un 4% de cal y cargas de 2.4 y 6 Ton.....   | 58 |
| Figura 48. Expansión de un suelo no tratado con limo y sobrecarga. ....  | 60 |

## INDICE DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Correlación empírica entre las propiedades índice- propiedades mecánicas (Fuente: Beltrán, 2009). .....   | 22          |
| Tabla 2. Resumen de los métodos actuales para predecir el cambio de volumen in situ de los suelos expansivos con el tiempo (Fuente: Adem y Vanapalli, 2014). ..... | 29          |
| Tabla 3. Propiedades índice del suelo natural y suelo cal.....   | 49          |
| Tabla 4. Expansión del suelo bajo cargas de 2, 4, 6, 8 y 10 Ton. ....  | 50          |
| Tabla 5. Expansión del suelo natural y mezclado con cal. ....  | 55          |
| Tabla 6. Expansión resultante de un suelo natural con 2% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. ....   | 57          |
| Tabla 7. Expansión resultante de un suelo natural con 4% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. ....   | 57          |
| Tabla 8. Expansión resultante de un suelo natural con 6% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. ....   | 59          |
| Tabla 9. Expansión de un suelo no tratado con limo y sobrecarga. ....  | 59          |
| Tabla 10. Costos por m <sup>3</sup> de suelo arcilloso estabilizado. ....  | 62          |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 11. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 2% con respecto al peso seco del suelo. ....    | 63 |
| Tabla 12. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 4% con respecto al peso seco del suelo. ....    | 64 |
| Tabla 13. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 6% con respecto al peso seco del suelo. ....    | 65 |
| Tabla 14. Mejoramiento de terreno por sustitución y compactación mecánica de tepetate (Fuente: Hernández, 2009). .... | 66 |
| Tabla 15. Costos de diferentes técnicas de mejoramiento de terreno (Fuente: Hernández, 2009). ....                    | 67 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### I. INTRODUCCIÓN.

El problema de los suelos expansivos no aparece en la literatura técnica hasta el Primer Congreso Internacional de Mecánica de Suelos, que tiene lugar en Harvard (Massachussets) en 1936. Se describen movimientos verticales y horizontales que se asocian correctamente a cambios en la humedad del suelo. Se observa que el carácter expansivo de los suelos aumenta con su contenido de sodio, con la profundidad de la capa activa (espesor del terreno sometido a cambios de humedad), y es mayor para presiones bajas. **(De Justo et al, 2002)**.

Los suelos no saturados que han recibido más atención por parte de los investigadores debido a los daños y pérdidas económicas que ocasionan son las arcillas expansivas **(Fredlund et al, 1993)**, Estructuras ligeras tales como: autopistas, aeropistas, viviendas, edificios pequeños, etc. A menudo sufren daños severos posteriores a su construcción como resultados de cambios ambientales tales como: remoción de árboles, raíces, cambios de contenido de agua del suelo, ocasionado por el riesgo excesivo de árboles, pastos, fugas, infiltración de agua de lluvia, etc. **(Fredlund et al, 1993)**.

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo en estado no saturado son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser tanto negativas, en cuyo caso se produce un colapso, como positivas, en cuyo caso se produce una expansión **(Bucio et al, 2002)**.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

En referencia a los suelos expansivos, se observa que ocasionan muchos problemas cuando se construye sobre este tipo de material debido entre otras cosas a la fluctuación de humedad en el medio lo que provoca una expansión del suelo.

Los cambios de volumen asociados con suelos expansivos producen considerable daño a estructuras ligeras, especialmente losas de cimentación en estructuras residenciales, carreteras, etc. Hay numerosas técnicas, tales como la estabilización fisicoquímica, estabilización mecánica y prácticas preventivas, que son recomendadas para mitigar los efectos de los suelos expansivos **(Hudyma, 2006)**.

Los suelos con las características anteriormente señaladas crean dificultades en cuestión de comportamiento para edificios construidos sobre este tipo de material, debido a que cuando el contenido de agua se incrementa el suelo se expande y se hincha mientras que cuando el contenido de agua disminuye el terreno se contrae provocando anomalías tanto a nivel de subestructura como de superestructura.

Por ende, debido al comportamiento fluctuante de los suelos expansivos representa una pérdida de dinero en cuestión del daño producido por este material a las construcciones, provocando entre otras cosas un sobre-diseño en cuestión de cimentaciones que tienen que tratar con dos conceptos que se desprenden del estudio de los suelos expansivos: presión de expansión y porcentaje de expansión y que son aspectos que todo ingeniero geotécnico debe tomar en cuenta para el diseño de cimentaciones.



Hoy en día encontramos distintas soluciones en cuestión de mejoramiento de suelos para el tipo de material expansivo, probando ser de gran éxito en cuestión de ser alternativas que nos permiten optimizar los recursos en este caso económicos y además de ser prácticos en vías de obtener características del material que serán benéficas para cuestión de diseño.

Hay diversas técnicas, tales como estabilización química, estabilización mecánica y prácticas preventivas que son recomendadas para mitigar los efectos de suelo expansivo **(Hudyma et al, 2006)**.

De las distintas alternativas de mejoramiento de suelos, uno de los más comunes es el tratamiento con cal, cuyo éxito depende en gran medida del método de aplicación.

Esta alternativa siempre ha dado lugar a controversias dado el enfoque empírico que ha dominado los criterios de dosificación. Un enfoque racional del problema de la dosificación permite obtener resultados satisfactorios utilizando sólo una fracción de la cantidad de cal y tomando en cuenta la existencia de las cargas transmitidas por la estructura, en donde ambos conceptos juegan en binomio y no actúan por separado con el fin de abatir la expansión.

La reacción del limo con la cal además de ser reportado como un proceso no reversibles con el tiempo **(López-Lara et al., 1996, López-Lara et al., 2005)**, se presentan dos etapas de reacción: la primera fase se presenta rápidamente de manera inmediata después de añadir la cal al suelo, provocando una reacción física - química entre la cal y los minerales arcillosos, y los cuales transforman al suelo en un material más rígido y menos plástico; la segunda etapa se presenta con

el tiempo y más lentamente debido a la reacción puzolanica que forma agentes cementantes los cuales incrementan la resistencia del suelo y la durabilidad **(Di Maio et al, 2002)**. El tiempo de curado para que la cal actué sobre el material expansivo se recomienda de un día. **(López et al., 2005)**.

El proceso de estabilización es calificado como satisfactorio cuando las calidades requeridas y las condiciones siguientes se reúnen: compatibilidad con el material (suelo), ser permanente, de fácil manejo y ejecutable, económico y seguro **(Purus, H. R. 2000)**.

Respecto a la integración de esta investigación se presenta una breve explicación de los distintos capítulos que la conforman.

El Capítulo 1 aborda la introducción a los suelos expansivos.

El capítulo 2 se refiere al marco teórico de referencia respecto a los siguientes apartados: la naturaleza de los suelos expansivos, Identificación de los suelos expansivos, criterios para evaluar la expansión, el comportamiento de los suelos expansivos sobre las edificaciones y los métodos de estabilización de suelos expansivos

El capítulo 3 nos introduce al desarrollo experimental desarrollado en este trabajo en el cual observamos la serie de ensayos llevados a cabo en laboratorio sobre el material expansivo en estudio.

El capítulo 4 aborda los resultados del presente trabajo.

El capítulo 5 puntualiza las conclusiones de la presente investigación.

## 1.1 Descripción del problema.

En referencia a los suelos expansivos, se observa que ocasionan muchos problemas cuando se construye sobre este tipo de material debido entre otras cosas a la fluctuación de humedad en el medio lo que provoca una expansión del suelo.

La estabilización de suelos es un método económico y último para adquirir las propiedades geotécnicas deseadas. La estabilización química del suelo es una técnica popular y efectiva que mejora la trabajabilidad y la resistencia al corte del suelo. El cemento cal, yeso, escoria y cenizas son ejemplos de aditivos químicos que han sido utilizados para efectivamente para mejorar las características de compresibilidad y resistencia del suelo. Sin embargo el uso de estabilizadores químicos pueden causar daño al ambiente, limitar el crecimiento de plantas y alterar la calidad del agua subterránea. **(Ta'negonbadi, 2016)**.

De las distintas alternativas de mejoramiento de suelos, uno de los más comunes es el tratamiento con hidróxido de calcio, cuyo éxito depende en gran medida del método de aplicación. Esta alternativa siempre ha dado lugar a controversias dado el enfoque empírico que ha dominado los criterios de dosificación. Un enfoque racional del problema de la dosificación permite obtener resultados satisfactorios utilizando solo una fracción de la cantidad de cal y tomando en cuenta la existencia de las cargas transmitidas por la estructura en donde ambos conceptos juegan en binomio y no actúan por separado con el fin de abatir la expansión.

## 1.2 Justificación.

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

El afán de reducir costos ha llevado a utilizar materiales ligeros en la construcción de viviendas, lo que aumenta el potencial de daños causados por la acción de los suelos expansivos. El criterio de utilizar algún método de estabilización de suelos queda opacado por la idealización popular de que resultan incosteables, sobre todo en fraccionamientos de interés social. El conjunto de los criterios utilizados tanto por las empresas constructoras como por el propietario tienden a reducir el costo de construcción de una vivienda, sin embargo; en cada cambio estacional surgen los agrietamientos característicos causados por la expansión y contracción del suelo, mismos que será necesario corregir, causando gastos imprevistos que recaen en el bolsillo del propietario **(Torres, 2005)**.

### 1.3 Objetivo general.

- Abatir la expansión del suelo combinando la estabilización del suelo con cal y la carga sobrepuesta.

### 1.4 Objetivos particulares.

- Encontrar la dosificación menor u óptima de cal en la estabilización del suelo y la carga máxima que brinden cero. expansiones así como ofrecer diferentes combinaciones que brindan expansiones mínimas.
- Aprovechar las cargas transmitidas por la estructura en el abatimiento de la expansión del suelo.

### 1.5 Hipótesis.

El contenido de cal que se utiliza para mitigar la expansión para un valor de sobrecarga pequeño (aproximadamente hasta 2 ton/m<sup>2</sup> que es el valor de descarga de una estructura ligera, como una casa habitación), disminuirá hasta un 50% tomando en cuenta la carga.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

### 2. MARCO TEÓRICO.

El estudio de los suelos expansivos, y el impacto que provoca a las construcciones lo podemos abordar a partir de los siguientes apartados.

**2.1 *Naturaleza de los suelos expansivos.***

**2.2 *Identificación de los suelos expansivos.***

**2.3 *Criterios para evaluar la expansión.***

**2.4 *Impacto del comportamiento de suelo expansivo en las edificaciones.***

**2.5 *Métodos de mejoramiento – estabilización de los suelos expansivos.***

A continuación se presenta algunos de los estudios encontrados en la literatura:

#### **2.1 NATURALEZA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.**

Los suelos expansivos son aquellos que cuando son expuestos al agua la absorben e incrementan con ello considerablemente su volumen. Los suelos expansivos surgen con la presencia de la arcilla. Las arcillas son fundamentalmente muy diferentes de las arenas, gravas y limos los cuales están compuestos de partículas voluminosas, inertes y gruesas. Las propiedades mecánicas de las arenas, gravas y limos dependen de tales propiedades como el tamaño, forma, textura y graduación de las partículas. Los suelos arcillosos, por otra parte, están compuestos de partículas extremadamente pequeñas y de forma plana las cuales poseen una gran área de superficie específica. Asimismo, las superficies de las partículas arcillosas poseen cargas eléctricas. Cuando el área de la superficie

específica de la arcilla se incrementa, llega a incrementarse prominentemente la carga eléctrica. Hay numerosos tipos de partículas arcillosas, por ejemplo. Caolinita, Illita, Montmorilonita. Ciertas arcillas poseen la capacidad de absorber el agua y asimilarla dentro de su microestructura, la forma, tamaño y cargas eléctricas de las partículas arcillosas les permiten asimilar las moléculas de agua **(Beltrán, 2009)**. .

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

La expansión de este tipo de arcillas está relacionada con dos factores: los factores ingenieriles del suelo, y las condiciones ambientales locales. La geología primeramente determina la presencia en el suelo de este tipo de minerales arcillosos expansivos. Entre los factores ingenieriles incluyen al contenido de humedad, la plasticidad y la densidad seca. Las más importantes condiciones locales a considerar son la cantidad de fracción arcillosa en el suelo, las condiciones de humedad inicial y la presión de confinamiento. **(Sabtan, 2005)**.

Los minerales arcillosos se caracterizan por ciertas propiedades que incluyen:

- a) Una estructura con una dimensión en el rango de nanómetro.
- b) La anisotropía de los espesores o capas.
- c) La existencia de varios tipos de superficies: basal externa (plana) y superficies de borde también como superficies internas.
- d) En el caso de la superficie externa y frecuentemente también la interna, la superficie puede ser modificada por (absorción e intercambio catiónico).
- e) Plasticidad.
- f) Endurecimiento en secado, esto aplica para la mayoría de minerales arcillosos.

**(Bergaya y Lagaly, 2006)**.

La Figura 1 muestra la estructura representativa de la partícula de arcilla, en donde identificamos los componentes que integran a este material y su interacción entre ellos.

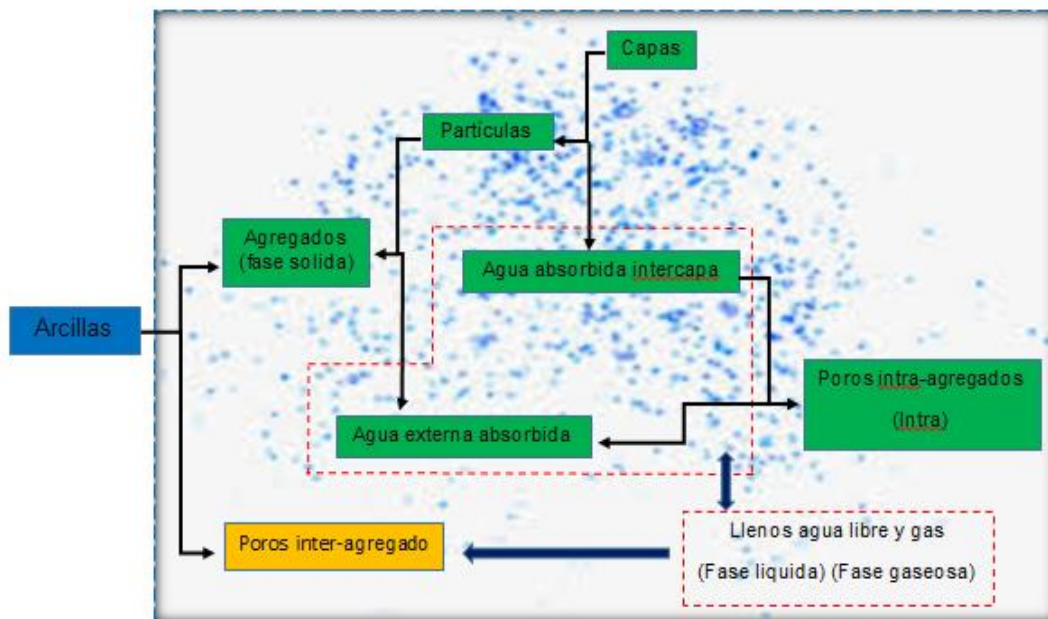


Figura 1. Estructura representativa de la arcilla expansiva (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006).

Los suelos expansivos son aquellos que experimentan grandes cambios de volumen cuando su contenido de agua varía. Estos tipos de suelos están distribuidos ampliamente por todo el mundo, aunque abundan especialmente en zonas áridas, donde las condiciones son ideales para la formación de minerales arcillosos del grupo de smectitas tales como la montmorilonita o algunos tipos de ilitas (Seco et al, 2011). Estas arcillas se caracterizan por tener muy pequeño tamaño de partículas, grandes superficies específicas y una alta capacidad de intercambio catiónico (CEC) (Fityus and Buzzi, 2009).



En la Figura 2 muestra la interacción de los minerales de arcilla con el ambiente, estableciendo la relación de las distintas fases con el entorno.

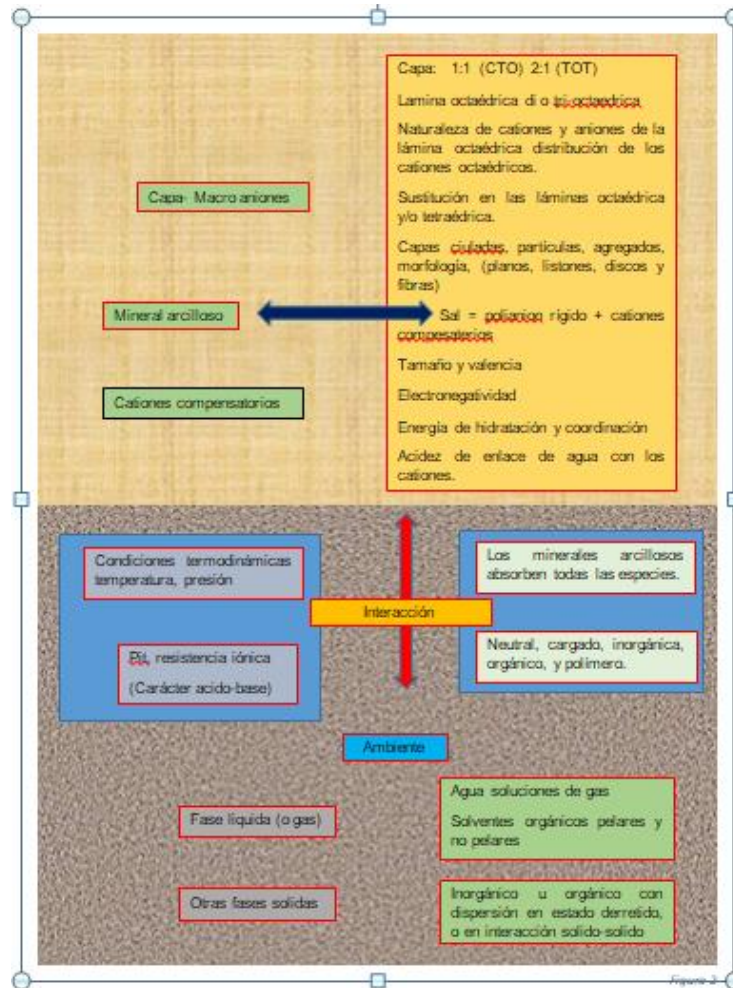


Figura 2. El diagrama muestra la interacción de minerales de arcilla con el ambiente. (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006).

Como observamos en la Figura 3 establece el arreglo de las partículas de arcilla definiendo los conceptos de poros: inter-capas, inter-partícula y inter-agregado. El diagrama muestra (A) una capa de mineral arcilloso, (B) una

partícula, conformada de varias capas, el movimiento de las capas y la deformación se debe a un poro lenticular, (C) un agregado, muestra un espacio inter-capa y un espacio inter-partícula, y (D) un ensamble de agregados, encerrando un espacio inter-agregado (poro). El arreglo de las partículas o agregados encabezan las diferentes morfologías, tales como placas, tubulares, listones y fibras. Todos los filosilicatos son porosos, contienen poros de varios tamaños y formas.

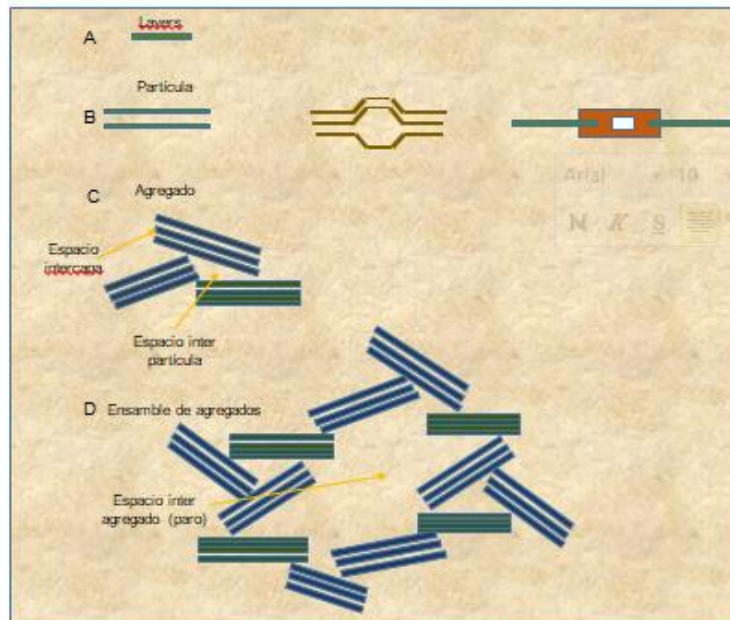


Figura 3. Arreglo de las partículas de arcilla (Fuente: Bergaya and Lagaly, 2006).

Los minerales arcillosos o pueden ser naturales o sintéticos, filosilicatos o no filosilicatos. Las estructuras de los filosilicatos se basan en láminas tetraédricas (T) y octaédricas (O) que pueden condensarse en proporciones 1:1 o 2:1 para formar una capa anisotropía TO O TOT. Las capas o láminas pueden estar cargadas negativamente, positivamente o sin carga (**Bergaya and Lagaly, 2006**).

Con lo anterior observamos en la Figura 4 observamos láminas tetraédrica de filossilicatos en la estructuración de la montmorilonita, mientras que en la Figura 5 identificamos en un “panal” estructuras tetraédricas conformando a un partícula arcillosa.

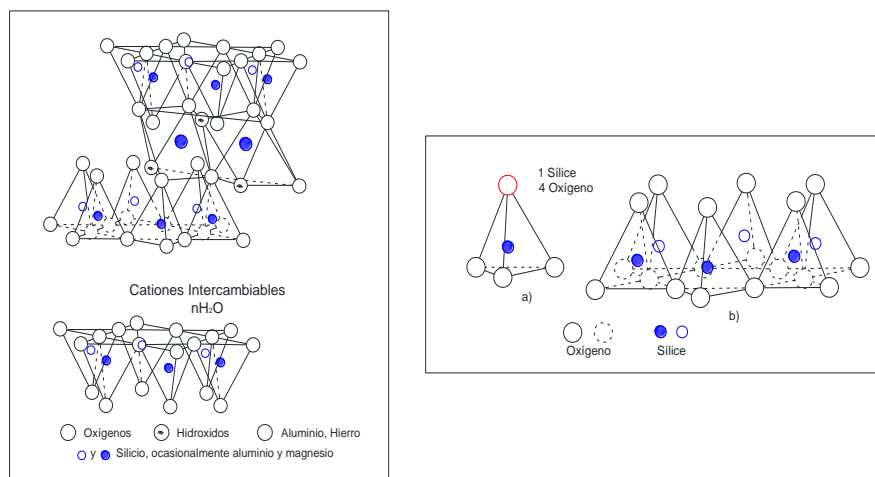


Figura 4. Estructura química de la montmorilonita (Fuente: propia).

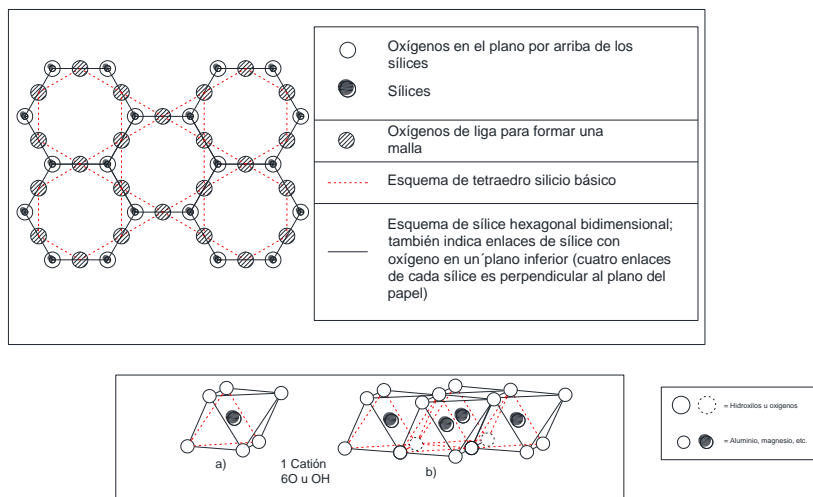


Figura 5. Arreglo químico de una partícula de arcilla que muestra su configuración especial (Fuente: propia).

Las moléculas de agua residentes en los poros mencionados, a diferentes escalas están sujetas a diferentes mecanismos y por consiguiente tienen que ser identificadas. El agua en los poros (inter-agregado) está libre para moverse y es dominada por fuerzas capilares. Por el contrario, el agua en los poros intra- agregado está fuertemente enlazada a las partículas de arcilla debido a la fuerza de hidratación o por fuerzas de dobles capa, las cuales dependen fuertemente del ambiente físico – químico. Al estar fuertemente enlazadas con las partículas de arcilla, esta agua es absorbida y no migrará ni se evaporará. Excepto cuando estén sujetas a grandes fuerzas. Cinemáticamente, el agua absorbida es prácticamente inmóvil y permanece adjunta a la fase sólida; termodinámicamente, el agua absorbida tiene un potencial químico más bajo comparada con el agua libre que se localiza a una distancia de la superficie de la partícula. **(Bergaya et al, 2006).**

Los problemas ingenieriles debido a los suelos expansivos han sido reportados en varios países del mundo. Se invierten millones de dólares debido a los diversos daños que provocan en las estructuras, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Los suelos expansivos contienen un mineral arcilloso llamado Montmorilonita que es capaz de absorber gran cantidad de agua y con ello expandirse. La naturaleza expansiva de la arcilla se incrementa al encontrarse más cerca de la superficie donde el perfil del suelo está sujeto a cambios estacionales y ambientales. Mientras más agua absorba se incrementará más su volumen. Los suelos expansivos se contraen cuando se secan. Se pueden desarrollar fisuras en el suelo. Estas fisuras ayudan al agua a penetrar a estratos más profundos del medio. Esto produce un ciclo de contracción – expansión que causa que el suelo sufra un gran cambio de volumen. Este

movimiento en el suelo resulta en daños estructurales especialmente en estructuras ligeras tales como banquetas, caminos, sótanos, tuberías y cimentaciones **(Mokhatari et al. 2012)**.

La naturaleza expansiva de la arcilla se incrementa cerca de la superficie donde el perfil del terreno está sujeto a cambios estacionales y ambientales. Los suelos expansivos llegan a contraerse cuando se secan, desarrollándose grietas en el suelo. Estas grietas ayudan a que el agua penetre a estratos más profundos. Cuanta más agua absorba el material expansivo, se incrementará más su volumen. Esto produce un ciclo de humedecimiento secado lo que provoca que el suelo sufra grandes cambios de volumen. **(Bhavsar et al. 2014)**.

En el esquema teórico desarrollado por **(Lei et al, 2014)**, establece dos niveles de estructura de suelo se observan en el sistema suelo poro, en donde se presentan una gran cantidad de fenómenos termo – mecánicos; (a) en el nivel macroscópico, el suelo es considerado, como un complejo arreglo de partículas asociadas con poros (inter – agregados) – macroporos, los cuales pueden ser llenados por gases o líquidos; (b) dentro de cada arreglo, el sistema micro-estructural, consiste en varios paquetes de partículas de arcilla y poros (inter-agregado) entre o dentro de las partículas, los cuales son definidos como micro-poros y son usualmente considerados por estar saturados incluso cuando el suelo en su totalidad este en un estado no saturado. En la Figura 6 observamos la estructura de un suelo arcilloso no saturado así como un modelo conceptual de los posibles modelos de deformación.



Figura 6. a) Macro estructura de un suelo arcilloso no saturado; (b) representación conceptual que demuestran los posibles mecanismos de deformación (Fuente: Lei et al, 2014).

## 2.2 IDENTIFICACION DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.

### 2.2.1 Distribución geográfica de los suelos expansivos.

Los suelos potencialmente expansivos se pueden encontrar en cualquier parte del mundo. En las naciones subdesarrolladas muchos de los problemas por suelos expansivos aún no han sido estudiados. Se puede esperar que conforme pase el tiempo se encontrarán más regiones con suelos expansivos, dependiendo del incremento en el número de construcciones. En la Figura 7 se indican las zonas potencialmente expansivas, que son limitadas por regiones semiáridas de las zonas de climas tropicales y templados.

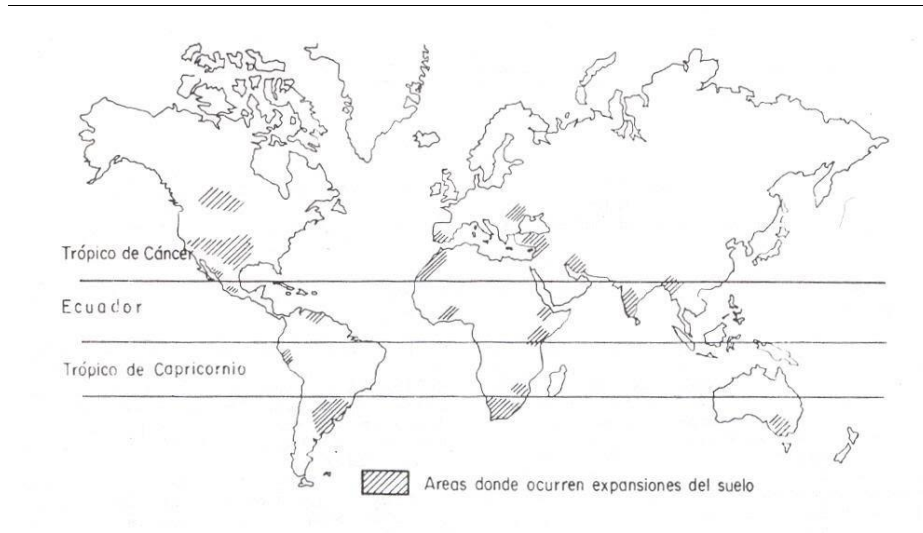


Figura 7. Distribución de los suelos expansivos en el Mundo (Fuente: Zepeda, 1989).

Basándose en la zonificación de los suelos expansivos de la República Mexicana, posiblemente muchas otras ciudades de nuestro país y/o lugares cercanos a ellas tendrán problemas por este tipo de suelo. La Figura 8 muestra las zonas afectadas por problemas de expansión de suelos.

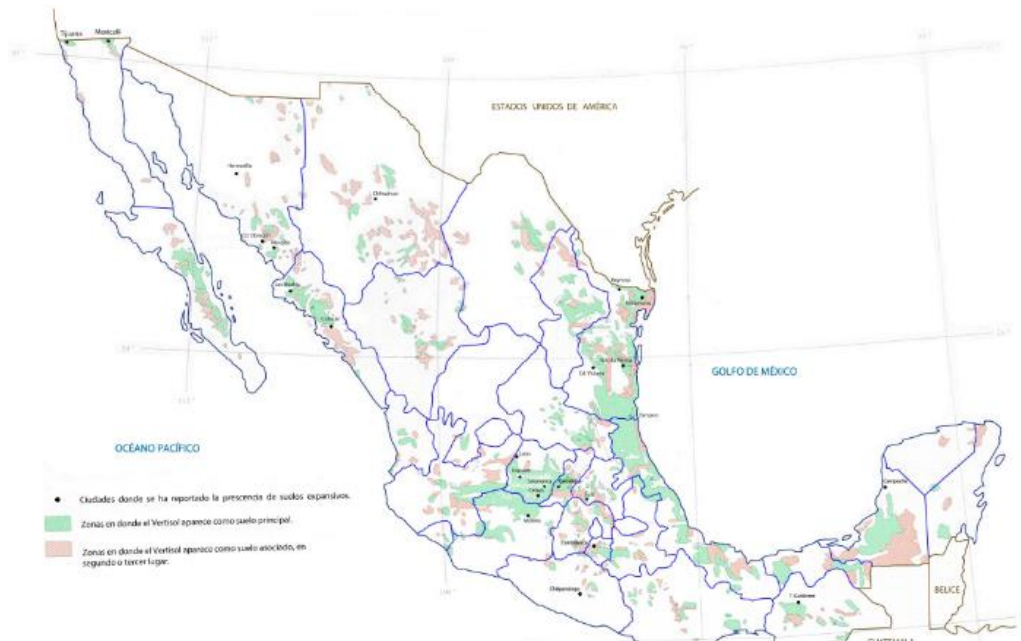


Figura 8. Zonas potenciales de suelos expansivos en la República Mexicana (Fuente: Zepeda, 1989).

### 2.2.2 Zona Activa de los suelos expansivos.

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

En las última décadas el término “zona activa” a tomado diferentes significados. Este término se refiere de alguna forma a la zona del suelo que tiene el potencial de producir alguna elevación de la superficie del terreno.



Los dos ingredientes que provocan una elevación del suelo son la presencia de suelo expansivo y un incremento en el contenido de agua. Así, la zona activa de be ser relacionada con aquella zona en la cual los contenidos de agua han cambiado o tiene el potencial de cambia (**Nelson et al, 2001**).

La variación de la humedad es máxima en la superficie, luego se amortigua con la profundidad para llegar a un punto en el cual el flujo estacional ya no afecta (Figura 9). Por tanto, existe una profundidad definida de la capa activa, por debajo de la cual el suelo permanece estable.

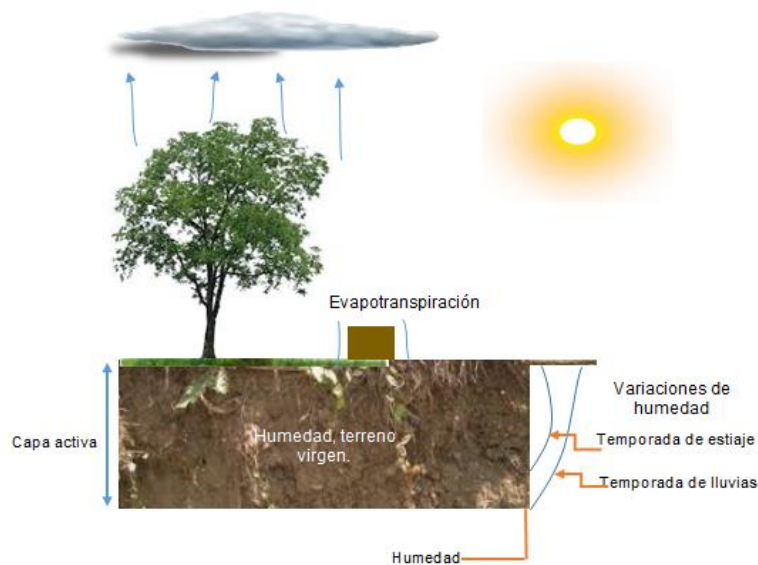


Figura 9. Zona activa de los suelos expansivos (Fuente: López, 2012).

En la Figura 10 se muestra el perfil de infiltración, el flujo descendente, muestra que un incremento en la velocidad de infiltración desencadena un aumento y disminución en la succión y contenido de agua, respectivamente, a medida que aumenta la altura sobre el nivel freático. Por el contrario, el perfil de evaporación, es decir, el flujo ascendente, muestra que un aumento en la velocidad de evaporación típicamente conduce a un aumento y disminución en la succión matricial y el contenido de agua, respectivamente, a medida que aumenta la altura sobre el nivel freático

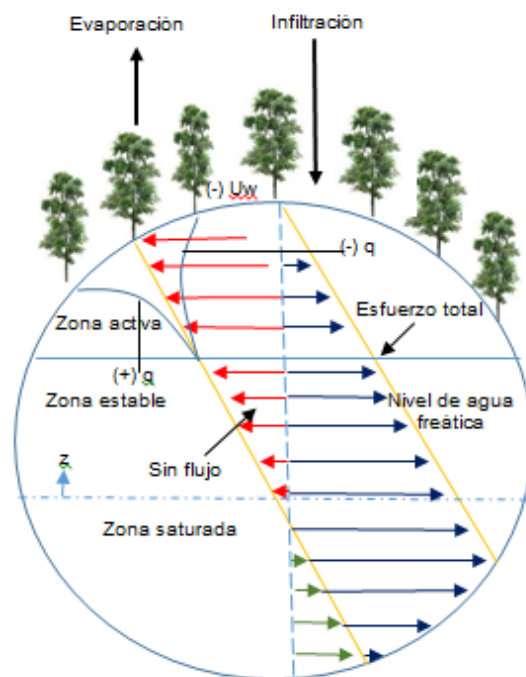


Figura 10. Perfiles de succión matricial bajo las condiciones de flujo superficial (Fredlund, 1996).

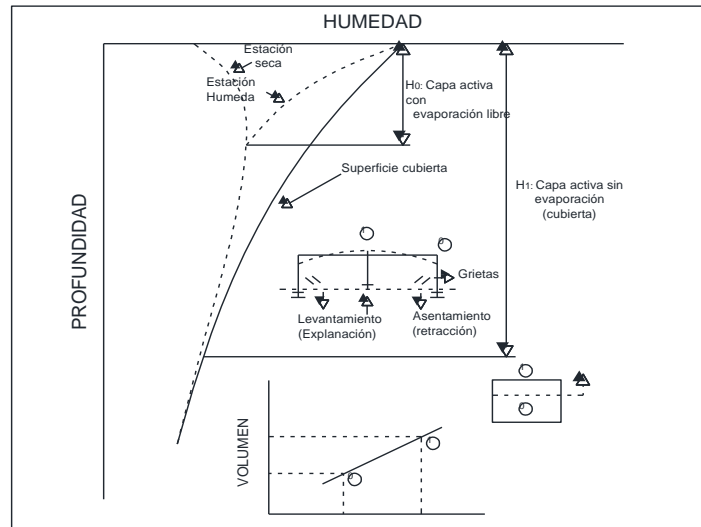


Figura 11. Relación de humedad - profundidad con relación al mecanismo de expansión contracción del suelo no saturado (Fredlund, 1996).

Se debe señalar que los cambios de humedad en el suelo pueden tener diversos orígenes y no solo por variaciones climáticas, sino también por ejemplo: las oscilaciones del nivel de aguas freáticas, fugas en instalaciones hidráulicas y drenajes; causas que no necesariamente son independientes (**López- Lara, 2002**).

## 2.3 CRITERIOS PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN.

### 2.3.1 Prueba de los límites de Atterberg.

Si una correlación entre los límites de Atterberg y la mineralogía de la arcilla estaría disponible para los ingenieros que trabajan en mecánica de suelos, una estimación de los cambios en las propiedades mecánicas pudieran obtenerse cuando los cambios en la mineralogía de la arcilla se conocieran **(Schmitz, 2004)**.

La evaluación de los límites de Atterberg son ensayos muy básicos en la mecánica de suelos que permite en primera instancia adentrarnos a la reactividad química de las arcillas. Básicamente, el límite líquido y el índice de plasticidad, están altamente y principalmente relacionados con la capacidad de los minerales arcillosos para interactuar con los líquidos **(Schmitz, 2004)**.

Los límites de Atterberg son los más comunes ensayos que practican los ingenieros geotecnistas. El límite líquido (LL) y el Límite Plástico (PL) tienen un significado físico para los minerales de los suelos de grano fino remoldeado y se correlacionan con varios parámetros fundamentales del suelo utilizados en el diseño y en la construcción **(O'Kelly, 2015)**.

El objetivo de los ensayos de límites de Atterberg es obtener información índice básica acerca del suelo utilizado para estimar características de resistencia y asentamientos. Varios errores de procedimiento probablemente se presentarían por los siguientes escenarios: ancho de la ranura, profundidad de la ranura, mezcla de suelo no uniforme, manejo de rápido a lento, altura de caída ajustada impropriamente y aire seco del suelo

ente ensayos para el ensayo de límite líquido. Técnica inapropiada para rolar los rollos, diámetro de los rollos menor a o mayor a 1/8 in. , contenido de humedad reducido de la muestra y aire seco del suelo antes de que el contenido de humedad se haya obtenido, lo anterior para el ensayo de límite plástico. Para el límite de contracción, burbujas de aire atrapadas en las muestras del suelo seco, el peso y otros errores de medición y el riesgo de envenenamiento por mercurio para el operador. **(Gady et al, 2015).**

La Tabla 1 muestra la correlación empírica entre las propiedades índice y las propiedades mecánicas elementos necesarios para la caracterización geotécnica.

Tabla 1. Correlación empírica entre las propiedades índice- propiedades mecánicas (Fuente: Beltrán, 2009).

| Propiedades índice primarias                                      | Correlación empírica con propiedad mecánica     |
|---|---|
| Grado de Saturación   | Propiedad de expansión, conductividad eléctrica |
| Peso específico seco  | Potencial de expansión y presión de expansión   |
| Partículas menores a 2 $\mu$                                      | Actividad-potencial expansivo                   |
| Contracción lineal  | Presión de expansión                            |
| Contenido volumétrico de agua                                     | Conductividad hidráulica                        |
| Límite líquido  | Potencial de expansión y presión de expansión   |
| Peso específico relativo de sólidos                               | Potencial de expansión                          |
| Compacidad  | Potencial de expansión y compresibilidad        |
| Humedad   | Succión   |
| Resistencia a la penetración estándar                             | Potencial de expansión                          |
| D <sub>60</sub> , I <sub>p</sub> , y % que pasa la malla No: 200. | Curva característica suelo—agua.                |

### 2.3.2 Prueba de volumen constante.

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

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

Este procedimiento se continúa hasta que el espécimen deja de mostrar tendencia a expandirse. La carga aplicada en este punto es conocida como presión de expansión sin corregir (la corrección se hace por deformación del aparato). El espécimen es después cargado y descargado de manera convencional. Los resultados son generalmente graficados en ejes tridimensionales como se muestra en la Figura 12

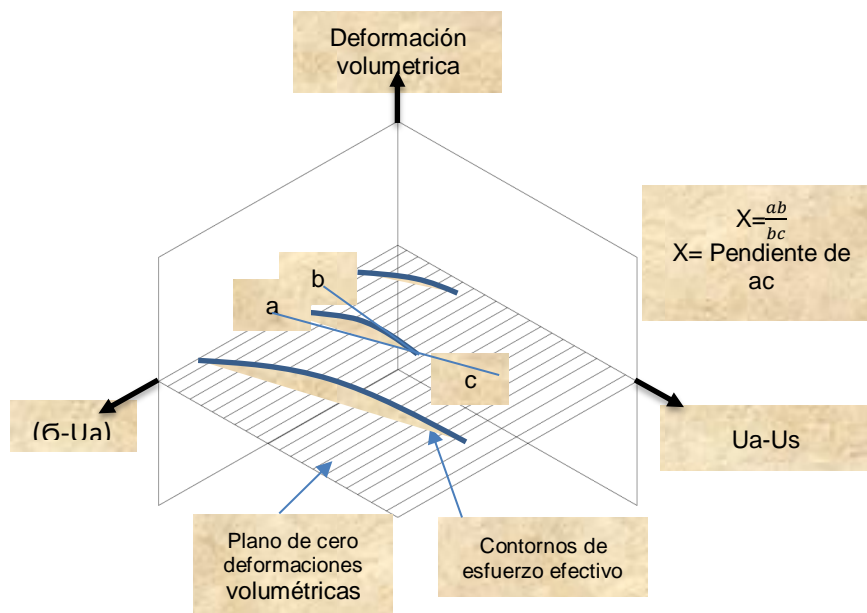


Figura 12. Diagrama tridimensional esfuerzo – deformación que muestra los contornos de esfuerzo efectivo constante en un suelo parcialmente saturado (Fuente: Beltrán, 2009).

La presión de expansión puede ser afectada por:

- Compactación/Densidad seca después de la compactación (la presión de expansión se incrementa con el incremento de la compactación).
- Resistencia iónica (la presión de expansión disminuye con el incremento de la salinidad).
- Contenido de agua inicial (la presión de expansión disminuye con el incremento del contenido de agua agua).
- Temperatura (sujeto a discusión), y
- Intercambio catiónico (particularmente a baja densidad seca).

**(Khaufhold et al. 2015).**

### 2.3.3 Prueba de expansión libre no restringida.

En este ensaye al espécimen se le permite expandirse libremente, tan solo con una sobrecarga aplicada. La carga necesaria para regresar al espécimen a su relación de vacíos original, es llamada presión de expansión. Este ensaye tiene la limitante de permitir un cambio de volumen e incorporar un fenómeno de histéresis en la estación del estado de esfuerzo in situ; sin embargo es comúnmente empleado por su sencillez de realización.

Se coloca el espécimen bajo una pequeña sobrecarga de aproximadamente 1 lb/pulg<sup>2</sup> (6.9 kN/m<sup>2</sup>). Luego se agrega agua al espécimen y se mide el aumento del volumen del espécimen (es decir la altura, pues la sección transversal es constante) hasta que se alcanza el equilibrio. **(Cabrera, 2006).**

#### 2.3.4 Porcentaje de expansión.

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

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

$$S\% = \frac{\delta}{h_0}$$

donde::

S% = Porcentaje de expansión.

$\delta = h_0 - h_f$  = Expansión generada en el espécimen cuando se satura.

$h_0$  = Altura inicial

$h_f$  = Altura final

#### 2.3.5 Presión de expansión.

La presión de expansión definirá el esfuerzo necesario para regresar el espécimen, mediante sucesivos incrementos de carga, a la condición de inicial de volumen.





resulta despreciable el volumen del suelo bajo la carga aplicada (Figura 14).

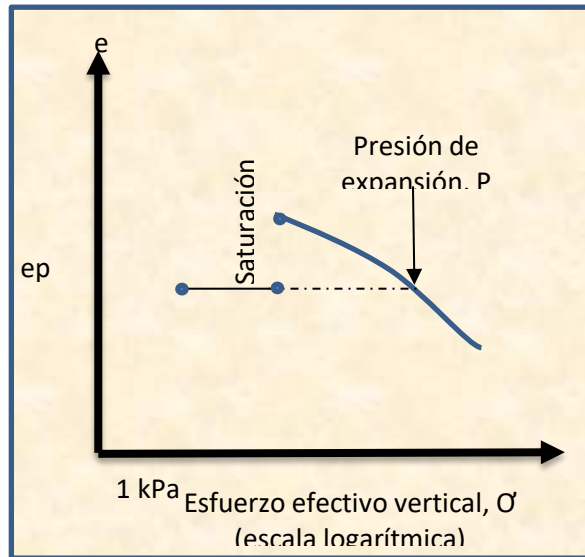


Figura 14. Método B para determinar la presión de expansión, con expansión por inundación, bajo la sobrecarga estimada in situ o alguna otra descarga de estructura (ASTM, D 4546-03).

Método C. Se evita la expansión del suelo al generarse su hidratación. Se realizan los ajustes necesarios hasta que se tienen una presión máxima (presión de expansión), la cual se ha obtenido a volumen constante. Posteriormente se lleva a cabo una prueba de consolidación. Si se desea conocer la expansión después de haberse definido la presión de expansión, se puede descargar al suelo (Figura 15).

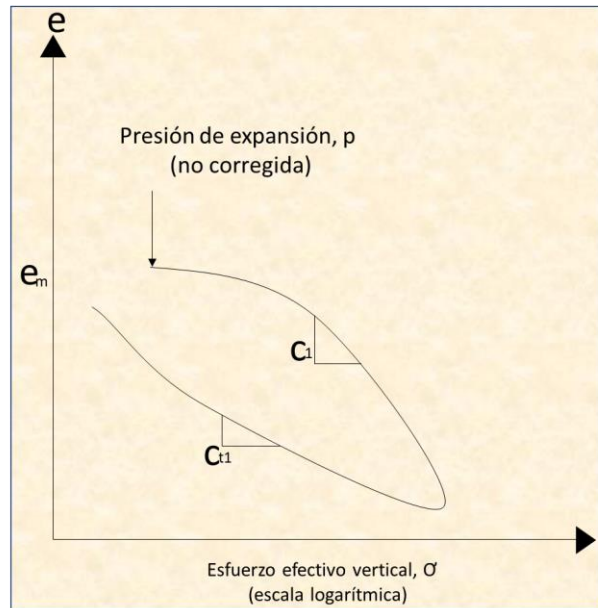


Figura 15. Método C para determinar la presión de expansión, a volumen constante, inundando la muestra (ASTM, D 4546-03).

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

Tabla 2. Resumen de los métodos actuales para predecir el cambio de volumen in situ de los suelos expansivos con el tiempo (Fuente: Adem y Vanapalli, 2014).

| Descripción                      | Métodos basados en la teoría de consolidación   |  | Método basado en contenido de agua  |   | Método basado en succión  |   |
|----------------------------------|---|--|---|---|---|---|
|                                  | Basados en modelos elásticos constitutivos (Vu y Fredlund, 2004; Zhang 2004)  | Basados en modelos elásticos constitutivos (Abed, 2008)  | Briaud et al. (2003)  | Overton et al (2006)  | Wray et al. (2005)  | Adem and Vanapalli (2013)   |
| <b>Ecuaciones gobernantes</b>    | Continuidad del agua y equilibrio de esfuerzos  | Continuidad del agua y equilibrio de esfuerzos   | La ecuación del movimiento del suelo formulada al extender el paralelismo entre la prueba de contracción, el método del contenido de agua y los métodos de asentamientos. | Ecuación de la expansión libre en campo   | Ecuación de la succión-difusión transitoria de Mitchell   | Ecuación constitutiva de cambio de volumen simplificada para suelo estructura, y modelo semi empírico para estimar $E_{unsat}$                            |
| <b>Variables de estado</b>       | Succión matricia $u_a-u_w$ y esfuerzo normal neto, $\sigma_m-u_a$   | Succión matricia $u_a-u_w$ y esfuerzo normal neto, $\sigma_m-u_a$  | Contenido de agua, w  | Contenido de agua volumétrica, $\theta$   | Succión total del suelo   | $u_a-u_w$   |
| <b>Ensayes requeridos</b>        | Vu y Fredlund (2004); Ensaye con odómetro convencional, odómetro o corte triaxial, ensayos con control de succión; Zhang (2004); ensaye de consolidación-expansión, ensaye de contracción libre, ensaye de succión y ensaye de gravedad específica. | Ensaye con odómetro convencional, odómetro o corte triaxial, ensayos con control de succión.                                 | Ensaye de contracción   | Ensaye de papel filtro, ensaye de consolidación - expansión, ensaye de volumen constante. | Ensayes para medir el coeficiente de difusión, y el índice de compresión - succión.                     | Ensayes de papel filtro, ensayos convencionales para medir módulos de elasticidad saturada, $E_{sat}$ , tales como ensaye triaxial o ensaye con odómetro. |
| <b>Programas computacionales</b> | Vu y Fredlund (2004); FlexPDE para análisis no acoplados, COUPSO para análisis acoplados, Zhang (2004); Programa Abacus/standard  | PLAXFLOW para simular un flujo de agua subterránea y PLAXIS para predecir los movimientos del suelo expansivo con el tiempo. | Ninguno   | VADOSA W para simular la migración de agua en respuesta a las condiciones atmosféricas    | SUCH con dos modelos: i) modelo de flujo de humedad y ii) modelo de cambio volumétrico                  | VADOSA W para simular flujo saturado y no saturado en respuesta a los cambios ambientales. -  |
| <b>Condiciones iniciales</b>     | Inicial succión matricia ( $u_a-u_w$ ), y esfuerzo normal neto inicial, ( $\sigma_m-u_a$ )  | ( $u_a-u_w$ ), ( $\sigma_m-u_a$ )  | Ninguno   | Perfil de contenido de agua inicial   | Succión total inicial.  | Perfil de succión matricia inicial o perfil de contenido de agua inicial.   |
| <b>Condiciones de frontera</b>   | Succión matricia, flujo de agua, carga aplicada y desplazamiento del suelo.   | Succión matricia, flujo de agua, carga aplicada y desplazamiento del suelo.  | Ninguno.  | Flujo de agua, presión de agua de proo y datos climáticos.                                | Succión total, u.   | Succión matricia, flujo de agua, datos climáticos, datos térmicos y datos de vegetación.  |
| <b>Resultados</b>                | Vu y Fredlund (2004); 1D, 2D Y 3D, expansión con el tiempo; Zhang (2004); movimiento vertical de la superficie del terreno (contracción/expansión) con el tiempo.   | Movimiento vertical de la superficie del terreno (contracción/expansión) con el tiempo.                                      | Movimiento vertical de la superficie del terreno (contracción/expansión) con el tiempo.   | Expansión libre del campo con el tiempo.  | Movimiento superficial del suelo (expansión, contracción) bajo las superficies cubiertas.               | Movimiento superficial del suelo (expansión, contracción) a cualquier profundidad con el tiempo.  |
| <b>Aplicaciones</b>              | Vu y Fredlund (2004); un edificio industrial en Regina, Saskatchewan, Canadá, Zhang (2004); para simular movimientos de zapatas en Arlington Texas, EUA.  | Para predecir los aviamientos de suelo expansivo debajo de un muro construido en Barakat, Sudan.                             | Para simular movimientos de zapatas en un sitio de Arlington, Texas, EUA.   | Perfiles del suelo en el área de Denver Colorado, EUA.                                    | Sitio de ensayes Amarillo y estación College localizados en Texas y Al- Gatt ubicado en Arabia Saudita. | Cuatro casos de estudio ubicados en dos países. Canadá y China.   |

## **2.4 IMPACTO DEL COMPORTAMIENTO DE SUELO EXPANSIVO EN LAS EDIFICACIONES.**

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

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

Este tipo de suelo se expande cuando entra en contacto con el agua y se contrae cuando el agua se evapora. Debido a este movimiento estructuras ligeras tales como cimentaciones, pavimentos, canales y edificios residenciales cimentados en ellos son severamente dañados (**Chen, 1988**).

Se estima que el daño provocado a las estructuras desplazadas sobre suelos expansivo es de \$1,000 millones de dólares en Estados Unidos, £150 millones de libras esterlinas en el Reino Unido y varios billones de dólares en el mundo (**Sabat et al., 2011**).

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

En la Figura 16 observamos el agrietamiento estructural presente en una vivienda debido al movimiento perimetral provocada por la expansión de las arcillas.



Figura 16. Agrietamiento de la estructura por movimiento perimetral provocada por la expansión de la arcilla (Fuente: Propia).

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



Figura 17. Agrietamiento de la estructura provocado por la expansión de la arcilla (Fuente: Propia).

Los suelos no saturados poseen ciertas estructuras mineralógicas, generalmente expanden en volumen cuando son expuestos a cambio de humedad. Dichos suelos tienen una alta afinidad por el agua, su volumen aumenta cuando absorben agua y disminuye cuando pierden agua. La fuente de agua puede venir de lluvia, inundación, filtraciones por tuberías rotas o por una reducción de evapotranspiración cuando un área es cubierta por edificios o pavimentos. La expansión puede ejercer suficiente presión para agrietar pavimentos, estructuras ligeras como viviendas, sótanos, losas de cimentaciones, tuberías de agua, causando grandes daños a estructuras si no son tratados adecuadamente **(Cokca et al., 2009)**.

Los suelos juegan un papel muy importante en los ecosistemas, además de ser el soporte para cualquier desarrollo de infraestructura y crecimiento urbano; el conocimiento de sus propiedades geomecánicas es de gran importancia para la construcción, ya que las áreas caracterizadas por materiales arcillosos pueden manifestar fenómenos de expansión o colapso debido a hidratación o deshidratación de los suelos expansivos, pudiendo causar fuertes problemas geotécnicos **(Carrasco Nuñez, 2012)**.

Los suelos expansivos son pensados como la principal causa de problemas en estructuras ligeras, estos suelos expansivos están presentes en muchas partes del mundo, especialmente en regiones con climas áridos y semiáridos. El daño estructural causado por estos suelos puede ser reducido o prevenido determinando las propiedades expansivas de los

suelos y los factores que afectan estas propiedades en la construcción **(Turkoz et al., 2014)**.

En la Figura 18 observamos una casa habitación que presenta en los elementos estructurales agrietamientos provocados por un movimiento céntrico del medio donde se desplanto derivado por la expansión de la arcilla.

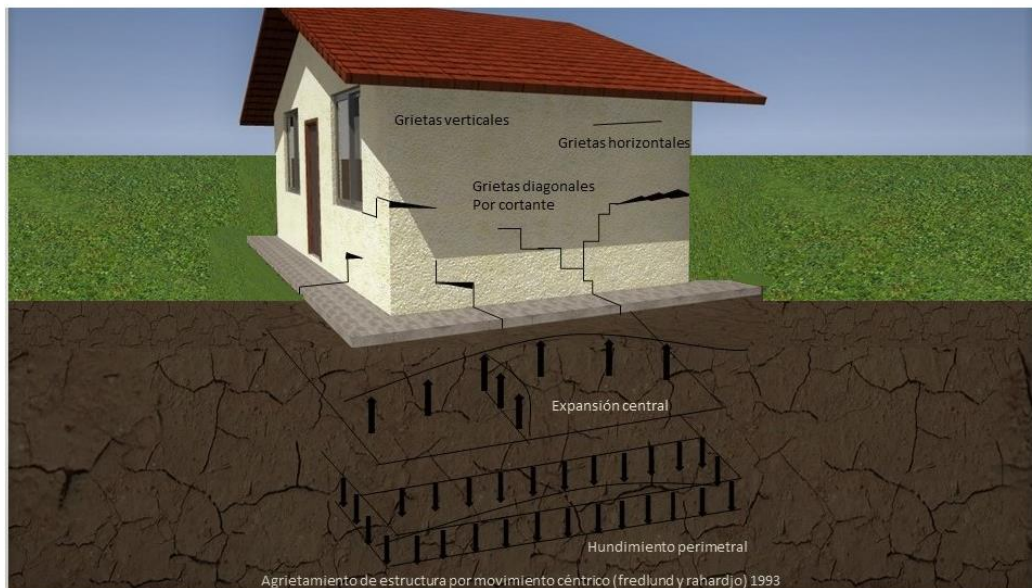


Figura 18. Agrietamiento de la estructura por movimiento céntrico (Fuente: Propia).

Como consecuencia de estas características y vistas las funciones que los suelos arcillosos adquieren en las obras de construcción, es posible identificar una serie de efectos sobre las mismas que se producen de manera directa. Fundamentalmente se pueden clasificar según sigue:

- Perturbación de los procesos constructivos que se manifiesta en falta de trabajabilidad, dificultades para el drenaje, y sensibilidad a las condiciones meteorológicas desfavorables;



- Introducción de incertidumbres en la estimación de resistencias, dado que normalmente un incremento en las condiciones de humedad suele repercutir en el reblandecimiento de los suelos y la disminución de su resistencia;
- Movimientos asociados a cambios volumétricos por diferencias de humedad, que pueden originarse por causas naturales, como cambios en el nivel freático o en las condiciones atmosféricas del entorno, o artificiales, por el reajuste de las humedades empleadas en el proceso constructivo a las condiciones ambientales finales;
- Deformaciones plásticas del asiento de las construcciones; y
- Erosión y degradación de su superficie a la intemperie, manifestados por los cuarteos y agrietamientos característicos de ciclos de sequedad y humedad, que afecta negativamente a su durabilidad y a su estabilidad. **(Bauza, 2015).**

Mientras que los *efectos de las edificaciones sobre suelos expansivos*.

Pero de igual modo es posible identificar unos efectos indirectos o inducidos por las construcciones que hacen que las consecuencias anteriormente mencionadas se amplifiquen en su magnitud o se compliquen con efectos secundarios, inicialmente imprevistos. Ello se debe a que las construcciones producen sobre los suelos en que se asientan o que las circundan fenómenos que se pueden agrupar en:

- Variación de las condiciones de contorno por cambios en la geometría que alteran los espesores naturales de los estratos de manera diferencial, en especial por excavaciones como las producidas en sótanos y desmontes a media ladera.
- Cambios en las condiciones de drenaje originados por la impermeabilización de la superficie de contacto de los suelos parcial

o totalmente con el ambiente exterior. Es lo que se conoce como el “efecto de borde” cuya ilustración más evidente se produce en la construcción de una zona pavimentada impermeable sobre un suelo arcilloso, que genera zonas centrales y de borde de comportamiento diferenciado ante cambios de humedad:

- Incrementos de humedad por filtraciones: este efecto, que en ocasiones es no deseado y en otras es de alguna manera intencionada provoca la entrada de agua en los materiales en mayor medida que la que existía antes de la construcción a través de vías preferentes o localizadas. Suele originarse en casi todo tipo de obras y ejemplos comunes son:
- En edificios y zonas urbanizadas: Las redes de saneamiento y alcantarillado, sótanos, jardines, etc. o En muros: Las grietas en el relleno, drenajes en trasdoses, etc (**Bauza, 2015**).

## *2.5 MÉTODOS DE MEJORAMIENTO – ESTABILIZACIÓN DE LOS SUELOS EXPANSIVOS.*

Los ingenieros, arquitectos, contratistas, han tratado de muchas formas reducir los efectos dañinos provocados por los suelos expansivos. Sus acciones se basan en acercamientos de prueba y error. Han utilizado estabilización mecánica como extensión práctica sin embargo han encontrado también necesario alternar las propiedades físico-químicas de los suelos arcillosos para estabilizarlas permanentemente (**Petry, et al, 2002**).

Las técnicas de mejoramiento de terreno, son técnicas que son utilizadas para modificar las propiedades del terreno con el objetivo de adquirir condiciones favorables para un propósito particular, tales como la

densificación el suelo, acelerar la consolidación, etc. Todas estas técnicas tienen un fin particular estabilizar el suelo con un objetivo constructivo.

- Las técnicas de mejoramiento del suelo son utilizadas para mejorar los problemas siguientes del suelo:
- Incrementar la capacidad de carga.
- Reducir el asentamiento del suelo.
- Reducir la licuefacción durante un sismo.
- Reducir ampliamente la presión de agua de poro.
- Evitar la contracción y expansión.
- Evitar la licuefacción del suelo

**(Waseem et al, 2016).**

Hay dos técnicas de mejoramiento de terreno o técnicas de estabilización el suelo:

- Técnicas de mejoramiento mecánico.
- Técnicas de mejoramiento químico.

Los mecanismos de las técnicas de mejoramiento del terreno son las siguientes:

Hay 4 mecanismos con los cuales se puede estabilizar un suelo:

- Compactación.
- Humedecimiento.
- Mezclas
- Reforzamiento.

**(Waseem et al, 2016).**

La estabilización de suelos puede ser definida como la alteración o preservación de o más propiedades del suelo para mejorar las características ingenieriles y desempeño de un suelo. La estabilización, en un sentido amplio, integra varios métodos, que son empleados para mejorar las propiedades de un suelo al mejorar sus propiedades ingenieriles. La estabilización de suelos se refiere al procedimiento en el cual a un suelo espacial, se le agrega por ejemplo cemento u otros materiales químicos para mejorar una o más de sus propiedades. Uno puede lograr la estabilización al mezclar mecánicamente el suelo natural y el material estabilizante para alcanzar una mezcla homogénea (**Afrin, 2017**).

Los principales mecanismos que se aplican para el tratamiento de los suelos arcillosos y la reducción de sus efectos perjudiciales sobre las construcciones se pueden agrupar en actuaciones mediante procesos físicos o procesos químicos. Los más frecuentes son los siguientes:

**Procesos físicos:**

Sustitución por materiales menos sensibles

Mezcla con otros materiales

Recompactación de los suelos.

Control de las condiciones de humedad.

**Procesos químicos:**

Mezcla con conglomerantes.

Mezcla con otros productos estabilizadores.

La Figura 19 muestra distintas alternativas de mejoramiento de suelos expansivos y que involucra actuaciones sobre el suelo, la humedad y la cimentación.

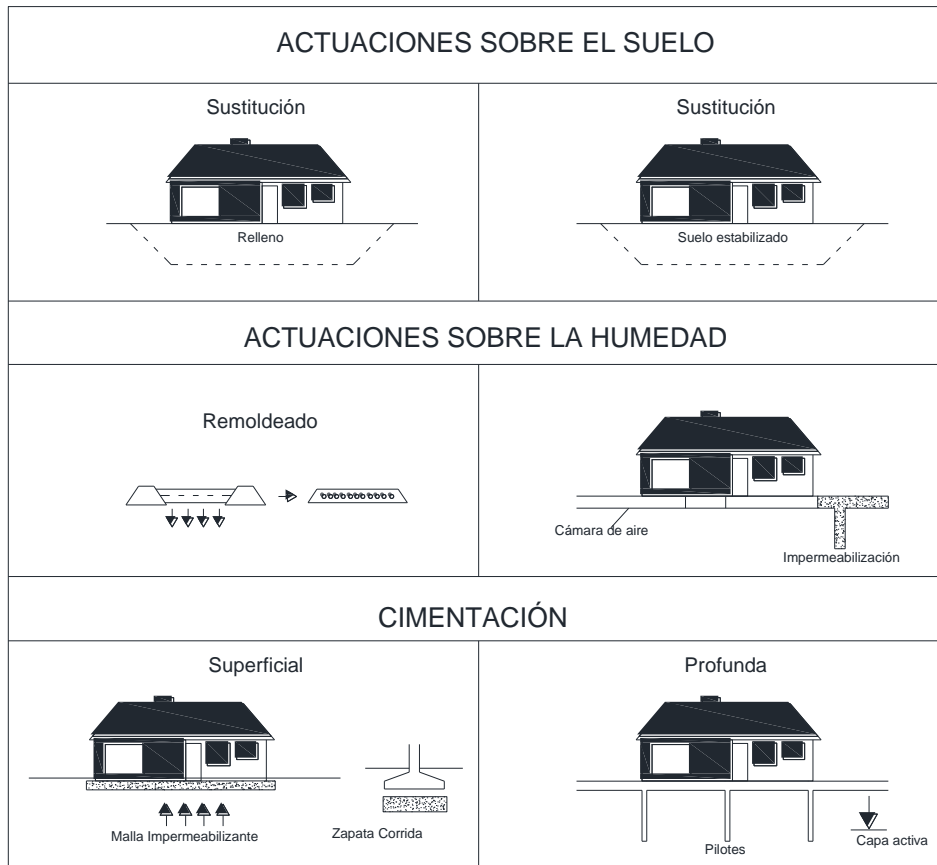


Figura 19. Métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación (Fuente: Propia).

Para suelos que exhiben comportamiento expansivo bajo a mediano, la presión de hinchamiento puede ser controlada por una sobre-carga o relleno. Su aplicación requiere de una investigación de las características expansiva del suelo. Esta carga se puede relacionar con la descarga de una estructura ligera al medio que

oscila en el valor de las 2 ton/m<sup>2</sup>. En la Figura 20 se identifica un modelo de vivienda en donde el peso propio de la misma al medio favorece el abatimiento de la expansión del suelo.

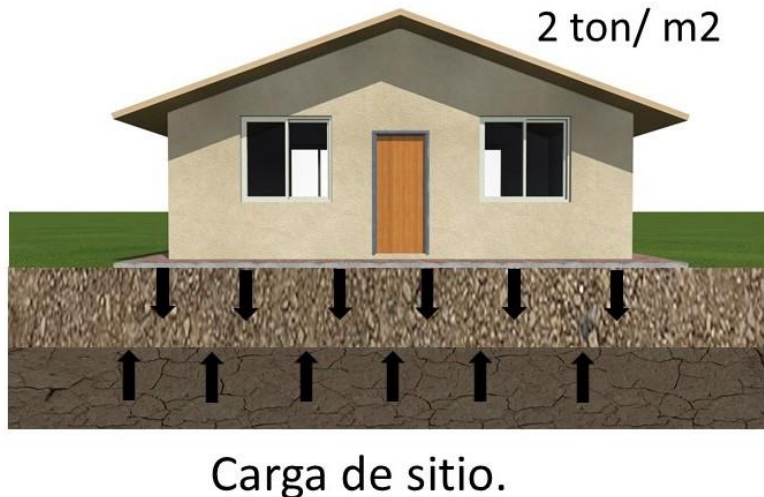


Figura 20. Descarga de una estructura ligera al material expansivo (Fuente: Propia).

El tratamiento de suelos con aditivos (mezclado o inyectado) como cal, cemento, sal, ceniza fina y resinas (compuestos orgánicos) reducen la capacidad expansiva de los suelos. La dosificación adecuada depende de tipo de arcilla que se esté estabilizando y requiere de pruebas de laboratorios.

La mezcla superficial de cal con el suelo potencialmente expansivo o su inyección a presión es benéfica, según el estado del suelo (agrietado o no) y el método de aplicación (inyección a presión o mezcla mecánica). Se debe disponer del equipo adecuado para pulverizar el suelo en el sitio del tratamiento, o para realizar inyecciones a presión (**NSR, 2010**).

El principal objetivo de la estabilización química es mejorar la estabilidad del suelo expansivo. Esto se logra al incrementar el tamaño de la partícula del suelo por medio del índice de plasticidad, disminuir el potencial expansión-contracción y cementación. Lo anterior se logra al añadir una cantidad específica de compuesto químico al suelo expansivo. A través de los años cal, ceniza, cemento, y algunos otros compuestos químicos han sido exitosamente empleados para la estabilización del suelo (Hasan et al ,2015).



## Estabilización.

Figura 21. Estabilización con agentes químicos como la cal para estabilizar el medio y con ello abatir la expansión (Fuente: Propia).

La teoría de prehumedecer el suelo antes de la construcción está basada en el hecho de que si al suelo se le permite que se expanda antes de la construcción y si posteriormente la humedad del suelo es mantenida, no es de esperar cambios volumétricos y por lo tanto no es esperable daños sobre la estructura. Los suelos arcillosos, que son potencialmente expansivos, son muy difíciles de prehumeder siendo lo más factible que el agua penetre a través de fisuras, etc., no lográndose una humectación pareja del suelo. La razón es que el prehumedecer el suelo con lleva reducir en una forma muy significativa los parámetros resistentes del suelo,

lo que lo hace inadecuado para el apoyo de cimientos aislados. En la Figura 22 observamos un modelo de vivienda en donde se indica la técnica de pre saturación (pre humedecimiento).

El pre humedecimiento supone la expansión previa a la colocación de la estructura y al mantenimiento de esa humedad bajo una placa o un recubrimiento impermeable. Se debe tener presente que generalmente se requiere mucho tiempo para que el agua penetre en la zona activa. (NSR, 2010).

El fin de la técnica de pre humedecimiento es proveer humedad al suelo expansivo con el fin de que se presente la expansión antes de la ejecución de la construcción (Hasan et al ,2015).



### Pre saturación.

Figura 22. Estrategia para estabilizar el medio por medio de la pre saturación (pre-humedecimiento) con el fin de establecer un equilibrio en el medio y con ello minimizar la expansión (Fuente: Propia).

Consiste en la excavación y el reemplazo de la capa expansiva, cuando su espesor y profundidad no lo hacen prohibitivamente costoso, por un



material inerte. (R. C. D. C. S, 2010), en la Figura 23 se observa un modelo de vivienda en donde el material expansivo fue sustituido por tepetate.

La sustitución del suelo es la técnica de estabilización del suelo más ampliamente utilizada. La profundidad del suelo que será reemplazado dependerá del perfil del suelo local, de las recomendaciones de reglamentos de construcción (Hasan et al ,2015).



Figura 23. Método de sustitución el cual consiste el cambiar el material expansivo por un material inerte. (Fuente: Propia).

El propósito de barreras para el control humedad es promover un contenido de humedad uniforme en el suelo debajo del cimiento por medio de la minimización de la pérdida o ganancia de humedad, y por ende reduciendo los cambios volumétricos del suelo. También, un buen drenaje perimetral a la construcción mejorará el desempeño de los cimientos en suelos expansivos.

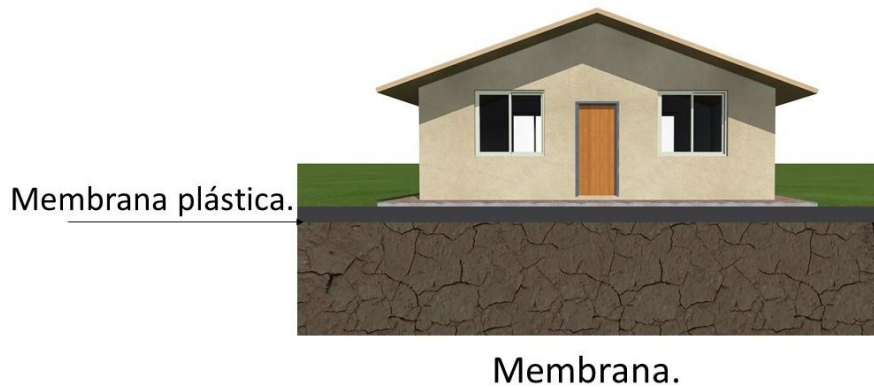


Figura 24. Como alternativa para mitigar los efectos adversos del movimiento del medio se aísla la estructura haciendo uso de membranas impermeables (Fuente: Propia).

En la Figura 25 identificamos tres escenarios del comportamiento entre la edificación y el material expansivo. La descarga de la edificación hacia el medio queda representada por  $Q_1$ , mientras que la expansión del material queda especificada por  $P_1$ . En el primer caso cuando  $Q_1 > P_1$  estaremos ante el escenario en donde el peso de la estructura ayudara a abatir la expansión del suelo, por otro lado en el segundo caso cuando tenemos la siguiente concisión  $Q_2 > P_2$  aquí el peso de la descarga es igual al valor de la expansión del suelo logrando un modelo en equilibrio y por otro lado para el tercer caso  $Q_3 > P_3$  el peso de la estructura es menor comparado con el valor de expansión del medio lo que provocará un escenario adverso en la edificación que se traducen: movimientos diferenciales lo que generará problemas en los elementos estructurales.

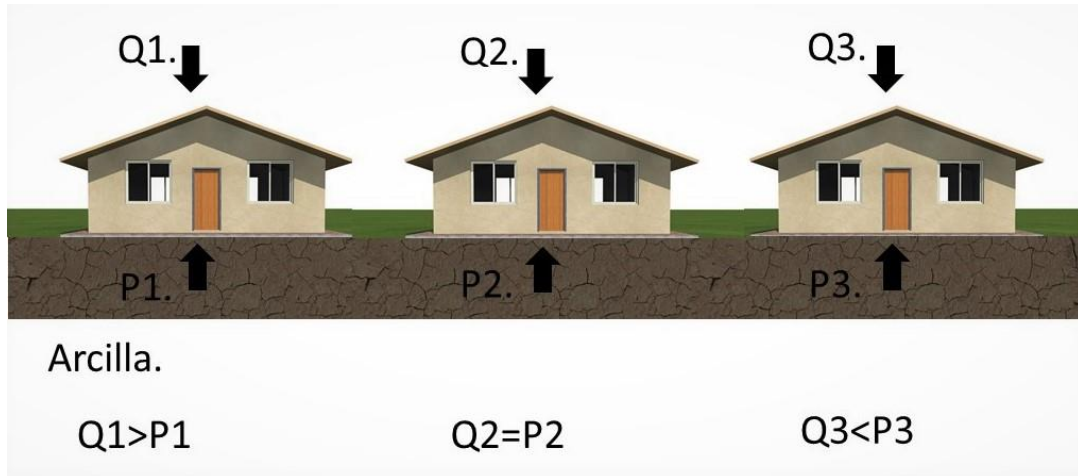


Figura 25. Modelos gráficos que ejemplifican el comportamiento de la estructura vs el material expansivo (Fuente: Propia).

A manera de resumen en la Figura 26 presentamos una lámina representativa de modelos en renders de los distintos métodos de estabilización del suelo expansivo.

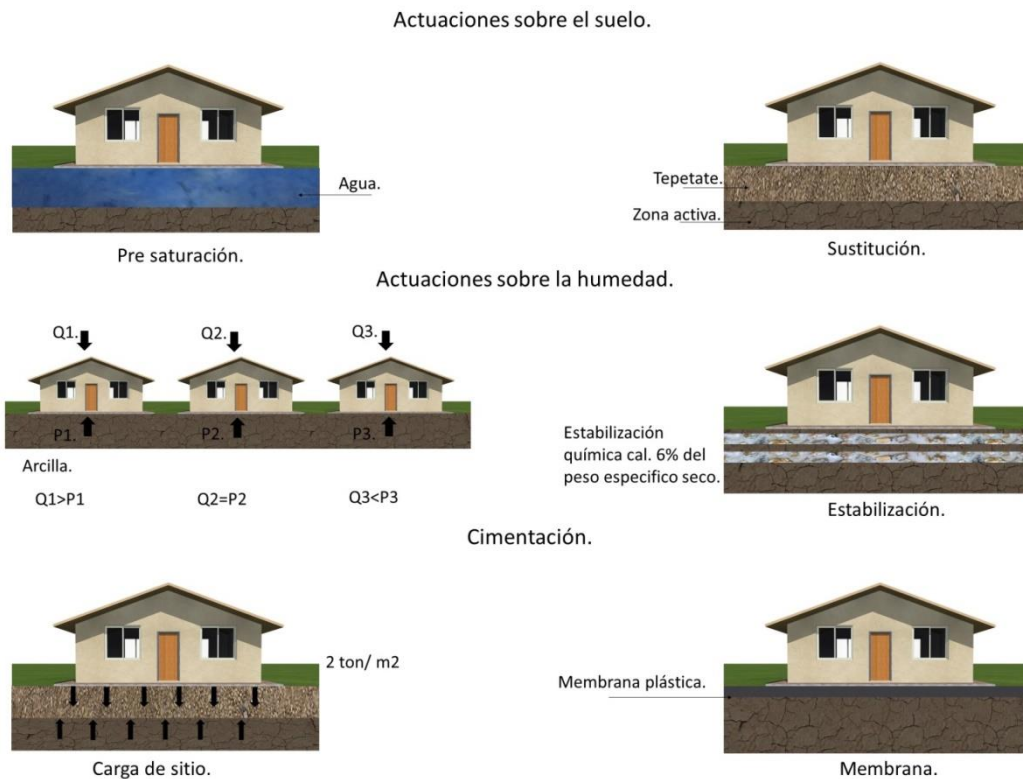


Figura 26. Renders esquemáticos de las actuaciones de los métodos de estabilización del suelo expansivo, mismas que actúan sobre el suelo, la humedad y la cimentación (Fuente: Propia).

Los fenómenos asociados con la expansión de suelos arcillosos que afectan su estabilidad incluyen: (a) el tipo específico de mineralogía presente, (b) la historia de esfuerzos de la masa de suelo, (c) La historia de desecación de la rasante, (d) el clima donde se ubica este tipo de suelo, (e) los cambios de propiedades que se presentan en estos suelos con el tiempo, (f) los ambientes físico - químicos existentes en la masa de suelo y alrededor de las partículas de suelo. Debido a algunos de estos fenómenos la estabilización del suelo puede ser llevada a cabo con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo (Petry, et al. 1990).

Debido a los problemas relacionados con suelos expansivos, existen diferentes soluciones para las cimentaciones, entre otras, podemos mencionar la estabilización volumétrica del suelo utilizando cal. Las experiencias de la estabilización del suelo reportada en la literatura, están generalmente relacionada con caminos y carreteras. Sin embargo, las arcillas expansivas han provocado diversos daños a viviendas, algunas de ellas presentando una destrucción parcial o total. La mayoría de los constructores conocen la efectividad de la estabilización de suelo con cal. Esta técnica ha sido aplicada muy poco como una solución a las cimentaciones sobre suelo expansivo. Esto puede ser debido al desconocimiento de algunos aspectos en el comportamiento y procedimiento de construcción, el cual es principalmente empírico. El procedimiento recomendado, generalmente aceptado por los constructores., para una estabilización de suelo arcilloso una vez que el porcentaje de cal ha sido determinado, es llevar a cabo en estratos de 15 cm o menos de espesor los siguientes trabajos: Escarificación y pulverización, esparcimiento de cal, mezcla preliminar y humidificación, curado inicial, mezcla final y pulverización, compactación y curado final **(López-Lara et al, 2005).**

Muchos problemas preocupan a las cimentaciones están relacionadas con las capas de arcilla encontradas en diferentes casos de estudio en terraplenes deformados, estructuras ligeras y edificios de varios niveles. Estos casos demuestran que muchos problemas ocurren debido a la compresión de la capa de arcilla causando el colapso de la cimentación. Es por esto que muchos investigadores emplean técnicas para estabilizar suelos que mejoren las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos para mantener caminos, prevenir el colapso de estructuras, controlar los

asentamientos de cimentaciones y evitar cualquier falla asociada (**Azzam, 2014**).

Las arcillas expansivas son consideradas un suelo problemático por los ingenieros civiles, porque causan daño severo a las estructuras construidas sobre ellas. Diversos aditivos son comúnmente utilizados para el tratamiento de arcillas expansivas los cuales incluyen: cal, polímeros, cemento, cal, surfactantes, cenizas y mezclas de algunos de estos aditivos. La cal, sin embargo, ha sido, comúnmente utilizada para el tratamiento de los suelos expansivos y otros suelos debido a que mejora las propiedades mecánicas de los suelos expansivos. Además es económico y esta abundantemente disponible en muchas partes del mundo. Algunos estudios son emprendidos y reportados en la literatura para explicar el mejoramiento en las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo expansivo, debido a la adición de limo y otros estabilizantes, principalmente desde un punto de vista macroscópico. El enfoque de la mayoría de estas investigaciones fueron los cambios asociados con los valores de límite de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y las propiedades del suelo, tales como el cambio volumétrico (presión de expansión, potencial de expansión), resistencia al corte y el coeficiente de permeabilidad de los suelos expansivos estabilizados.

Otros estudios se enfocaron en el entendimiento de las reacciones fundamentales que surgen durante la estabilización de la arcilla y cal. Basado en tales estudios, los investigadores atribuyeron el mejoramiento en las propiedades geotécnicas de los suelos estabilizados con cal a cuatro reacciones básicas: Intercambio catiónico, floculación y aglomeración, carbonatación y finalmente la reacción puzolanica. (**Al-Mukhtar et al, 2012**).

Hay un consenso general en la literatura acerca de los primeros tres tipos de reacciones, como reacciones instantáneas. Sin embargo la reacción puzolanica, la cual es considerada como el parámetro clave en la estabilización suelo-cal, es una reacción dependiente del tiempo. La reacción puzolanica surge en ambientes altamente alcalinos (con un valor pH >12) producida por la adición de la cantidad mínima de cal al suelo expansivo. Se cree que el ambiente altamente alcalino sea el responsable para la disolución lenta de los constituyentes alumino-silicatos de la arcilla (láminas octaédricas y tetraédricas). Estos constituyentes reaccionan con el  $\text{Ca}^{2+}$  de la cal y precipita cementantes hidratados así como une las partículas de suelo adyacentes **(Al-Mukhtar et al, 2012)**.

El tratamiento con cal tiene un efecto benéfico sobre las propiedades de los suelos arcillosos al mejorar varias de sus propiedades ingenieriles; una reducción en el contenido de agua y del potencial de expansión, un mejoramiento en la trabajabilidad y la compactación in situ y un incremento en la resistencia mecánica. El tratamiento con cal desencadena cambios en la estructura y de textura en los suelos arcillosos e irreversibles cambios en su comportamiento mecánico **(Al-Mukhtar et al, 2014)**.

Ante la presencia de un suelo expansivo, los dos grandes campos de acción sería actuar en el sentido de reducir o eliminar la expansión del suelo y/o actuar sobre la estructura y a través de la selección de un diseño de cimentación apropiado. **(Patrone et al, 2015)**.

El suelo expansivo puede alterarse por los siguientes métodos. “Sustitución” (consiste en la excavación y el reemplazo de la capa expansiva, cuando su espesor y profundidad no lo hacen prohibitivamente

costoso), Tratamiento con cal (La mezcla superficial de cal con el suelo potencialmente expansivo o su inyección a presión es benéfica, según el estado del suelo y el método de aplicación), Prehumedecimiento (Supone la expansión previa a la colocación de la estructura y el mantenimiento de esa humedad bajo una placa o un recubrimiento impermeable)” **(Quintero et al, 2015)**.

La estabilización de suelos es un método económico y ultimo para adquirir las propiedades geotécnicas deseadas. La estabilización química del suelo es una técnica popular y efectiva que mejora la trabajabilidad y la resistencia al corte del suelo. El cemento cal, yeso, escoria y cenizas son ejemplos de aditivos químicos que han sido utilizados para efectivamente para mejorar las características de compresibilidad y resistencia del suelo. Sin embargo el uso de estabilizadores químicos pueden causar daño al ambiente, limitar el crecimiento de plantas y alterar la calidad del agua subterránea. **(Ta'negonbadi, 2016)**.

Algunos suelos son inapropiados para utilizarlos en caminos, cimentaciones, presas, y otras obras civiles debido a las especificaciones técnicas desfavorables y al poseer importantes cantidades de arcilla y limo. Tales suelos crean problemas contra la humedad, baja resistencia y compresibilidad debido a la sensibilidad e inestabilidad. Si el cambio del suelo no es posible, los métodos de mejoramiento de suelo deben ser investigados para que el método seleccionado sea económicamente y justificable y aplicable. Los más importantes objetivos de la estabilización del suelo es la adquisición de uno o más de los siguientes aspectos:

- Modificar los suelos de baja resistencia y blandos.
- Incrementar la estabilidad del suelo.
- Incrementar la capacidad de carga.



- Reducir la permeabilidad.
- Reducir la expansión y contracción del suelo.
- Reducir la humedad del suelo.

**(Nematzadeh, 2017).**

La estabilización es una técnica efectiva y confiable para modificar propiedades importantes del suelo. Algunos métodos para estabilizar suelos expansivos que encontramos en el quehacer ingenieril son: estabilización con aditivos mecánicos, pre humedecimiento, reemplazamiento del suelo, control de compactación, control de humedad, sobrecarga y métodos térmicos. Estas técnicas tienen una amplia aplicación en la construcción de carreteras, estabilización de taludes, terraplenes, etc. Los suelos son generalmente estabilizados para incrementar su resistencia y durabilidad o prevenir erosión. El principal fin es la creación de un material de suelo para que perdure en el periodo de vida del proyecto ingenieril. Las propiedades del suelo varían ampliamente en diferentes lugares. Varios métodos son empleados para estabilizar el suelo y el método debe ser verificado en laboratorio con el material antes de ser aplicado en campo **(Priya et al, 2017)**.

Las necesidades y ventajas de la estabilización de suelo son las siguientes.

Mejora la resistencia del suelo, así incrementa la capacidad de carga.

- Es más económico en términos de costo y energía, incrementa la capacidad de carga del suelo.
- También provee más estabilidad al suelo en taludes.
- Algunas veces la estabilización del suelo es también utilizada para prevenir erosión del suelo.
- Ayuda en reducir el cambio volumétrico debido al cambio de temperatura y/o cambio de humedad.

- La estabilización mejora la trabajabilidad y la durabilidad del suelo.  
**(Priya et al, 2017).**

# CAPÍTULO 3

## 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

### 3.2 Extracción de muestras y caracterización del suelo.

El suelo utilizado en la presente investigación es una arcilla expansiva proveniente del fraccionamiento de Jurica, Querétaro. Se realizó un sondeo de pozo a cielo abierto a una profundidad de 1.50 metros con el objetivo de obtener muestras alteradas e inalteradas. Se realizaron ensayos de granulometría límites de Attenberg, obtención de humedad, peso específico relativo de sólidos, de compactación (Proctor Estándar), con el objetivo de caracterizar el suelo a emplear en la presente investigación. En la figura 27 observamos la localización del predio en donde se obtuvieron las muestras para la realización de ensayos.

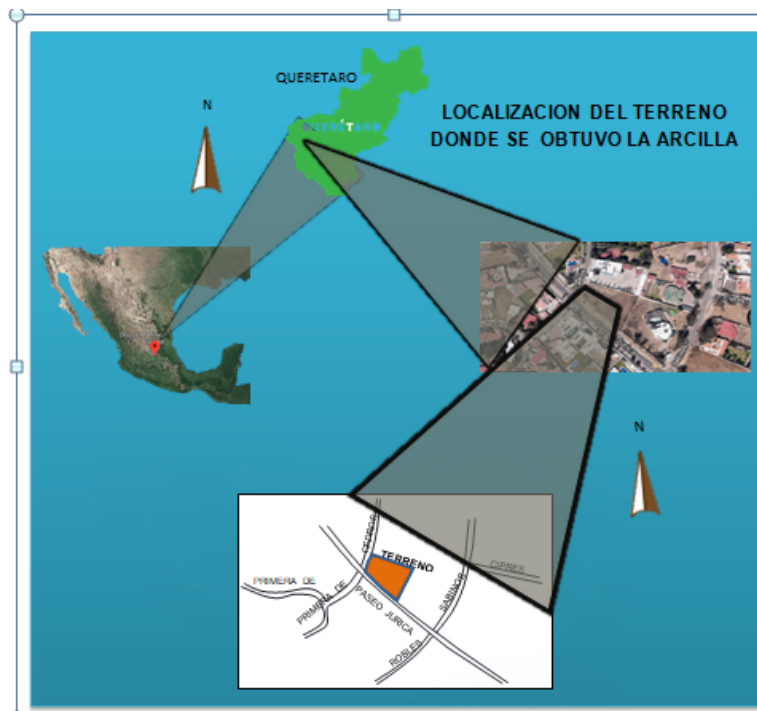


Figura 27. Localización del predio en donde se extrajeron las muestras para la realización de los ensayos.

# CAPÍTULO 3

## 3.3 Metodología.

**Se identificó el tipo de suelo natural en estudio y modificado con cal.**

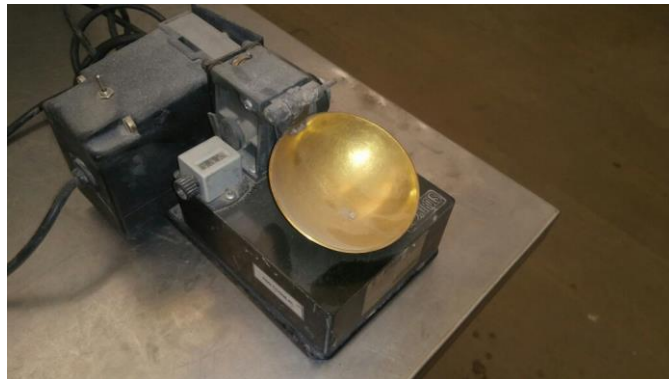
Esta etapa se desarrolla determinando las Propiedades Índice del suelo: Límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico) bajo la norma ASTM (2003) 04318-00 y Peso específico relativo de sólidos. Estos ensayos se aplicaron al suelo natural y estabilizado con sus diferentes dosificaciones de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco). La cal empleada es una cal comercial hidratada. Lo anterior se realiza con el objetivo de analizar los cambios en la plasticidad del suelo a medida que se incrementa el porcentaje de estabilizante.

A continuación se detalla cada etapa llevada a cabo en esta etapa experimental:

## 3.4 Preparación de la muestra.

### 3.4.1 Suelo natural.

Se realizaron varias pastillas del material natural con el objetivo de realizar los ensayos de Atterberg (Figura 28 y 29) que nos permitan identificar la clasificación del material de acuerdo a la Carta Unificada de Clasificación de Suelos (SUCS). El material utilizado corresponde a una arcilla expansiva clasificada como de alta compresibilidad (CH), según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).



## CAPÍTULO 3

Figura 28. Copa de Casagrande para la obtención de límite líquido (Fuente: propia).



Figura 29. Ensaye de Copa de Casagrande para la obtención de límite líquido (Fuente: propia).

### 3.4.2 Suelo modificado.

Para la caracterización del suelo modificado se elaboraron pastillas dosificadas con cal, se colocaron varias muestras de material en bolsas de distintos contenidos de porcentaje de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco). La elaboración de las pastillas (remoldeo de material arcilloso y cal) se realizó de manera manual. El tiempo de curado que se dejó para que la cal actuara sobre el material expansivo fue de 24 horas. Posteriormente se tomaron varias muestras para llevar a cabo los Límites de Atterberg y con ello clasificar el material de acuerdo al Sistema unificado de Clasificación e Suelos. (SUCS).

### 3.4.3 Preparación de suelo – cal.

Antes de realizar las pruebas del suelo estabilizado con cal, fue necesario preparar el material con la cantidad deseada de cal. Para ello se debió homogenizar el suelo para obtener un material uniforme, posteriormente se le agregó la cal para que actuara sobre el material (Figura 30). Lo

## CAPÍTULO 3

porcentajes que se añadieron fueron de 2, 4 y 6% en peso de polvo de cal hidratada sobre peso de suelo seco.



Figura 30. Muestras de material en bolsas de distintos contenidos de porcentaje de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco) (Fuente: Obtención propia).

La mezcla del material se ha realizado a mano hasta obtener un resultado homogéneo. Una vez acabado este proceso, el recipiente que contiene al suelo se selló para dejar la mezcla reposar en una cámara a temperatura y humedad constante un plazo de unas 24 horas (, de manera que se permita la difusión, homogeneización y acción del agua y la cal sobre el suelo. Es lo que se conoce como proceso de maduración (Figura 31).



# CAPÍTULO 3

Figura 31. Muestras de material clasificado en distintos contenidos de porcentaje de cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco (Fuente: Obtención propia).

## 3.4.4 Cal empleada.

Para esta tesis se ha empleado una cal comercial hidratada en polvo suministrada en sacos.

## 3.4.5 Preparación de las probetas.

Para la realización de los distintos ensayos se ha requerido la preparación de probetas, éstas se han fabricado mediante compactación estática en prensa en el interior de los diferentes moldes requeridos para cada ensayo. Una vez transcurrido el tiempo de maduración de la mezcla en la cámara en el caso de suelos tratados o con el suelo sin tratar, se procedió a la fabricación de las distintas probetas necesarias para los distintos ensayos. Se ha seleccionado el método de compactación estática como el más adecuado para la consecución de muestras lo más semejantes posibles dado que al haberse ensayado un gran número de probetas esta similitud es un factor crucial para permitir la comparación de resultados.

## 3.4.6 Curado.

Antes del ensayo se ha mantenido la probeta aislada en recipientes y/o bolsas para permitir su curado, manteniéndola en dichas condiciones durante períodos de 24 hrs.. Este plazo se han considerado suficientes para documentar los efectos perseguidos **(Di Maio et al, 2002) (López et al., 2005)**.

# CAPÍTULO 3

## 3.4.7 Proporciones de mezcla con cal.

Para la realización de los ensayos objeto de la presente tesis de investigación se han seleccionado como proporciones de adición los valores del 2, 4 y 6 por ciento en peso de cal sobre suelo seco. Estas proporciones se corresponden con valores constructivos usuales en el tratamiento de suelos expansivos en México,

Así, valores inferiores no resultan prácticos desde el punto de vista constructivo, pues la mezcla de tan pequeñas proporciones con suelos habitualmente muy húmedos y difícilmente disgregables hace casi imposible obtener una homogeneidad que asegure la penetración de los agentes estabilizadores a todas las partículas micrométricas de arcilla.

Por otra parte, valores más altos suelen demostrarse inicialmente como innecesarios, como se ilustró en el capítulo del marco teórico, debido a que las mejoras de trabajabilidad y resistencia suelen lograrse en estos márgenes.

## 3.4.8 Pruebas de Compactación.

Se han realizado las pruebas de compactación sobre la muestra de suelo natural y modificado bajo las condiciones proctor estandar.

Ensayo de compactación. Proctor Estandar bajo la norma ASTM D698.

**Se determina la compactación del suelo natural y estabilizado con cal (2, 4 y 6% respecto al peso seco).** Para poder analizar cómo se comportaría el suelo durante el proceso de compactación a medida de que



## CAPÍTULO 3

se le adhiere un agente estabilizante (cal) se realizó el ensaye Proctor Estándar y se determinó la variación en el Peso Específico Seco Máximo y la Humedad Óptima. Los ensayes se realizaron bajo la norma ASTM D698) (Figura 32, 33 y 34).



Figura 32. Equipo especializado para realizar ensaye de proctor estándar (Fuente: propia).



Figura 33. Colocación del material arcilloso en el molde de compactación (Fuente: propia).

## CAPÍTULO 3



Figura 34. Enrase del molde con el objetivo de realizar el ensaye de compactación Proctor estándar (Fuente: propia).

### 3.4.9 Peso específico relativo de sólidos.

Se ha realizado esta determinación mediante el procedimiento del picnómetro establecido en la norma A Determinación del peso específico relativo de sólidos.

### 3.4.10 Cambios volumetricos por saturación.

Expansión libre. Conforme a la norma ASTM D 4546-03 Ensayo de expansión libre de un suelo en edómetro (Figura 35) se ha realizado este ensayo, caracterizado por medir la expansión de una muestra inundada bajo una carga a distintos valores de descarga de sitio que experimentará el medio ( 2 , 4, 8 y 10 Ton.).

## CAPÍTULO 3



Figura 35. Elementos que integran el consolidómetro para realizar el ensaye de expansión libre (Fuente: propia).

### 3.4.11 Determinación de la cantidad de cal que abatió la expansión del suelo sin considerar la carga.

Esta sección se evalúa realizando pruebas de expansión en el consolidómetro al suelo natural y estabilizado con cal. La importancia de realizar un tratamiento de suelo expansivo radica en lograr reducir su potencial de expansión, por tal motivo se han realizado pruebas de expansión libre para así analizar cómo disminuye el porcentaje de expansión a medida que se incrementa el agente estabilizante. Los ensayos se realizaron bajo la norma ASTM D4546 - 03 método B).

### 3.4.12 Determinación de la descarga que abate la expansión del suelo natural sin estabilizarlo con cal.

Este apartado se lleva a cabo realizando pruebas de expansión en el consolidómetro al suelo natural expansivo (Figura 35) con diferentes cargas que partieron de 2 ton y aumentaban en 2 hasta encontrar la que

## CAPÍTULO 3

contrarrestaba la expansión. La descarga de la superestructura al medio puede abatir la expansión del suelo. Los ensayos se realizaron bajo la norma ASTM D4546 - 03 métodos B (Figuras 36 y 37).



Figura 36. Muestra natural en el consolidómetro (Fuente: propia).



Figura 37 Ensayo de expansión para identificar la carga que abate la expansión sobre el terreno natural, colocación de la carga de sitio (Fuente: propia).

### 3.4.13 Determinación de las combinaciones ideales de descarga junto con la cantidad de cal requerida que abaten la expansión del suelo.

Esta etapa se lleva a cabo realizando pruebas de expansión en el consolidómetro. Los ensayos se realizaron al suelo estabilizado con cal (2, 4 y 6%, respecto a su peso seco) aplicándole a cada dosificación

## CAPÍTULO 3

simultáneamente diferentes cargas que partieron de 2 ton e iban aumentando. Los ensayos se realizaron bajo la norma ASTM D4546 - 03 método B (Figura 38).



Figura 38. Ensayes de las muestras dosificadas con cal y con aplicación de carga (Fuente:propia).

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

### 4. RESULTADOS.

#### 4.1 Identificación del tipo de suelo natural en estudio y modificado con cal.

Las propiedades índice medidas (Límites de Atterberg y Peso específico relativo de sólidos) al suelo natural y estabilizado con cal (2, 4 y 6%) se muestran en la Tabla 3. La identificación del suelo natural y modificado con cal, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, se lleva a cabo en la Carta de Plasticidad de la Figura 39.

Tabla 3. Propiedades índice del suelo natural y suelo cal.

| Ss*                    | Límite Líquido (%) | Límite Plástico (%) | Índice Plástico (%) |
|------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 2.60                   |                    |                     |                     |
| Suelo natural          | 72                 | 32                  | 40                  |
| Suelo natural + 2% cal | 59                 | 33                  | 26                  |
| Suelo natural + 4% cal | 53                 | 35                  | 18                  |
| Suelo natural + 6% cal | 49                 | 36                  | 13                  |

\*Pesos específico relativo de sólidos.

El suelo utilizado corresponde a una arcilla de alta compresibilidad (CH). La Figura 40 muestra como la clasificación del suelo natural expansivo se va modificando dentro de la Carta de Plasticidad al ir adicionando la cal (2, 4 y 6%). De tal forma que con un 6% de cal, el material termina clasificándose como una arcilla de baja compresibilidad (CL).

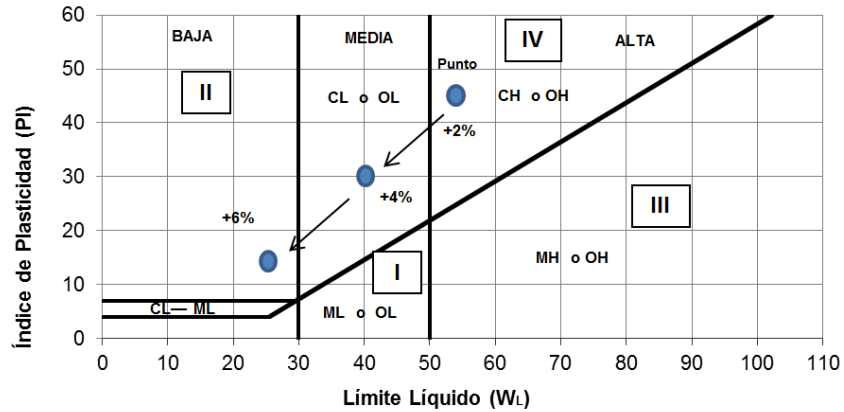


Figura 39. Clasificación del suelo natural y modificado con cal dentro de la Carta de Plasticidad.

#### 4.2 Determinación de la Sobrecarga que abate la expansión del suelo natural, sin estabilizarlo con cal.

La evaluación de esta sección se llevó a cabo realizando pruebas de expansión en el consolidómetro al suelo natural expansivo, sin modificarlo con cal, con diferentes cargas que partieron de 2 ton y aumentaban en 2 hasta encontrar la que contrarrestaba el hinchamiento. La Tabla 4 y Figura 39 muestran los resultados de los ensayos de Expansión realizados al suelo natural cargado. Las cargas requeridas en esta parte del estudio fueron de 2, 4, 6, 8 y 10 Ton. Observando los resultados, identificamos que prácticamente la carga de 10 ton disminuye la expansión a valores menores de 1%. En la Figura 40 observamos la expansión del suelo no tratado y no tratado con sobrecarga, mientras que en la Figura 41 identificamos el % de expansión y el valor de la sobrecarga.

Tabla 4. Expansión del suelo bajo cargas de 2, 4, 6, 8 y 10 Ton.

| Suelo                  | Expansion promedio (%) |
|------------------------|------------------------|
| Suelo natural          | 10.58                  |
| Suelo natural + 2 Ton  | 5.81                   |
| Suelo natural + 4 Ton  | 4.10                   |
| Suelo natural + 6 Ton  | 3.60                   |
| Suelo Natural + 8 Ton  | 1.54                   |
| Suelo Natural + 10 Ton | 0.575                  |



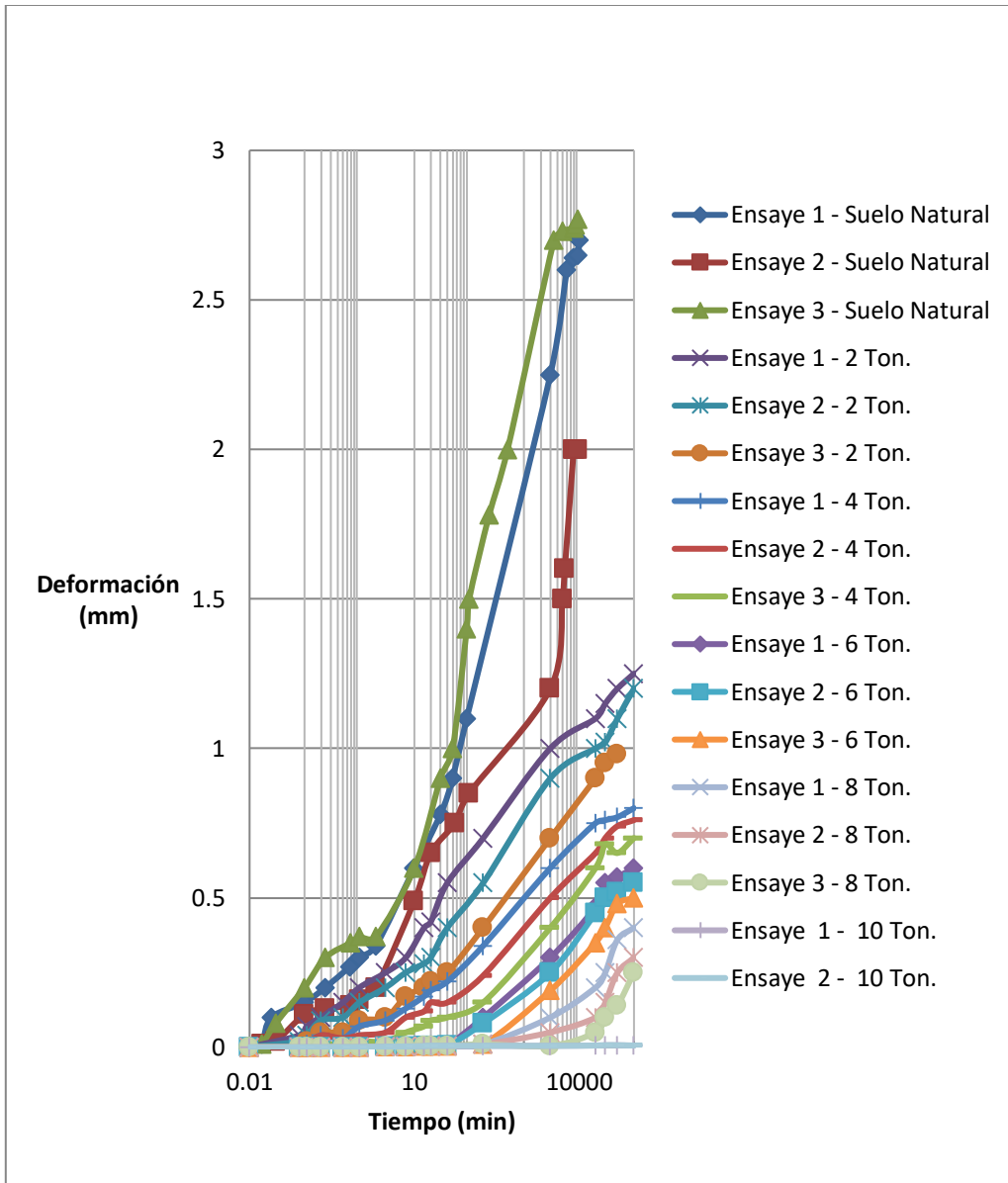


Figura 40. Ensayes de expansión del suelo natural con cargas de 2, 4, 6, 8 y 10 Ton, sin estabilizarlo.

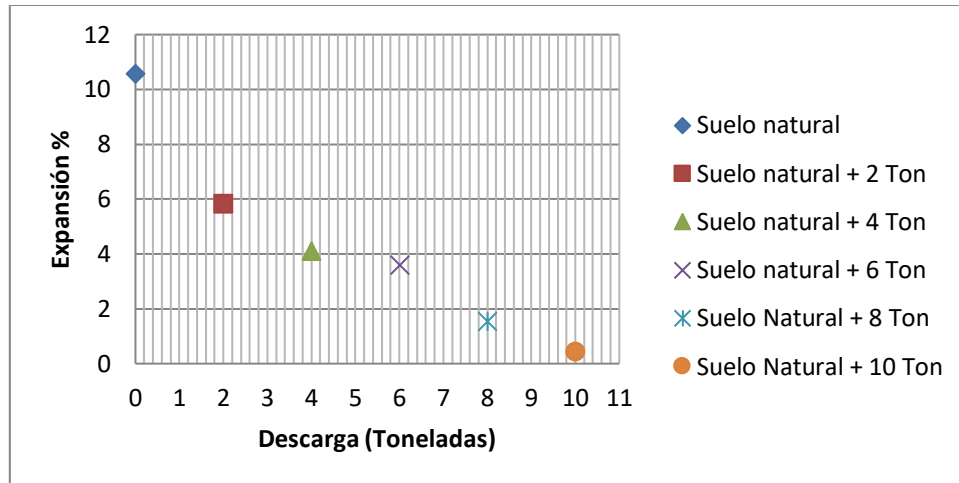


Figura 41. Expansión del suelo no tratado y no tratado con sobrecarga.

#### 4.3 Determinación de la compactación ideal del suelo natural y estabilizado con cal.

La curva de compactación Proctor del suelo natural se aprecia en la Figura 42, de la cual resultó que el peso volumétrico seco máximo ( $\gamma_d$ ) fue de 1295 kg/m<sup>3</sup> (1.295 gr/cm<sup>3</sup>) correspondiente a una humedad óptima ( $\omega_{opt}$ ) de 33.2%.

La Figura 43 muestra las curvas de compactación Proctor Estándar correspondientes al suelo natural y estabilizado con cal al 2, 4 y 6 %. Se observa que al aumentar la cal, la humedad incrementa y el peso específico disminuye. La compactación ideal del suelo natural y estabilizado con cal se requiere para realizar los ensayos de expansión al material.

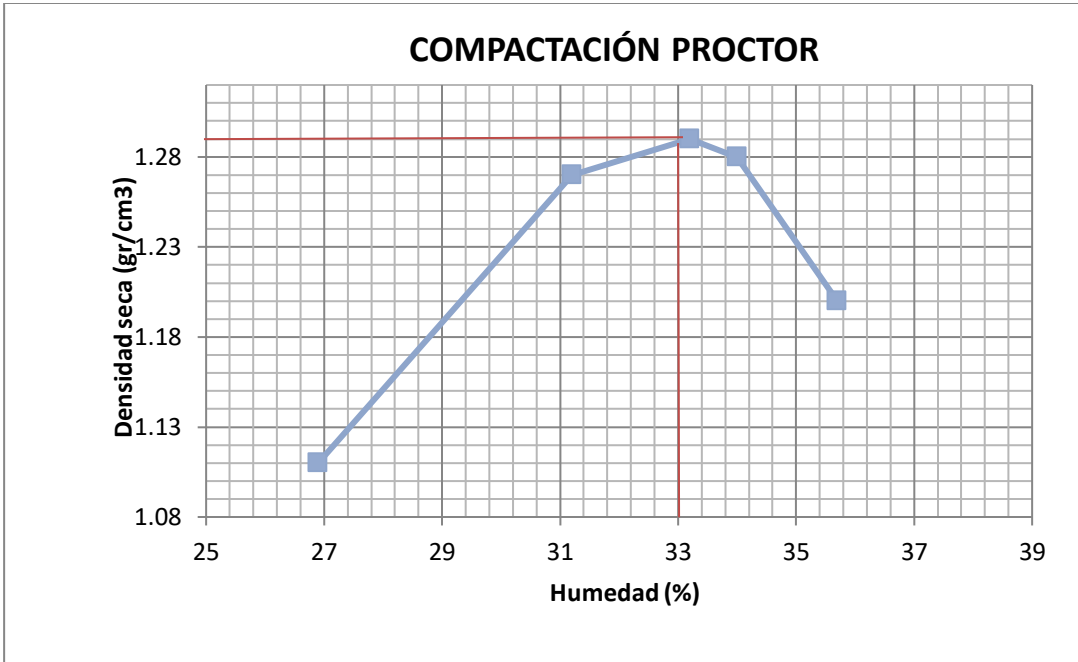


Figura 42. Compactación Proctor Estándar del suelo natural.

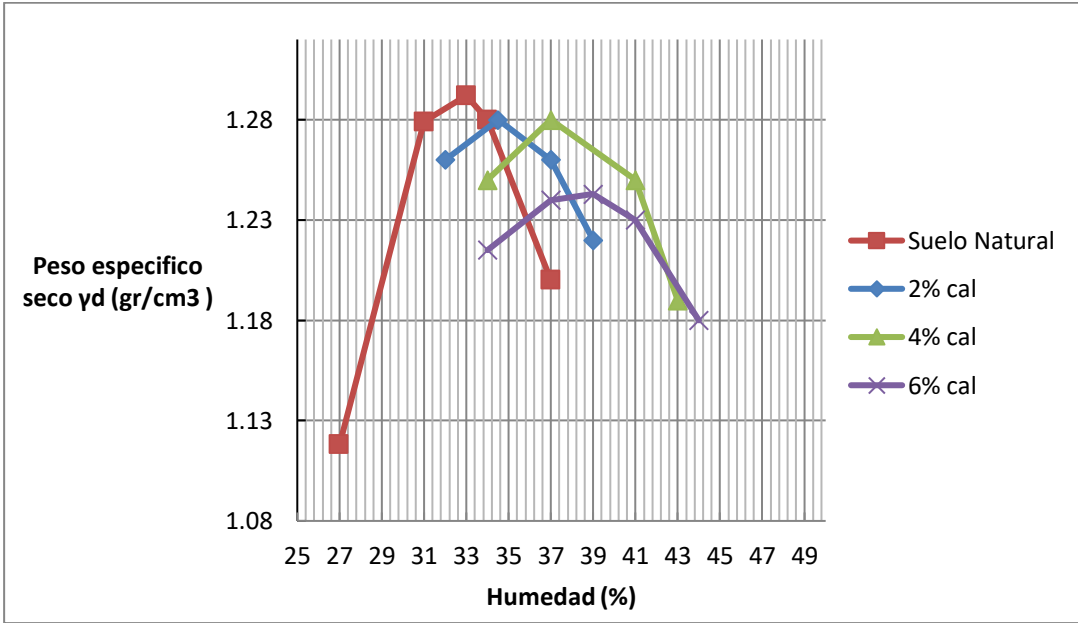


Figura 43. Compactación Proctor Estándar del suelo natural y con distintos contenidos de cal.

#### 4.4 Determinación de la cantidad de cal que abate la expansión del suelo, sin considerar sobrecargas.

Para definir la cantidad de cal necesaria para estabilizar el suelo expansivo se realizaron ensayos de Expansión con el odómetro al suelo natural y modificado con cal al 2%, 4% y 6%.

Aunque la prueba de Expansión especifica colocar una carga de 1 KPa (0.01 Kg/cm<sup>2</sup>), dicha carga se aplicó para realizar el ensaye pero no se considera como parte de la investigación debido a que es parte del procedimiento, además de ser muy pequeña.

La Figura 43 muestra los resultados de las pruebas de expansión realizadas al suelo natural y modificado con cal; de aquí se puede observar que los comportamientos de cada grupo de muestras son muy semejantes en todos los tiempos. La Tabla 5 contiene las expansiones promedio del suelo natural y tratado con cal al 2, 4 y 6%, respecto a su peso seco. Se observa entonces que para este suelo en particular, el 6% de cal, sin considerar descargas, fue suficiente para estabilizarlo (Figura 44). mientras que en la Figura 45 identificamos la expansión del suelo natural y tratado con cal

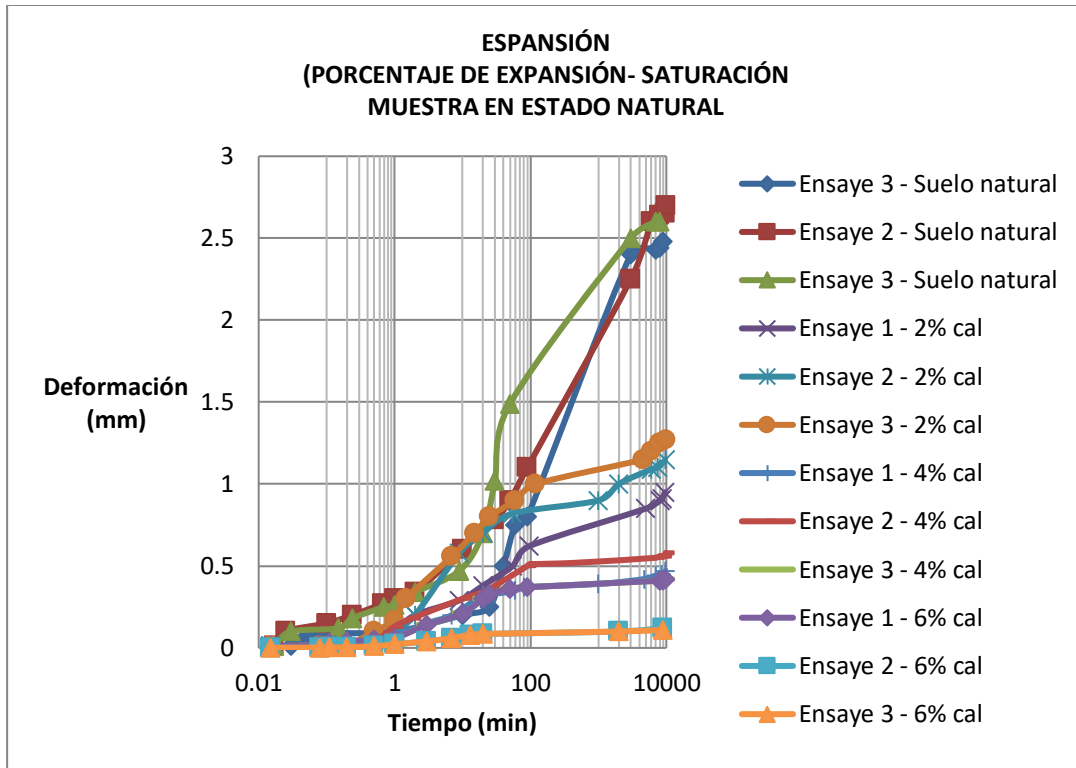


Figura 44. Ensayes de expansión en muestras inalteradas del suelo natural y estabilizado con 2,4 y 6 % de cal.

Tabla 5. Expansión del suelo natural y mezclado con cal.

|                        | Expansion promedio (%) |
|------------------------|------------------------|
| Suelo natural          | 10.58                  |
| Suelo natural + 2% cal | 5.47                   |
| Suelo natural + 4% cal | 2.74                   |
| Suelo natural + 6% cal | 0.058                  |

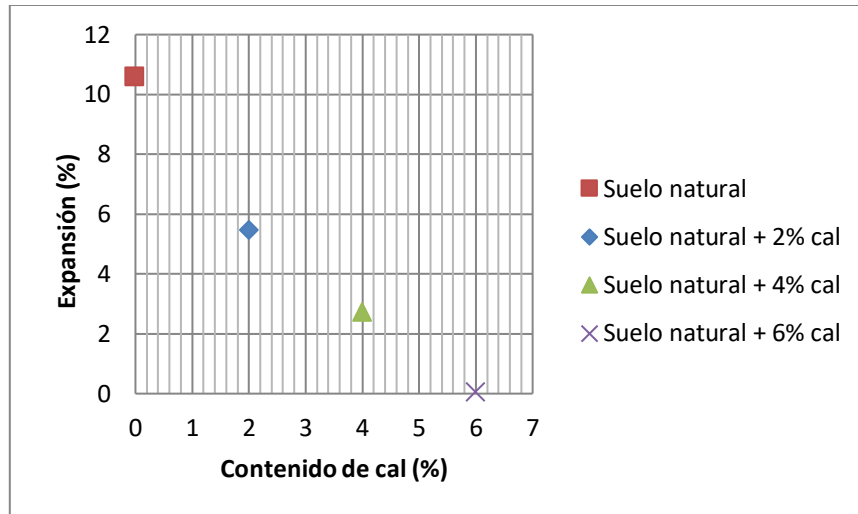


Figura 45. Expansión del suelo natural y tratado con cal.

#### 4.6 Determinación de la combinación de sobrecarga y cantidad de cal que abate la expansión del suelo.

Esta etapa se lleva a cabo realizando pruebas de expansión en el consolidómetro al suelo estabilizado con cal (2, 4 y 6%, respecto a su peso seco) aplicándole a cada dosificación simultáneamente diferentes cargas que partieron de 2 ton con incrementos de 2 hasta encontrar la máxima carga que junto con una dosificación de cal contrarrestaran la expansión; una vez realizado el estudio, se determinó que la carga de 6 ton fue suficiente en las diferentes combinaciones. Por lo anterior, esta etapa consistió de nueve combinaciones de carga y cantidad de cal aplicadas al suelo y que fueron de: 2, 4 y 6 toneladas con 2, 4 y 6% de cal (respecto a su peso seco). Primero se consideró un 2% de cal sobre el material y cargas de 2, 4 y 6 Ton. Los valores de la expansión resultante se tienen en la Tabla 6.

Tabla 6. Expansión resultante de un suelo natural con 2% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton.

| Suelo          | Expansion (%) |
|----------------|---------------|
| 2% cal + 2 Ton | 2.71          |
| 2% cal + 4 Ton | 0.48          |
| 2% cal + 6 ton | 0.35          |

La Figura 46 muestra las deformaciones que tiene el suelo con 2% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. De estos resultados se puede considerar que una carga de 4 Ton con un 2% de cal abaten la expansión. Luego, se realizaron ensayos de suelo natural con un 4% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. Los valores de la expansión resultante se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. Expansión resultante de un suelo natural con 4% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton.

| Suelo          | Expansion (%) |
|----------------|---------------|
| 4% cal + 2 Ton | 0.49          |
| 4% cal + 4 Ton | 0.11          |
| 4% cal + 6 ton | 0.10          |

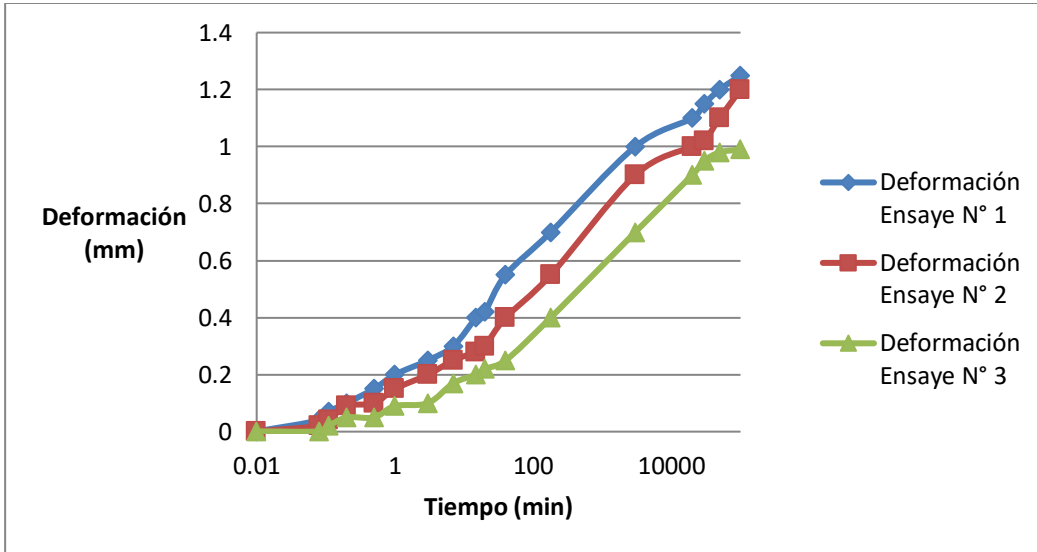


Figura 46. Ensayes de expansión del suelo natural con un 2% de cal y cargas de 2.4 y 6 Ton.

La Figura 47 muestra las deformaciones que tiene el suelo con 4% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. De estos resultados se puede considerar que una carga de 2 ton con un 4% de cal abate la expansión.

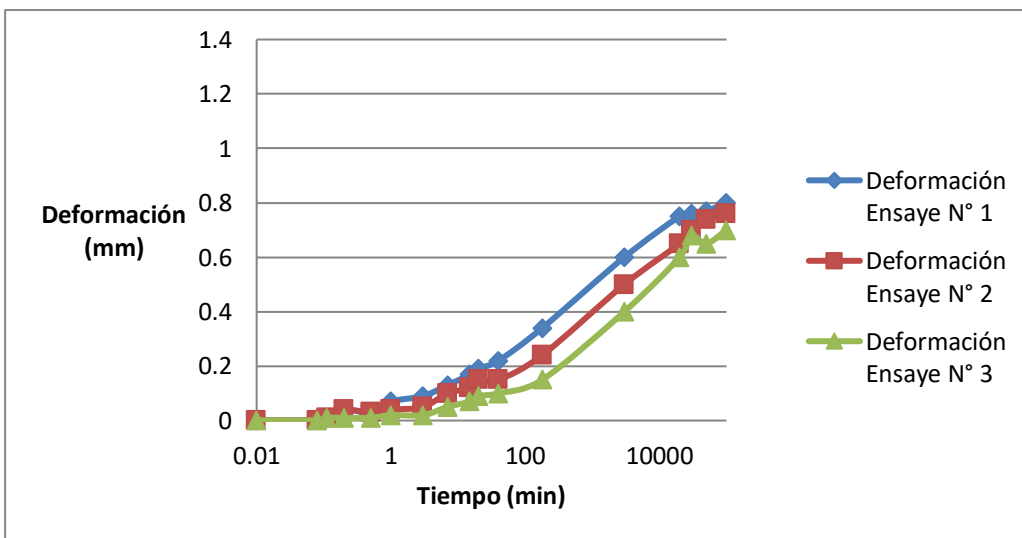


Figura 47 Ensayes de expansión del suelo natural con un 4% de cal y cargas de 2.4 y 6 Ton.



Finalmente, se realizaron ensayos de suelo natural con un 6% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton. Los valores de la expansión resultante se observan en la Tabla 8.

Tabla 8. Expansión resultante de un suelo natural con 6% de cal y cargas de 2, 4 y 6 Ton.

| Suelo          | Expansion (%) |
|----------------|---------------|
| 6% cal + 2 Ton | 0.46          |
| 6% cal + 4 Ton | 0.16          |
| 6% cal + 6 ton | 0.08          |

En la Tabla 9 y Figura 48 se muestran el concentrado de valores de expansión.

Tabla 9. Expansión de un suelo no tratado con limo y sobrecarga.

| Suelo sin tratar con | Expansión (%) |        |        |        |
|----------------------|---------------|--------|--------|--------|
|                      | 0 Ton.        | 2 Ton. | 4 Ton. | 6 Ton. |
| 0% cal               | 10.58         | 5.81   | 4.1    | 3.6    |
| 2% cal               | 5.47          | 2.71   | 0.48   | 0.35   |
| 4% cal               | 2.74          | 0.49   | 0.11   | 0.1    |
| 6% cal               | 0.058         | 0.46   | 0.16   | 0.08   |

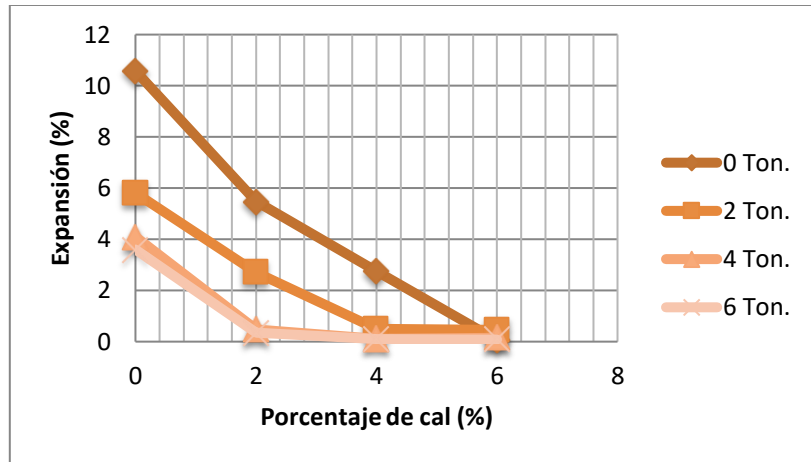


Figura 48. Expansión de un suelo no tratado con limo y sobrecarga.

#### 4.7 Discusión de Resultados.

Los resultados de los ensayos indican que las sobrecargas aplicadas a las muestras de suelo sin estabilizar alcanzaron a reducir considerablemente la expansión (0.57%) con el valor de 10 Ton.

El suelo ensayado un CH (arcilla de alta compresibilidad) fue estabilizado con 6% de cal (sin sobrecarga) lo cual se determinó por el valor más bajo del límite líquido y límite plástico), así como a los ensayos de expansión. Después de la aplicación de sobrecargas y del tratamiento de suelos expansivos, se advirtió que las sobrecargas de 4 y 6 Ton/m<sup>2</sup>, disminuyeron la expansión. Se puede concluir que la sobrecarga impactó efectivamente en disminuir la expansión del suelo debido a la disminución de la cantidad de cal (6%) sin sobrecarga.

Así, 4% fue suficiente para la sobrecarga de 2 Ton/m<sup>2</sup>. y 2% cal requerido para la mínima sobrecarga de 4 Ton. Lo anteriormente señalado es muy importante debido a que las sobrecargas de 2 y 4 Ton/m<sup>2</sup> son las presiones más comunes para estructuras ligeras y por consiguiente los métodos de mejoramiento empleados para suelos expansivos debe ser establecidos para niveles de expansiones bajos con el objetivo de reducir costos.

#### 4.8 Análisis de Costos.

A continuación presentamos análisis de costos a precios actuales al establecer una base estabilizada con cal en campo y con distintos porcentajes de cal. El análisis de costos fue realizado con base al desarrollo de precios unitarios de los distintos componentes del presupuesto en cuanto al costo directo e indirecto con la intención de establecer el siguiente concepto en campo: Fabricación de base de suelo arcilloso mejorado con cal en porcentajes de 2,4 y 6% de cal con respecto al peso seco del suelo. En la Tabla 10 identificamos a manera de resumen el costo total por m<sup>3</sup> para establecer la base estabilizada en campo.

Tabla 10. Costos por m<sup>3</sup> de suelo arcilloso estabilizado.

| Suelo estabilizado     | Costo de la Fabricación de base de suelo arcilloso mejorado con cal (el costo se expresa por m <sup>3</sup> de suelo arcilloso estabilizado) |
|------------------------|--|
| Suelo natural + 2% cal | \$ 419.39 M.N.   |
| Suelo natural + 4% cal | \$ 532.63 M.N.   |
| Suelo natural + 6% cal | \$ 645.87 M.N.   |

El análisis de precios unitarios desglosado para el establecimiento del concepto: Fabricación de base de suelo arcilloso mejorado con cal en porcentajes de 2,4 y 6% se observan en las Tablas 11, 12 y 13 respectivamente.

Tabla 11. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 2% con respecto al peso seco del suelo.

|                                       |  |           |           |           | Municipio: | QUERETARO,                  |               |          |               |
|---------------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|-----------------------------|---------------|----------|---------------|
|                                       |  |           |           |           | Localidad: | QUERETARO, QRO.,            |               |          |               |
| <b>INTEGRACIÓN DE PRECIO UNITARIO</b> |  |           |           |           |            |                             |               |          |               |
| CLAVE                                 | CONCEPTO   |           |           |           |            | Unidad:                     | m3            |          |               |
| BASE01                                | FABRICACIÓN DE BASE DE SUELO ARCILLOSO MEJORADA CON CAL EN PORCENTAJE DEL 2% CON RESPECTO AL PESO SECO DE SUELO QUE ES DE 1295 KG/M3 |           |           |           |            | Vol. Análisis:              | 1             |          |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Precio U.:                  | \$419.39      |          |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Duración:                   | 0.04 Jornales |          |               |
| Clave                                 | MATERIAL   |           |           |           | Unidad     | Cantidad                    | PU            | Importe  | Vol. Material |
| MAT01                                 | CAL  |           |           |           | TON        | 0.0259                      | 2400          | 62.16    | 0.0259        |
| Subtotal: MATERIALES                  |  |           |           |           |            |                             |               | 62.16    | 0             |
| Clave                                 | MANO DE OBRA   |           |           |           | Unidad     | Cantidad                    | PU            | Importe  | Vol. Jornales |
| MO01                                  | Cuadrilla 1 Ay + 0.10 cabo   |           |           |           | Jor        | 0.040                       | 650           | 25.70    | 0.03954       |
| Subtotal: MANO DE OBRA                |  |           |           |           |            |                             |               | 25.70    |               |
| Clave                                 | EQUIPO Y HERRAMIENTA   |           |           |           | Unidad     | Cantidad                    | PU            | Importe  | Vol. Horas    |
| MAQ01                                 | RETROEXCAVADORA  |           |           |           | Hr         | 0.3163                      | 350           | 110.72   | 0.31633333    |
|                                       | PLANCHITA COMPACTADORA   |           |           |           | Hr         | 0.3163                      | 100           | 31.63    |               |
| Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA        |  |           |           |           |            |                             |               | 142.35   |               |
| <b>PROCESO CONSTRUCTIVO</b>           |  |           |           |           |            |                             |               |          |               |
| ACTIVIDAD                             | SUBPROCESO   |           |           |           |            |                             |               |          |               |
| Excavación y amontonado               |  | 1.72      |           |           |            |                             |               |          |               |
| aplicación cal                        |  | 0.5       |           |           |            |                             |               |          |               |
| mezcla y humedecimiento               |  | 3         |           |           |            |                             |               |          |               |
| tendido                               |  | 8.6       |           |           |            |                             |               |          |               |
| compactación                          |  | 5.16      |           |           |            |                             |               |          |               |
| Total Costo directo (CD)              |  |           |           |           |            |                             |               | 230.21   |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Costo Indirecto (CI)        | 4.35%         | \$10.01  |               |
| Sub Total 1 (CD + CI)                 |  |           |           |           |            |                             |               | \$240.22 |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Costo x Financiamiento (CF) | 29.00%        | \$69.66  |               |
| Sub Total 2 (CF + Subtotal 1)         |  |           |           |           |            |                             |               | \$309.89 |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Costo x Utilidad (CU)       | 16.67%        | \$51.66  |               |
| Sub Total 3 (CU + Subtotal 2)         |  |           |           |           |            |                             |               | \$361.55 |               |
|                                       |  |           |           |           |            | Costo Adicionales (CA)      |               | \$0.00   |               |
| Sub Total 4 (CA + Subtotal 3)         |  |           |           |           |            |                             |               | \$361.55 |               |
|                                       |  |           |           |           |            | IVA                         | 16.00%        | \$57.85  |               |
| Total PV (IVA + Subtotal 4)           |  |           |           |           |            |                             |               | \$419.39 |               |
| <b>Rendimientos =</b>                 |  |           |           |           |            |                             |               |          |               |
| Unidad de análisis                    | m3   | t en min. | t en Hrs. | t en Jor. |            |                             |               |          |               |
| Vol. Análisis                         | 1  | 18.98     | 0.316     | 0.040     |            |                             |               |          |               |
| Rend. en 1 Hr.                        | 3.16   | 60        | 1         | 0.125     |            |                             |               |          |               |
| Rend. en 1 Jor                        | 25.29  |           | 8         | 1         |            |                             |               |          |               |
| Vol. de obra                          | 25   |           | 7.908     | 0.989     |            |                             |               |          |               |

Tabla 12. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 4% con respecto al peso seco del suelo.

|                                |  |            |           |           | Municipio: | QUERETARO,                           |          |                 |               |
|--------------------------------|--|------------|-----------|-----------|------------|--------------------------------------|----------|-----------------|---------------|
|                                |  |            |           |           | Localidad: | QUERETARO, GRO.,                     |          |                 |               |
| INTEGRACIÓN DE PRECIO UNITARIO |  |            |           |           |            |                                      |          |                 |               |
| CLAVE                          | CONCEPTO   |            |           |           |            | Unidad:                              | m3       |                 |               |
| BASE01                         | FABRICACIÓN DE BASE DE SUELO ARCILLOSO MEJORADA CON CAL EN PORCENTAJE DEL 4% CON RESPECTO AL PESO SECO DE SUELO QUE ES DE 1295 KG/M3 |            |           |           |            | Vol. Análisis:                       | 1        |                 |               |
|                                |  |            |           |           |            | Precio U.:                           | \$532.64 |                 |               |
|                                |  |            |           |           |            | Duración:                            | 0.04     | Jornales        |               |
| Clave                          | MATERIAL   |            |           |           | Unidad     | Cantidad                             | PU       | Importe         | Vol. Material |
| MAT01                          | CAL  |            |           |           | TON        | 0.0518                               | 2400     | 124.32          | 0.05          |
| Subtotal: MATERIALES           |  |            |           |           |            |                                      |          | 124.32          | 0             |
| Clave                          | MANO DE OBRA   |            |           |           | Unidad     | Cantidad                             | PU       | Importe         | Vol. Jornales |
| MO01                           | Cuadrilla 1 Ay + 0.10 cabo   |            |           |           | Jor        | 0.040                                | 650      | 25.70           | 0.04          |
| Subtotal: MANO DE OBRA         |  |            |           |           |            |                                      |          | 25.70           |               |
| Clave                          | EQUIPO Y HERRAMIENTA   |            |           |           | Unidad     | Cantidad                             | PU       | Importe         | Vol. Horas    |
| MAQ01                          | RETROEXCAVADORA  |            |           |           | Hr         | 0.3163                               | 350      | 110.72          | 0.32          |
| MAQ02                          | PLANCHITA COMPACTADORA   |            |           |           | Hr         | 0.3163                               | 100      | 31.63           |               |
| Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA |  |            |           |           |            |                                      |          | 142.35          |               |
| PROCESO CONSTRUCTIVO           |  | SUBPROCESO |           |           |            |                                      |          |                 |               |
| Excavación y amontonado        |  | 1.72       |           |           |            | <b>Total Costo directo (CD)</b>      |          | <b>292.37</b>   |               |
| aplicación cal                 |  | 0.5        |           |           |            | <b>Costo Indirecto (CI)</b>          |          | 4.35%           |               |
| mezcla y humedecimiento        |  | 3          |           |           |            | <b>Sub Total 1 (CD + CI)</b>         |          | <b>\$305.09</b> |               |
| tendido                        |  | 8.6        |           |           |            | <b>Costo x Financiamiento (CF)</b>   |          | 29.000%         |               |
| compactación                   |  | 5.16       |           |           |            | <b>Sub Total 2 (CF + Subtotal 1)</b> |          | <b>\$393.56</b> |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>Costo x Utilidad (CU)</b>         |          | 16.67%          |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>Sub Total 3 (CU + Subtotal 2)</b> |          | <b>\$459.17</b> |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>Costo Adicionales (CA)</b>        |          | \$0.00          |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>Sub Total 4 (CA + Subtotal 3)</b> |          | <b>\$459.17</b> |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>IVA</b>                           |          | 16.00%          |               |
|                                |  |            |           |           |            | <b>Total PV (IVA + Subtotal 4)</b>   |          | <b>\$532.64</b> |               |
| <b>Rendimientos =</b>          |  |            |           |           |            |                                      |          |                 |               |
| Unidad de análisis             | m3   | t en min.  | t en Hrs. | t en Jor. |            |                                      |          |                 |               |
| Vol. Análisis                  | 1  | 18.98      | 0.316     | 0.040     |            |                                      |          |                 |               |
| Rend. en 1 Hr.                 | 3.16   | 60         | 1         | 0.125     |            |                                      |          |                 |               |
| Rend. en 1 Jor                 | 25.29  |            | 8         | 1         |            |                                      |          |                 |               |
| Vol. de obra                   | 25   |            | 7.908     | 0.989     |            |                                      |          |                 |               |

Tabla 13. Fabricación de base de suelo arcilloso mejorada con cal del 6% con respecto al peso seco del suelo.

|                                       |  |           |           |           | Municipio:                           | QUERETARO,      |                 |
|---------------------------------------|--|-----------|-----------|-----------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                       |  |           |           |           | Localidad:                           | QUERETARO,QRO., |                 |
| <b>INTEGRACIÓN DE PRECIO UNITARIO</b> |  |           |           |           |                                      |                 |                 |
| CLAVE                                 | CONCEPTO   |           |           |           |                                      | Unidad:         | m3              |
| BASE01                                | FABRICACIÓN DE BASE DE SUELO ARCILLOSO MEJORADA CON CAL EN PORCENTAJE DEL 6% CON RESPECTO AL PESO SECO DE SUELO QUE ES DE 1295 KG/M3 |           |           |           |                                      | Vol. Análisis:  | 1               |
|                                       |  |           |           |           |                                      | Precio U.:      | \$645.88        |
|                                       |  |           |           |           |                                      | Duración:       | 0.04            |
| Clave                                 | MATERIAL   | Unidad    | Cantidad  | PU        | Importe                              | Vol. Material   |                 |
| MAT01                                 | CAL  | TON       | 0.0777    | 2400      | 186.48                               | 0.078           |                 |
| <b>Subtotal: MATERIALES</b>           |  |           |           |           | <b>186.48</b>                        |                 |                 |
| Clave                                 | MANO DE OBRA   | Unidad    | Cantidad  | PU        | Importe                              | Vol. Jornales   |                 |
| MO01                                  | Cuadrilla 1 Ay + 0.10 cabo   | Jor       | 0.040     | 650       | 25.70                                | 0.04            |                 |
| <b>Subtotal: MANO DE OBRA</b>         |  |           |           |           | <b>25.70</b>                         |                 |                 |
| Clave                                 | EQUIPO Y HERRAMIENTA   | Unidad    | Cantidad  | PU        | Importe                              | Vol. Horas      |                 |
| MAQ01                                 | RETROEXCAVADORA  | Hr        | 0.3163    | 350       | 110.72                               | 0.32            |                 |
| MAQ02                                 | PLANCHITA COMPACTADORA   | Hr        | 0.3163    | 100       | 31.63                                |                 |                 |
| <b>Subtotal: EQUIPO Y HERRAMIENTA</b> |  |           |           |           | <b>142.35</b>                        |                 |                 |
| <b>PROCESO CONSTRUCTIVO</b>           |  |           |           |           |                                      |                 |                 |
| ACTIVIDAD                             | SUBPROCESO   | TIEMPO    |           |           |                                      |                 |                 |
| Excavación y amontonado               |  | 1.72      |           |           | <b>Total Costo directo (CD)</b>      |                 | <b>354.53</b>   |
| aplicación cal                        |  | 0.5       |           |           | <b>Costo Indirecto (CI)</b>          |                 | 4.35%           |
| mezcla y humedecimiento               |  | 3         |           |           | <b>Sub Total 1 (CD + CI)</b>         |                 | \$369.95        |
| tendido                               |  | 8.6       |           |           | <b>Costo x Financiamiento (CF)</b>   |                 | 29.000%         |
| compactación                          |  | 5.16      |           |           | <b>Sub Total 2 (CF + Subtotal 1)</b> |                 | \$477.24        |
|                                       |  |           |           |           | <b>Costo x Utilidad (CU)</b>         |                 | 16.67%          |
|                                       |  |           |           |           | <b>Sub Total 3 (CU + Subtotal 2)</b> |                 | \$556.79        |
|                                       |  |           |           |           | <b>Costo Adicionales (CA)</b>        |                 | \$0.00          |
|                                       |  |           |           |           | <b>Sub Total 4 (CA + Subtotal 3)</b> |                 | \$556.79        |
|                                       |  |           |           |           | <b>IVA</b>                           |                 | 16.00%          |
|                                       |  |           |           |           | <b>Total PV (IVA + Subtotal 4)</b>   |                 | <b>\$645.88</b> |
| <b>Rendimientos =</b>                 |  |           |           |           |                                      |                 |                 |
| Unidad de análisis                    | m3   | t en min. | t en Hrs. | t en Jor. |                                      |                 |                 |
| Vol. Análisis                         | 1  | 18.98     | 0.316     | 0.040     |                                      |                 |                 |
| Rend. en 1 Hr.                        | 3.16   | 60        | 1         | 0.125     |                                      |                 |                 |
| Rend. en 1 Jor                        | 25.29  |           | 8         | 1         |                                      |                 |                 |
| Vol. de obra                          | 25   |           | 7.908     | 0.989     |                                      |                 |                 |

Con base al análisis de costos desglosado para el concepto de Fabricación de base de suelo arcilloso mejorado con cal en porcentajes de 2,4 y 6% podemos realizar un comparativo entre diversos métodos de mejoramiento de terreno:

En la Tabla 14 observamos el análisis de costo de mejoramiento de terreno por sustitución y compactación mecánica de tepetate llevado a cabo por **(Hernández, 2009)**.

Tabla 14. Mejoramiento de terreno por sustitución y compactación mecánica de tepetate (Fuente: Hernández, 2009).

| Fecha de cotización: Agosto de 2008   |                |          |                                |                    |
|---|----------------|----------|--------------------------------|--------------------|
| Concepto  | Unidad         | Cantidad | P.U.                           | Importe            |
| <b>Costo para casa Habitación de 80 m<sup>2</sup></b>                         |                |          |                                |                    |
| Excavación por medios mecánicos para una capa de 0.20 m                       | m <sup>3</sup> | 16       | \$32.00                        | \$512.00           |
| Carga de material producto de la excavación.                                  | m <sup>3</sup> | 20.8     | \$35.00                        | \$728.00           |
| Acarreo de material producto de la Excavación*                                | m <sup>3</sup> | 20.8     | \$36.00                        | \$748.80           |
| Acarreo de materiales para relleno incluye costo del tepetate*                | m <sup>3</sup> | 20.8     | \$71.00                        | \$1,476.80         |
| Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua. (Tepetate) | m <sup>2</sup> | 80       | \$110.00                       | \$8,800.00         |
| Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)   | Jor.           | 1.5      | 755.50                         | \$1,133.26         |
| <i>Subtotal</i>   |                |          |                                | \$13,398.86        |
| <i>Costos Indirectos</i>  |                |          |                                | \$1,339.89         |
| <i>Utilidad</i>   |                |          |                                | \$937.92           |
|   |                |          | <b>TOTAL =</b>                 | <b>\$15,676.66</b> |
|   |                |          | Para una profundidad de 0.60 m | <b>\$47,029.99</b> |



En la Tabla 15 identificamos diversas modalidades de mejoramiento de terreno para capas de 0.20 m **(Hernández, 2009)**.

Tabla 15. Costos de diferentes técnicas de mejoramiento de terreno (Fuente: Hernández, 2009).

| Fecha de cotización: Agosto de 2008 |                                |             |             |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| DESCRIPCIÓN                         | COSOT (0.60 m. de profundidad) |             |             |
|                                     | 2%                             | 4%          | 6%          |
| ARCILLA-CEM                         | \$16,732.09                    | \$19,585.47 | \$22,438.85 |
| ARCILLA-CAL                         | \$15,977.75                    | \$18,076.79 | \$20,175.82 |
| TEPETATE-CEM                        | \$49,663.19                    | \$52,223.42 | \$54,783.64 |
| TEPETATE-CAL                        | \$48,986.35                    | \$50,869.74 | \$52,753.12 |

Al realizar un comparativo entre los costos a precios actuales de diversas técnicas de mejoramiento de suelo identificamos que existe un ahorro económico si empleamos la alternativa de estabilización con cal en un suelo expansivo en comparación con el método de sustitución, por ejemplo, esta última alternativa prácticamente resulta menos rentable al ser más costosa elevándose prácticamente a un costo doble con relación a la estabilización con cal.

Si remarcamos el hecho de que la dosificación de cal a emplear para estabilizar el suelo acompañado de la descarga de la estructura optimizará el costo debido a que emplearemos menos cantidad de cal para estabilizar el medio.



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5. CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente investigación dejó las siguientes conclusiones:

Para este suelo expansivo en particular (arcilla de alta compresibilidad), el contenido de cal, sin considerar carga, que abate la expansión del suelo es del 6%, respecto a su peso seco. Asimismo, la sobrecarga que abate la expansión del suelo de forma considerable es la de 10 tones que disminuye la expansión a valores menores de 1%.

De la combinación de ambas soluciones (carga y estabilización con cal) se comprueba que la carga efectivamente contribuye en el abatimiento de la expansión del suelo al disminuir la dosificación de cal determinada (6%), quedando arreglos de 2 toneladas con 4% de cal respecto a peso seco y 4 toneladas con 2% de cal respecto al peso seco.

Por consiguiente, lo anterior se traduce en un ahorro económico porque disminuye la cal que se utiliza debido al aprovechamiento de la descarga en cuestión; además se ofrecen alternativas del uso de ambas soluciones.

Adicionalmente se encontró que al ir aumentando el contenido de cal para estabilizar el suelo se modifican también las condiciones de humedad óptima y peso específico máximo del suelo natural, así tenemos que a mayor contenido de cal (en el rango de las dosificaciones estudiadas de 2, 4 y 6%), disminuye el peso específico y aumenta la humedad.

Se recomienda realizar en futuras investigaciones ensayos a muestras ubicadas a distintas profundidades con el objetivo de identificar la relación existencia entre la sobrecarga estructural y la presión del material expansivo que se deriva por la ubicación de la muestra en el perfil del suelo.

## REFERENCIAS

ASTM (2003) 04318-00.- "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity index of Soils".

ASTM (2003) 04546-03. - "Standard Test Methods for one - Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils",

ASTM (2003) D 698 Test Methods for Laboratory Compaction of Soil Using Standard Effort.

Afrin, H. (2017). A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19.

Al-Mukhtar, M., Khattab, S., & Alcover, J. F. (2012). Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil. *Engineering Geology*, 139, 17-27.

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2014). Lime consumption of different clayey soils. *Applied Clay Science*, 95, 133-145.

Beltran, Leyva Raúl (2009), Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva, Universidad Autónoma de México, México. .

Barrera Bucio, M., & Garnica Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. *Publicación técnica*, (198).

Bauza, Castelló Juan Diego (2015). El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). General introduction: clays, clay minerals, and clay science. *Developments in clay science*, 1, 1-18.

Cabrera, Hernández Elizabeth (2006). Relación del cambio volumétrico de arcillas expansivas con su grado de saturación. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

De Justo, Durand, Justo, (2002). "Construction of substructures in expansive and collapsing soils ". *Revista Obras Publicas Sevilla*. España.

Di Maio, C. Hueckel T., Loret B. (2002). *Chemo-Mechanical Coupling in Clays*. Swets & Zeitlinger, Netherlands.

Hernandez, Villares Hendrick (2009). "Estudio del método de sustitución aplicado en arcillas expansivas en Queretaro". Universidad Autónoma de Queretaro, Queretaro, Mexico.

Fityus, S., & Buzzi, O. (2009). The place of expansive clays in the framework of unsaturated soil mechanics. *Applied Clay Science*, 43(2), 150-155.

Fredlund & Rahardjo, (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils." John Wiley & Sons, Inc., New York.

Fredlund, D. G. (1996). "The scope of unsaturated soil mechanics: An overview." Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, E. E. Alonso and P. Delage, eds., Vol. 3, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1155–1177.

Gadi, V. K., & Mishra, P. N. (2015, March). A CRITICAL REVIEW ON ALTERNATE METHODS FOR DETERMINATION OF THE ATTERBERG LIMITS. In Proceedings of the 5th Indian Young Geotechnical Engineers Conference (5IYGEC): Extended Abstracts. Shweta Publications.

Hasan, U., Chegenizadeh, A., Budihardjo, M. A., & Nikraz, H. (2015). A review of the stabilisation techniques on expansive soils. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 9(7), 541-548.

Hudyma, N., & Avar, B. B. (2006). Changes in swell behavior of expansive clay soils from dilution with sand. *Environmental & Engineering Geoscience*, 12(2), 137-145.

Kaufhold, S., Baille, W., Schanz, T., & Dohrmann, R. (2015). About differences of swelling pressure—dry density relations of compacted bentonites. *Applied Clay Science*, 107, 52-61.

Lei, X., Wong, H., Fabbri, A., Limam, A., & Cheng, Y. M. (2016). A chemo-elastic–plastic model for unsaturated expansive clays. *International Journal of Solids and Structures*, 88, 354-378.

López-Lara T., Hernández-Zaragoza J.B., Pérez-Rea M.L., López-Cajún and Castaño M.V. 1996, Reaction Kinetics of an expansive soil stabilized with Calcium Oxide. *Research Journal of Chemistry and Environment*. Vol 10 (1).

Lopez-Lara, T., Hernandez, J.B. and Lopez – Cajun, C. (2005). Useful Lifetime and Suitable Thickness of Soil-Lime Mixture, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Volume 10, 2005 — Bundle F.

Lopez-Lara et al. (2005). Study of Curing Time of Stabilized Soils. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Volume 10, 2005 — Bundle F.

López-Lara, Teresa (2002). "Estudio fisicoquímico de la modificación de suelos expansivos". Doctorado en ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. México.

López-Lara, T., Zaragoza, J. H., Gutierrez, G. S., & Castaño, V. (2005). Study of Curing Time Of Stabilized Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 10.

Mokhtari, M., & Dehghani, M. (2012). Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, 2673-2682.

Nelson, J. D., Overton, D. D., & Durkee, D. B. (2001). Depth of wetting and the active zone. In *Expansive clay soils and vegetative influence on shallow foundations* (pp. 95-109).

NSR, N. S. R. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Petry, T. M., & Armstrong, J. C. (1989). Stabilization of expansive clay soils. *Transportation Research Record*, (1219).

Priya, C. S., Archana, S., Albert, A. B., & Deeraj, A. D. (2017). STABILIZATION OF CLAYEY SOIL USING POLYPROPYLENE FIBER.

Purus, H. R. (2000). *Techniques stabilization soils*. United States. Laxmi Publications.

O'Kelly, B. C. (2015). Atterberg limits are not appropriate for peat soils. *Geotechnical Research*, 2(3), 123-134.

Petry, T. M., & Little, D. N. (2002). Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(6), 447-460.

Priya, C. S., Archana, S., Albert, A. B., & Deeraj, A. D. (2017). STABILIZATION OF CLAYEY SOIL USING POLYPROPYLENE FIBER.

Ta'negonbadi, B., & Noorzad, R. (2017). Stabilization of clayey soil using lignosulfonate. *Transportation Geotechnics*, 12, 45-55.

Nematzadeh, M., Zarfam, P., & Nikoo, M. (2017). Investigating laboratory parameters of the resistance of different mixtures of soil–lime–fume using the curing and administrative method. *Case studies in construction materials*, 7, 263-279.



Sabat, A. K., & Nanda, R. P. (2011). Effect of marble dust on strength and durability of Rice husk ash stabilised expansive soil. *International journal of civil and structural engineering*, 1(4), 939-948.

Sabtan, A. A. (2005). Geotechnical properties of expansive clay shale in Tabuk, Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(5), 747-757.

Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., & García, B. (2011). Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 51(3), 348-352.

Schmitz, R. M., Schroeder, C., & Charlier, R. (2004). Chemo–mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits. *Applied clay science*, 26(1-4), 351-358.

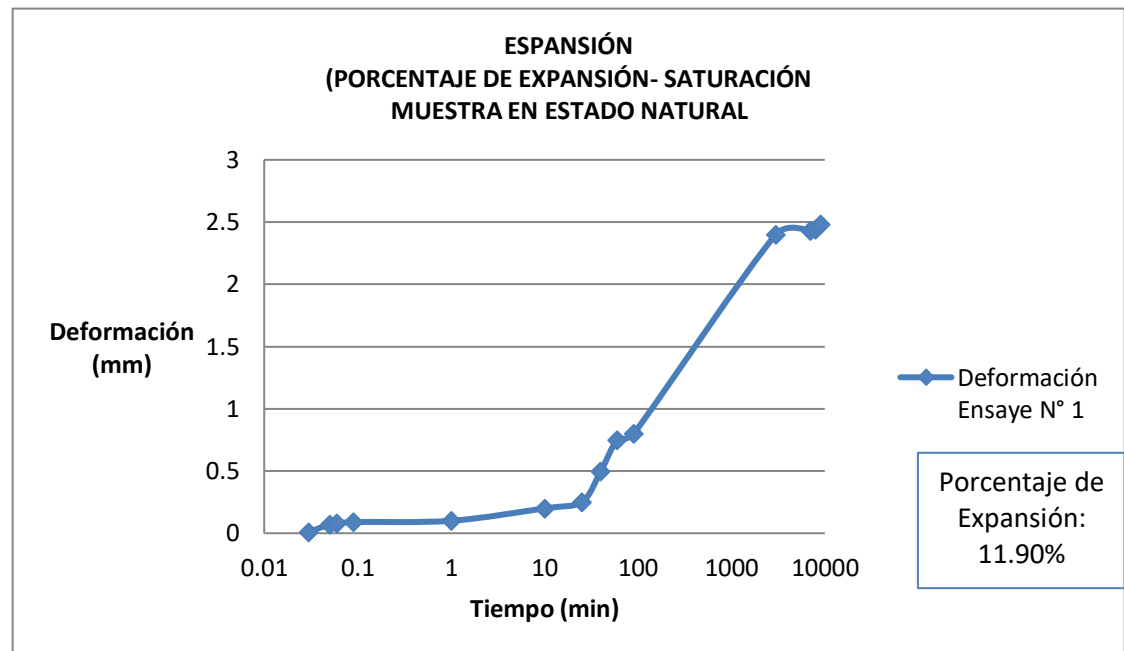
Torres, Garcia Jose de Jesus (2005). "Estudio de fátiga de expansion en suelos arcillosos" . Universidad Autónoma de Queretaro. Querétaro, México.

Waseem, E. U., Moez, A., Abdullah, A., Rana, A., Akram, A., & Khalil, H. (2016). Problematic Soil and Ground Improvement Techniques. *ORGANIZATION*.

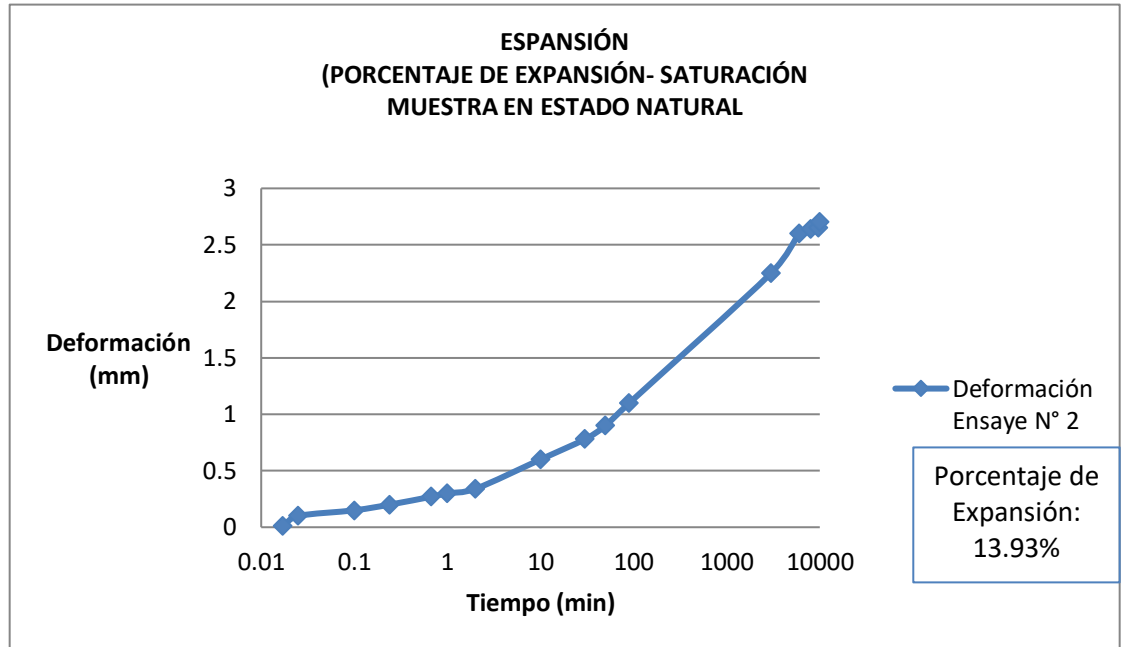
Zepeda G., J. A. y Castañeda, A. H. (1989). "Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana". ". Curso internacional de mecánica de suelos arcillosos. J. Alfredo Zepeda Garrido. México.

## ANEXOS

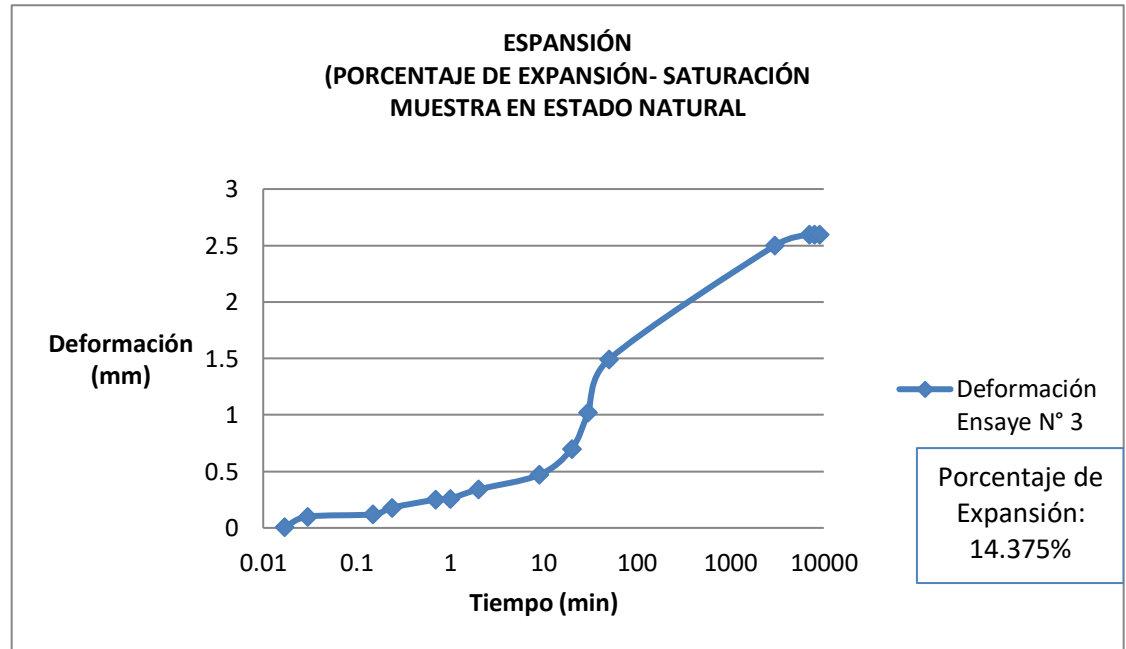
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 1 |
|--------------|-------------------------|
| 0.03         | 0.01                    |
| 0.05         | 0.07                    |
| 0.06         | 0.08                    |
| 0.09         | 0.09                    |
| 1            | 0.1                     |
| 10           | 0.2                     |
| 25           | 0.25                    |
| 40           | 0.5                     |
| 60           | 0.75                    |
| 90           | 0.8                     |
| 3000         | 2.4                     |
| 7000         | 2.43                    |
| 8000         | 2.44                    |
| 9000         | 2.48                    |



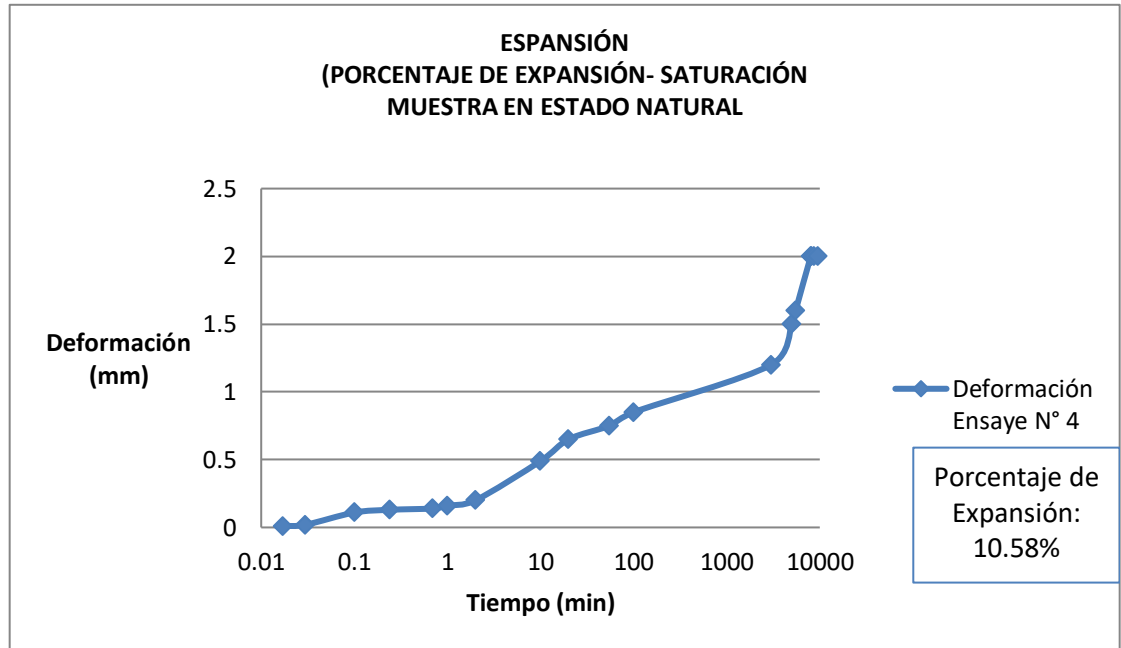
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 2 |
|--------------|-------------------------|
| 0.017        | 0.01                    |
| 0.025        | 0.1                     |
| 0.1          | 0.15                    |
| 0.24         | 0.2                     |
| 0.67         | 0.27                    |
| 1            | 0.3                     |
| 2            | 0.34                    |
| 10           | 0.6                     |
| 30           | 0.78                    |
| 50           | 0.9                     |
| 90           | 1.1                     |
| 3000         | 2.25                    |
| 6000         | 2.6                     |
| 8000         | 2.64                    |
| 9670         | 2.65                    |
| 9980         | 2.7                     |



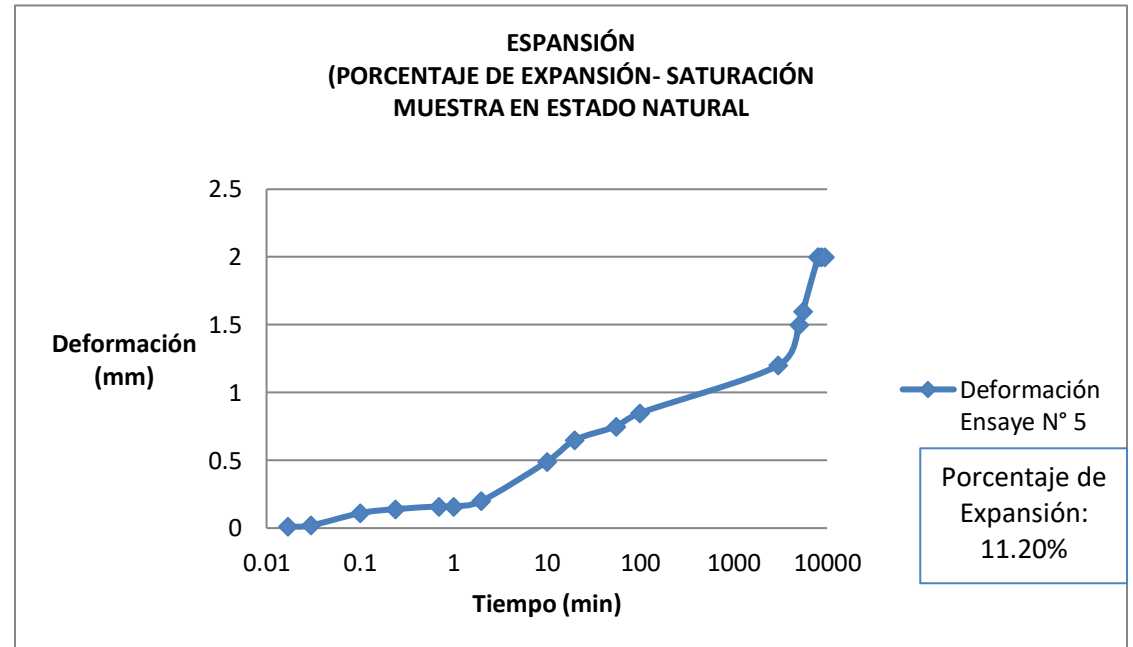
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 3 |
|--------------|-------------------------|
| 0.017        | 0.01                    |
| 0.03         | 0.1                     |
| 0.15         | 0.12                    |
| 0.24         | 0.18                    |
| 0.7          | 0.25                    |
| 1            | 0.26                    |
| 2            | 0.34                    |
| 9            | 0.47                    |
| 20           | 0.7                     |
| 30           | 1.02                    |
| 50           | 1.49                    |
| 3000         | 2.5                     |
| 7000         | 2.6                     |
| 8000         | 2.6                     |
| 9000         | 2.6                     |



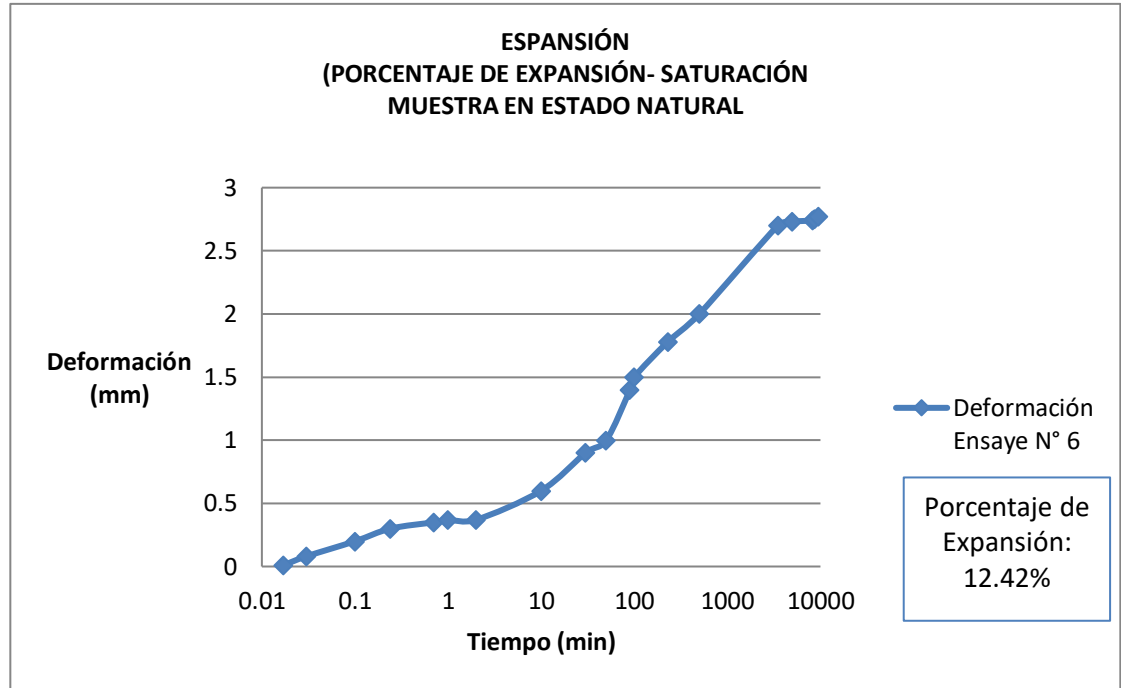
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 4 |
|--------------|-------------------------|
| 0.017        | 0.01                    |
| 0.03         | 0.02                    |
| 0.1          | 0.11                    |
| 0.24         | 0.13                    |
| 0.7          | 0.14                    |
| 1            | 0.16                    |
| 2            | 0.2                     |
| 10           | 0.49                    |
| 20           | 0.65                    |
| 55           | 0.75                    |
| 100          | 0.85                    |
| 3000         | 1.2                     |
| 5000         | 1.5                     |
| 5500         | 1.6                     |
| 8000         | 2                       |
| 8200         | 2                       |
| 8700         | 2                       |
| 9500         | 2                       |



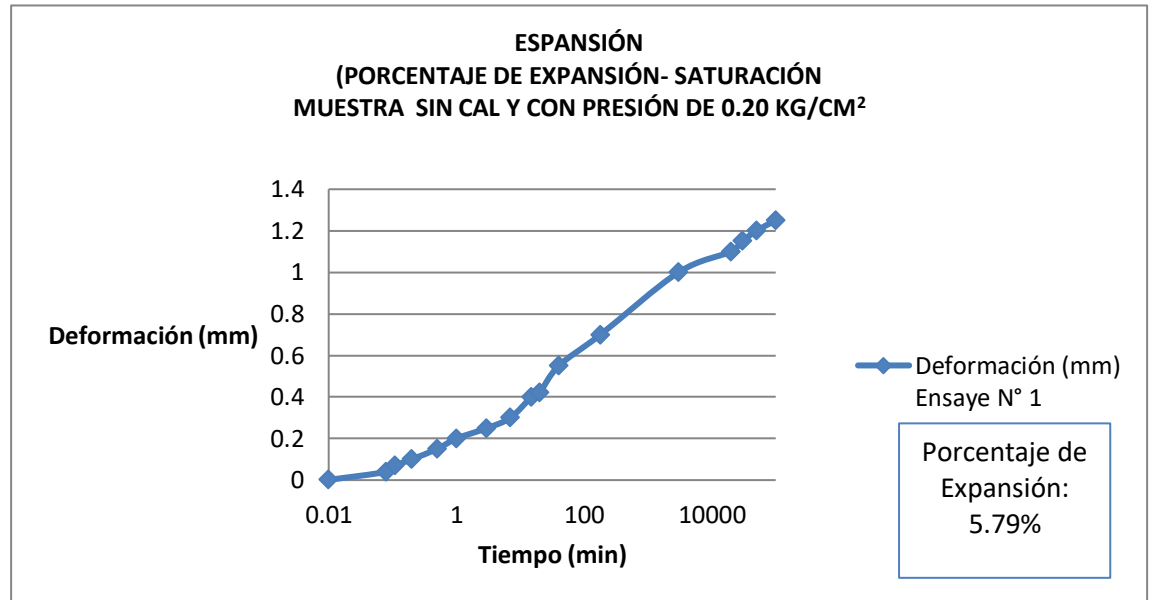
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 5 |
|--------------|-------------------------|
| 0.017        | 0.01                    |
| 0.03         | 0.02                    |
| 0.1          | 0.11                    |
| 0.24         | 0.14                    |
| 0.7          | 0.16                    |
| 1            | 0.16                    |
| 2            | 0.2                     |
| 10           | 0.49                    |
| 20           | 0.65                    |
| 55           | 0.75                    |
| 100          | 0.85                    |
| 3000         | 1.2                     |
| 5000         | 1.5                     |
| 5500         | 1.6                     |
| 8000         | 2                       |
| 8200         | 2                       |
| 8700         | 2                       |
| 9500         | 2                       |



| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 6 |
|--------------|-------------------------|
| 0.017        | 0.01                    |
| 0.03         | 0.08                    |
| 0.1          | 0.2                     |
| 0.24         | 0.3                     |
| 0.7          | 0.35                    |
| 1            | 0.37                    |
| 2            | 0.37                    |
| 10           | 0.6                     |
| 30           | 0.9                     |
| 50           | 1                       |
| 90           | 1.4                     |
| 100          | 1.5                     |
| 230          | 1.78                    |
| 500          | 2                       |
| 3500         | 2.7                     |
| 5000         | 2.73                    |
| 8200         | 2.74                    |
| 8700         | 2.75                    |
| 9500         | 2.77                    |

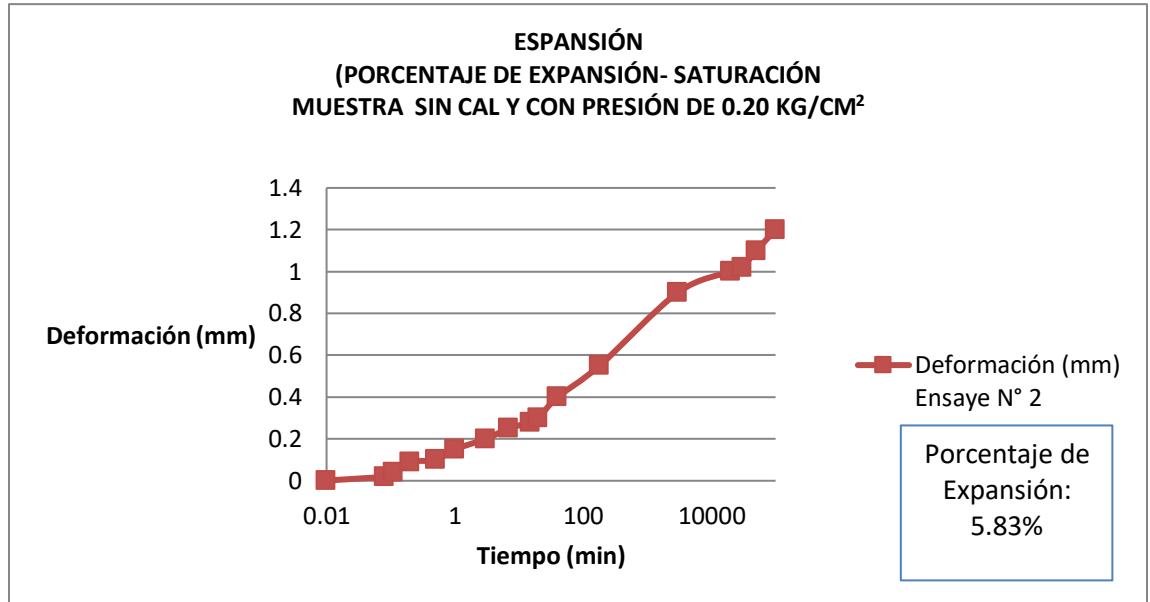


| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.01         | 0.001                           |
| 0.08         | 0.04                            |
| 0.11         | 0.07                            |
| 0.2          | 0.1                             |
| 0.5          | 0.15                            |
| 1            | 0.2                             |
| 3            | 0.25                            |
| 7            | 0.3                             |
| 15           | 0.4                             |
| 20           | 0.42                            |
| 40           | 0.55                            |
| 180          | 0.7                             |
| 3000         | 1                               |
| 20000        | 1.1                             |
| 30000        | 1.15                            |
| 50000        | 1.2                             |
| 100000       | 1.25                            |

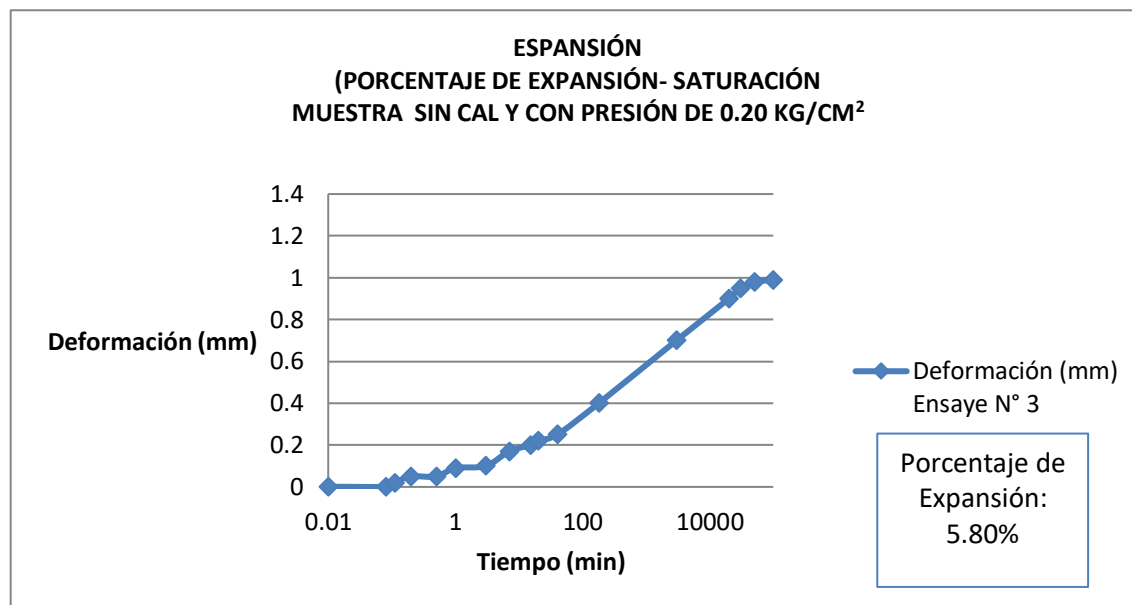




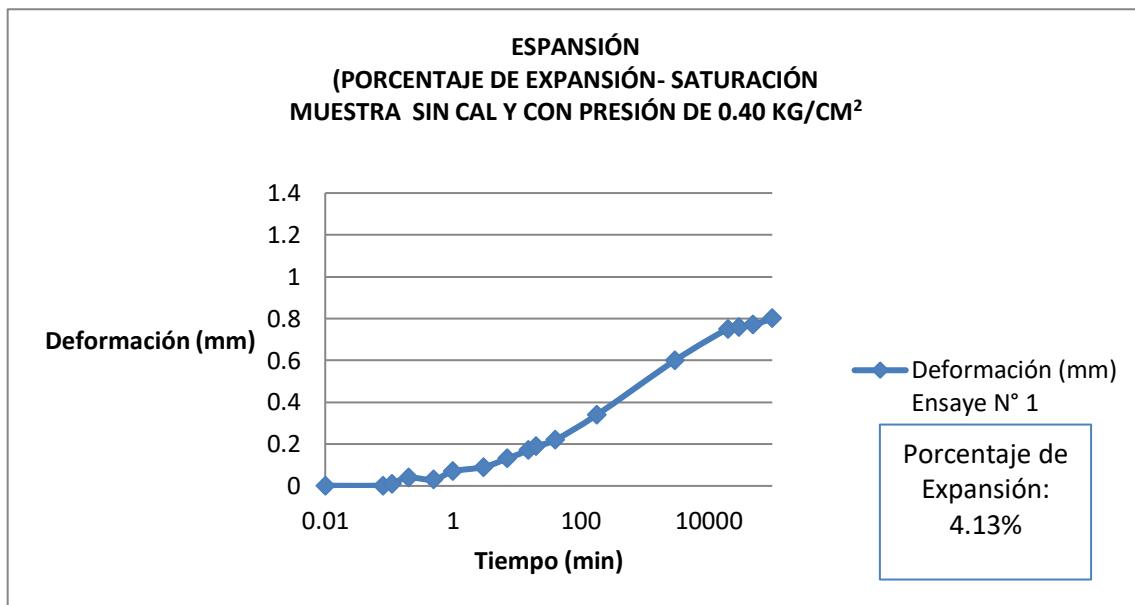
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.01         | 0.001                           |
| 0.08         | 0.02                            |
| 0.11         | 0.04                            |
| 0.2          | 0.09                            |
| 0.5          | 0.1                             |
| 1            | 0.15                            |
| 3            | 0.2                             |
| 7            | 0.25                            |
| 15           | 0.28                            |
| 20           | 0.3                             |
| 40           | 0.4                             |
| 180          | 0.55                            |
| 3000         | 0.9                             |
| 20000        | 1                               |
| 30000        | 1.02                            |
| 50000        | 1.1                             |
| 100000       | 1.2                             |



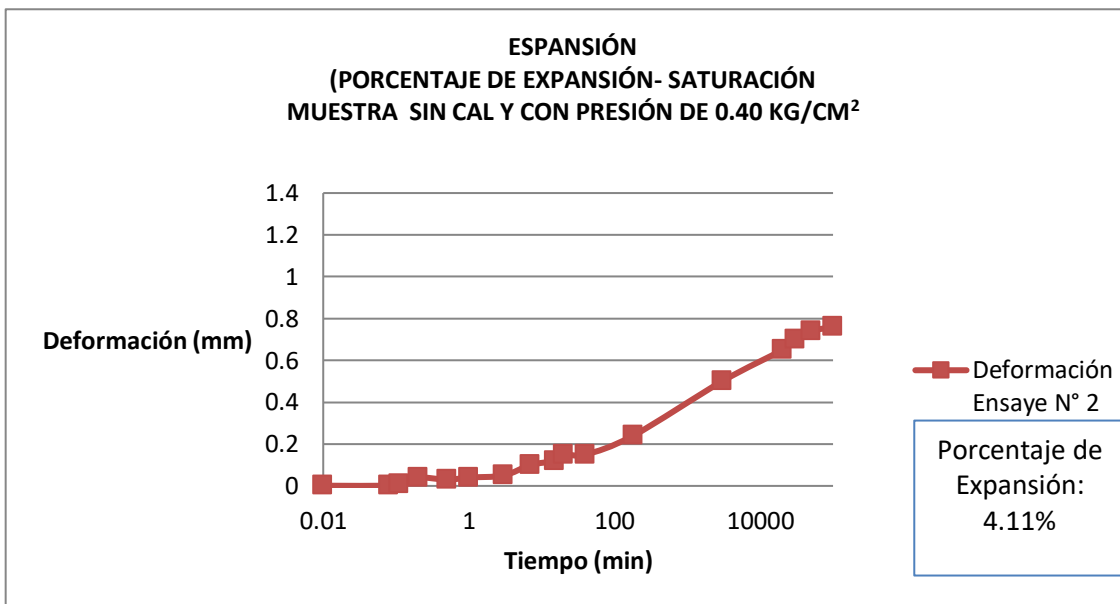
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.01         | 0.001                           |
| 0.08         | 0.001                           |
| 0.11         | 0.02                            |
| 0.2          | 0.05                            |
| 0.5          | 0.05                            |
| 1            | 0.09                            |
| 3            | 0.1                             |
| 7            | 0.17                            |
| 15           | 0.2                             |
| 20           | 0.22                            |
| 40           | 0.25                            |
| 180          | 0.4                             |
| 3000         | 0.7                             |
| 20000        | 0.9                             |
| 30000        | 0.95                            |
| 50000        | 0.98                            |
| 100000       | 0.99                            |



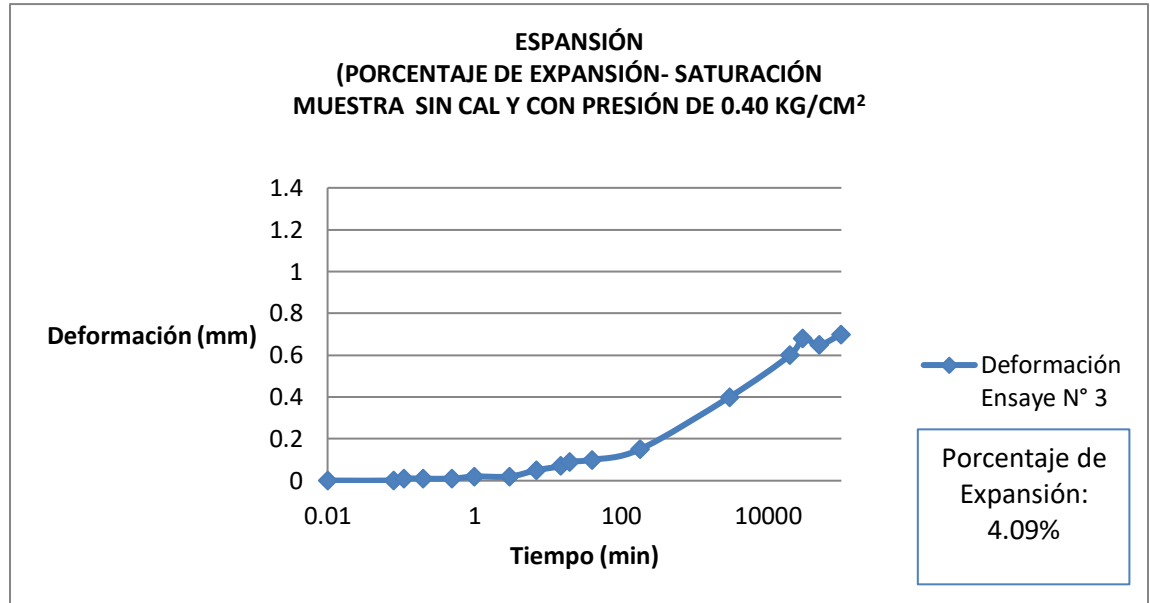
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.01         | 0.001                           |
| 0.08         | 0.001                           |
| 0.11         | 0.01                            |
| 0.2          | 0.04                            |
| 0.5          | 0.03                            |
| 1            | 0.07                            |
| 3            | 0.09                            |
| 7            | 0.13                            |
| 15           | 0.17                            |
| 20           | 0.19                            |
| 40           | 0.22                            |
| 180          | 0.34                            |
| 3000         | 0.6                             |
| 20000        | 0.75                            |
| 30000        | 0.76                            |
| 50000        | 0.77                            |
| 100000       | 0.8                             |



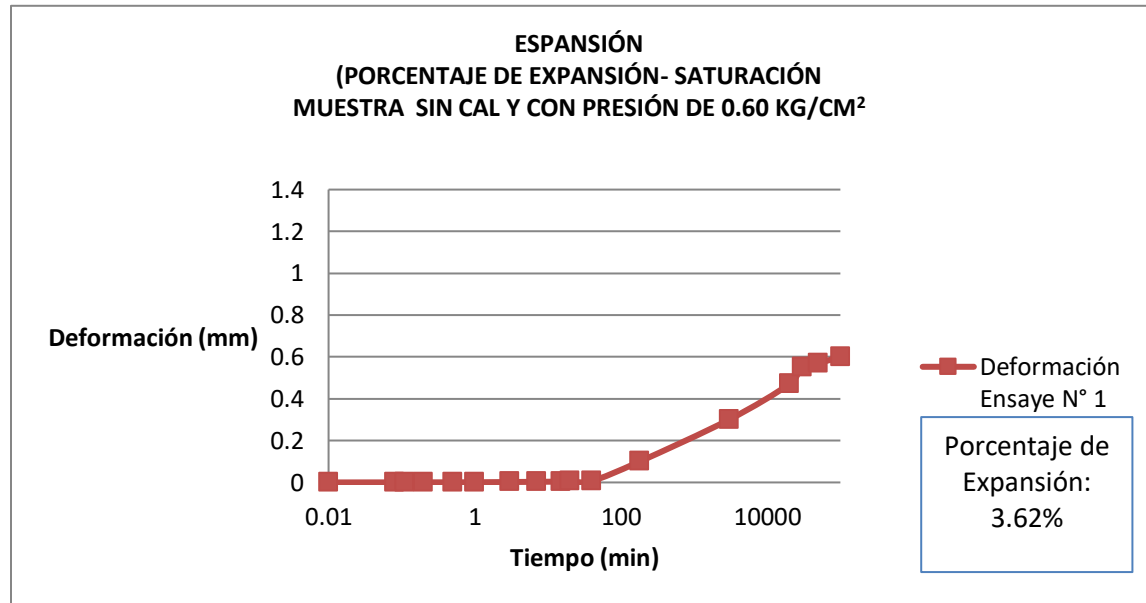
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 2 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.001                   |
| 0.08         | 0.001                   |
| 0.11         | 0.01                    |
| 0.2          | 0.04                    |
| 0.5          | 0.03                    |
| 1            | 0.04                    |
| 3            | 0.05                    |
| 7            | 0.1                     |
| 15           | 0.12                    |
| 20           | 0.15                    |
| 40           | 0.15                    |
| 180          | 0.24                    |
| 3000         | 0.5                     |
| 20000        | 0.65                    |
| 30000        | 0.7                     |
| 50000        | 0.74                    |
| 100000       | 0.76                    |



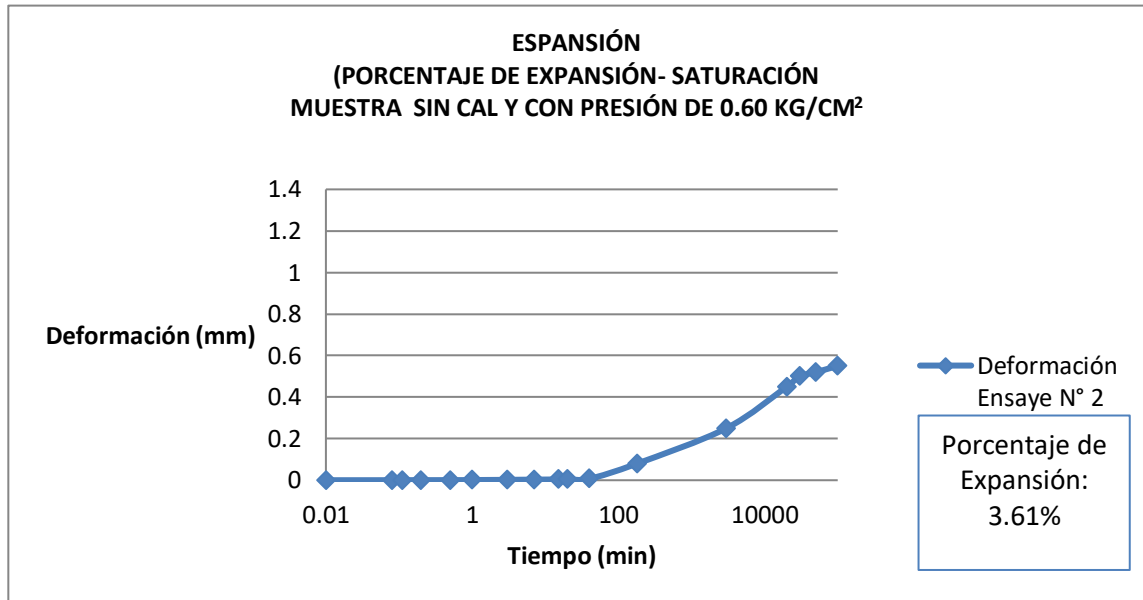
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 3 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.001                   |
| 0.08         | 0.001                   |
| 0.11         | 0.01                    |
| 0.2          | 0.01                    |
| 0.5          | 0.01                    |
| 1            | 0.02                    |
| 3            | 0.02                    |
| 7            | 0.05                    |
| 15           | 0.07                    |
| 20           | 0.09                    |
| 40           | 0.1                     |
| 180          | 0.15                    |
| 3000         | 0.4                     |
| 20000        | 0.6                     |
| 30000        | 0.68                    |
| 50000        | 0.65                    |
| 100000       | 0.7                     |



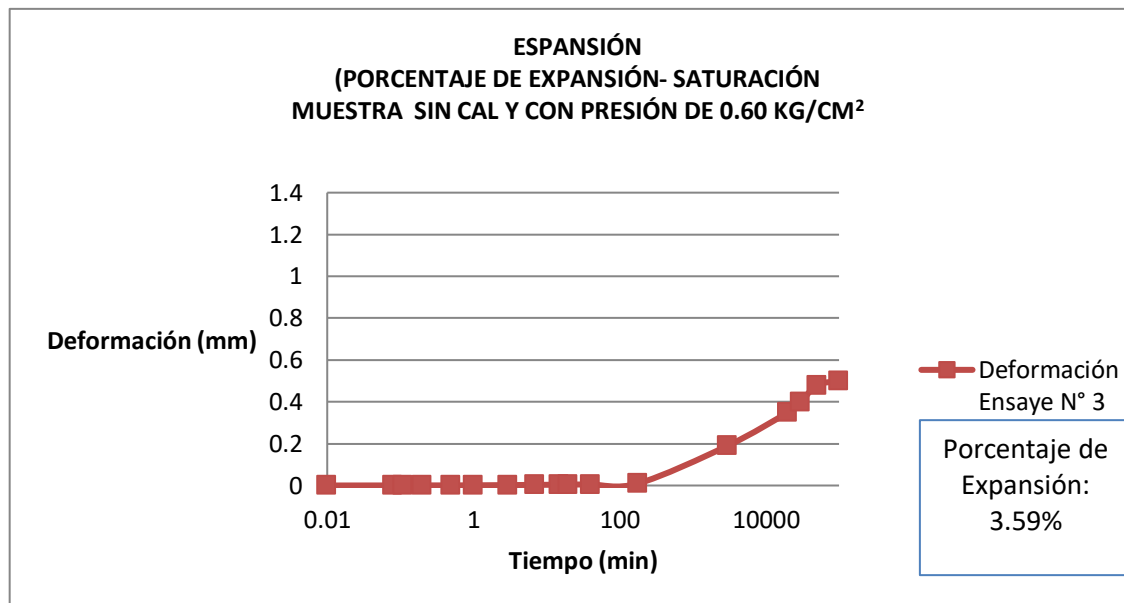
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 1 |
|--------------|-------------------------|
| <b>0.01</b>  | <b>0.0001</b>           |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.007                   |
| 180          | 0.1                     |
| 3000         | 0.3                     |
| 20000        | 0.47                    |
| 30000        | 0.55                    |
| 50000        | 0.57                    |
| 100000       | 0.6                     |



| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 2 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.0001                  |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.007                   |
| 180          | 0.08                    |
| 3000         | 0.25                    |
| 20000        | 0.45                    |
| 30000        | 0.5                     |
| 50000        | 0.52                    |
| 100000       | 0.55                    |

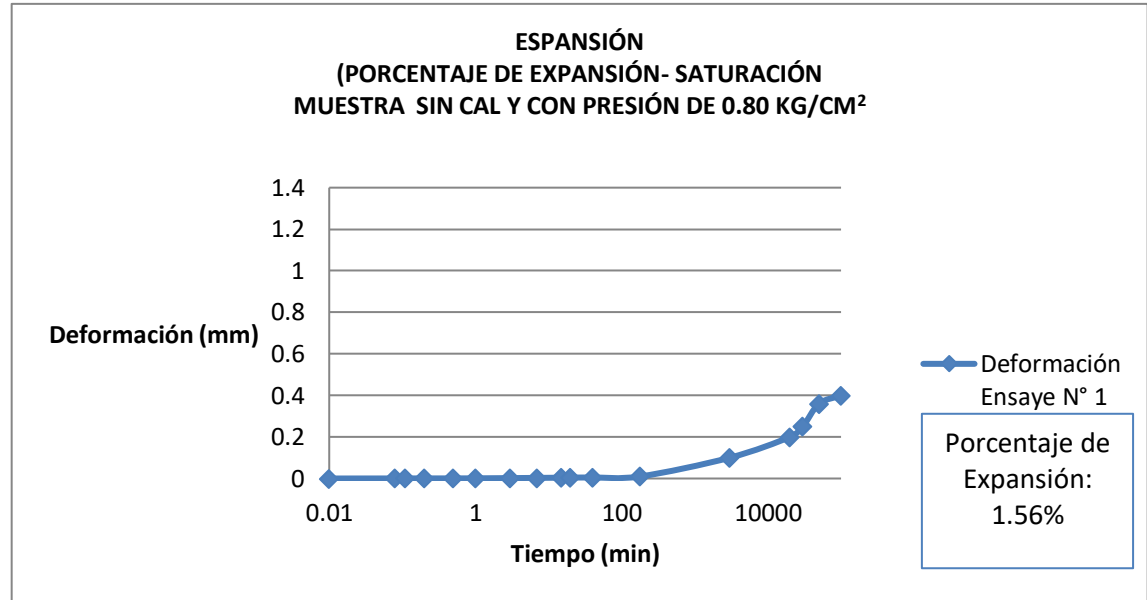


| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 3 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.0001                  |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.005                   |
| 180          | 0.01                    |
| 3000         | 0.19                    |
| 20000        | 0.35                    |
| 30000        | 0.4                     |
| 50000        | 0.48                    |
| 100000       | 0.5                     |

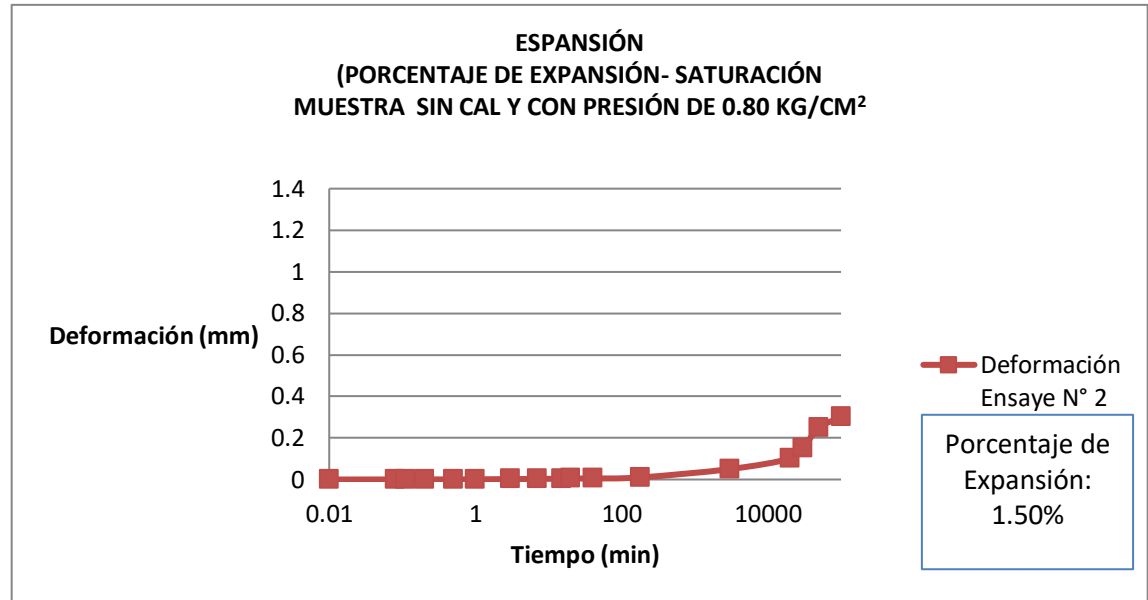




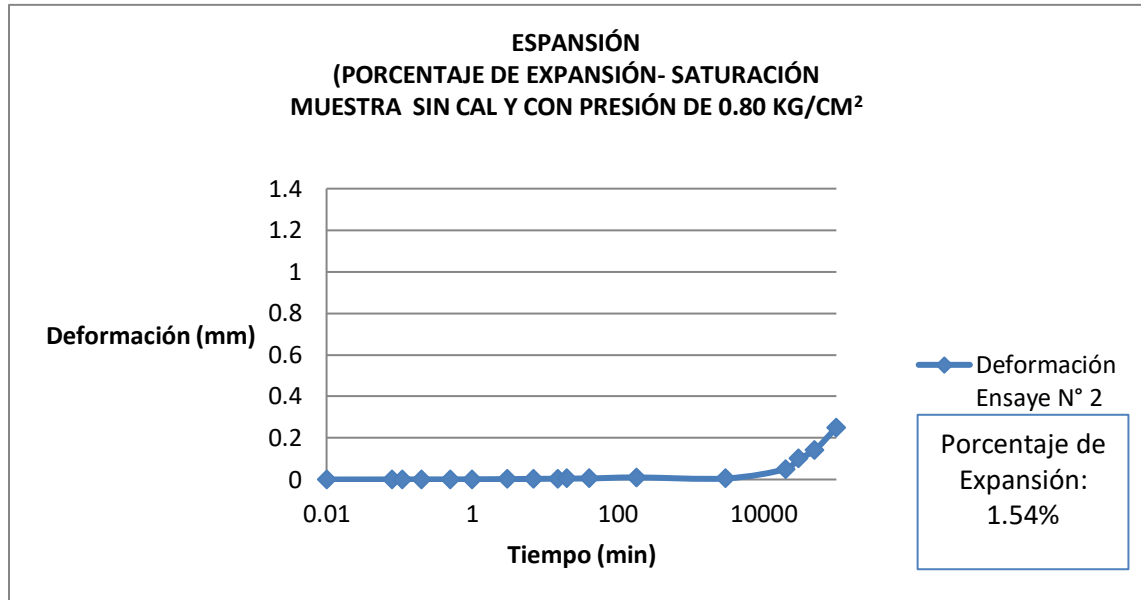
| Tiempo (min) | Deformación Ensayo N° 1 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.0001                  |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.005                   |
| 180          | 0.01                    |
| 3000         | 0.1                     |
| 20000        | 0.2                     |
| 30000        | 0.25                    |
| 50000        | 0.36                    |
| 100000       | 0.4                     |



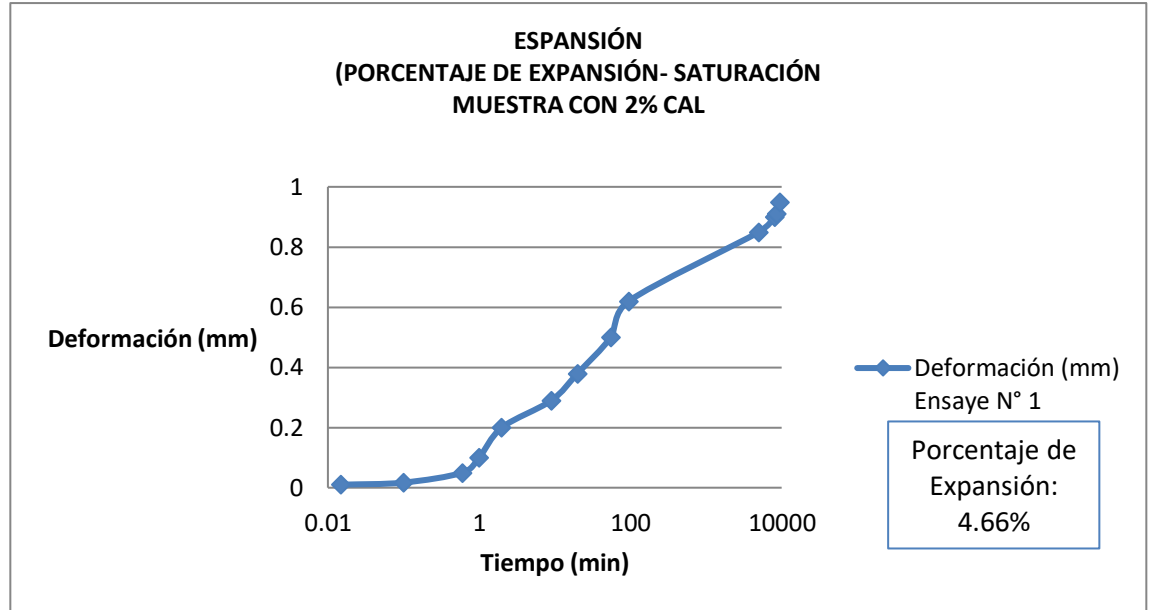
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 2 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.0001                  |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.005                   |
| 180          | 0.01                    |
| 3000         | 0.05                    |
| 20000        | 0.1                     |
| 30000        | 0.15                    |
| 50000        | 0.25                    |
| 100000       | 0.3                     |



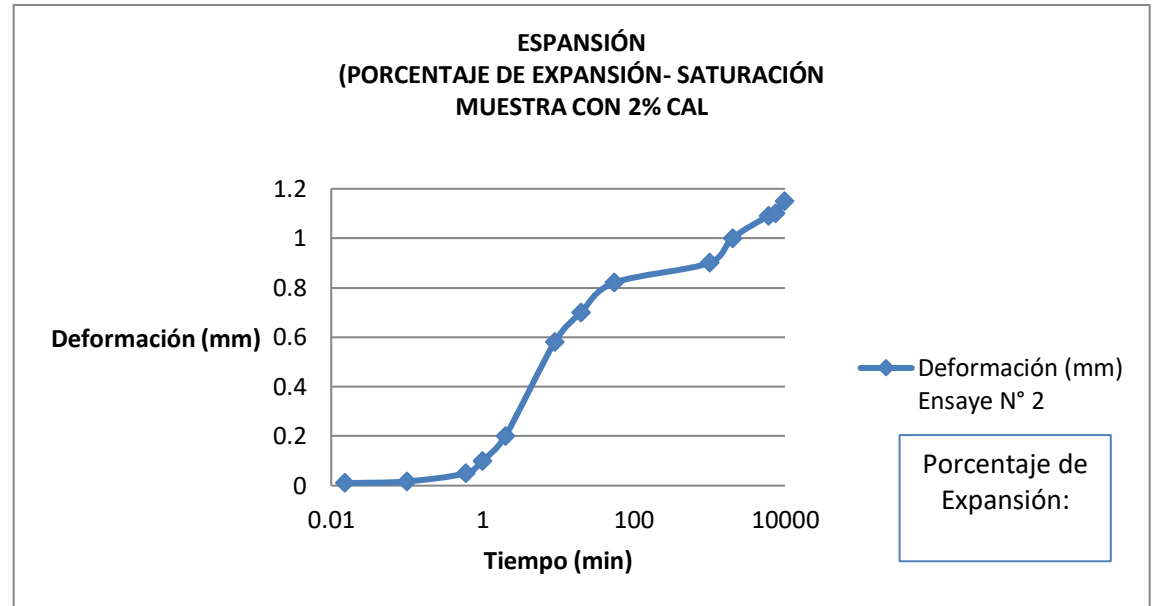
| Tiempo (min) | Deformación Ensaye N° 2 |
|--------------|-------------------------|
| 0.01         | 0.0001                  |
| 0.08         | 0.0003                  |
| 0.11         | 0.0004                  |
| 0.2          | 0.0005                  |
| 0.5          | 0.0006                  |
| 1            | 0.0009                  |
| 3            | 0.002                   |
| 7            | 0.003                   |
| 15           | 0.004                   |
| 20           | 0.005                   |
| 40           | 0.005                   |
| 180          | 0.01                    |
| 3000         | 0.005                   |
| 20000        | 0.05                    |
| 30000        | 0.1                     |
| 50000        | 0.14                    |
| 100000       | 0.25                    |



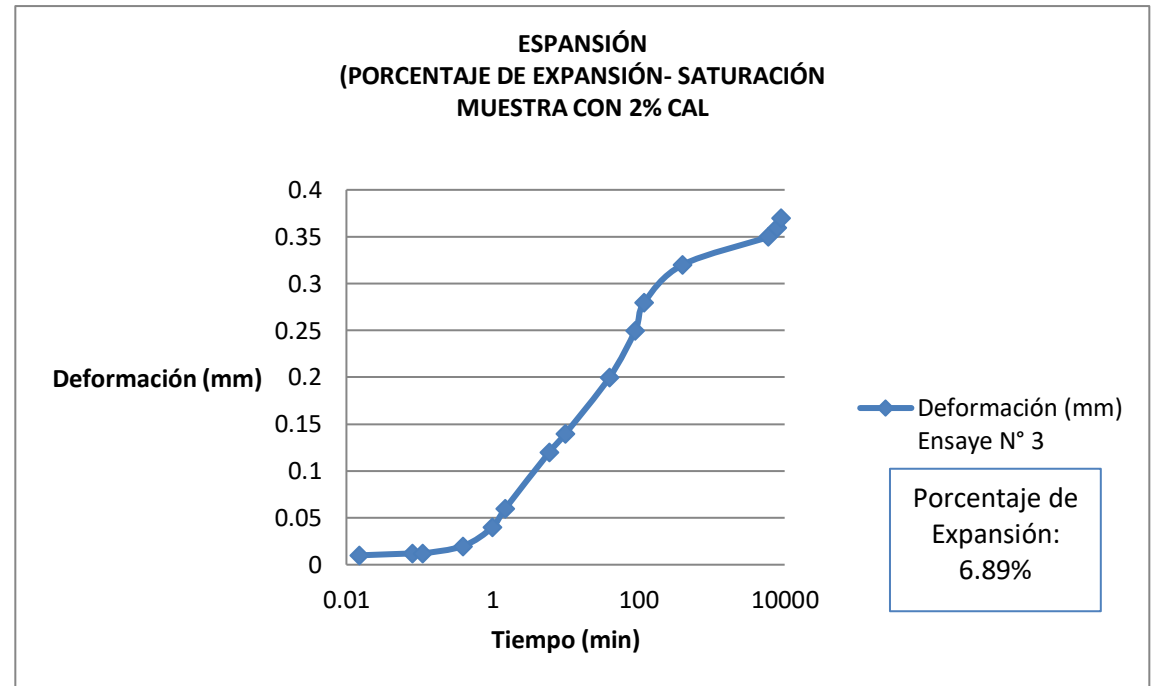
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.1          | 0.017                           |
| 0.6          | 0.05                            |
| 1            | 0.1                             |
| 2            | 0.2                             |
| 9            | 0.29                            |
| 20           | 0.38                            |
| 55           | 0.5                             |
| 95           | 0.62                            |
| 5000         | 0.85                            |
| 8200         | 0.9                             |
| 8700         | 0.91                            |
| 9500         | 0.95                            |



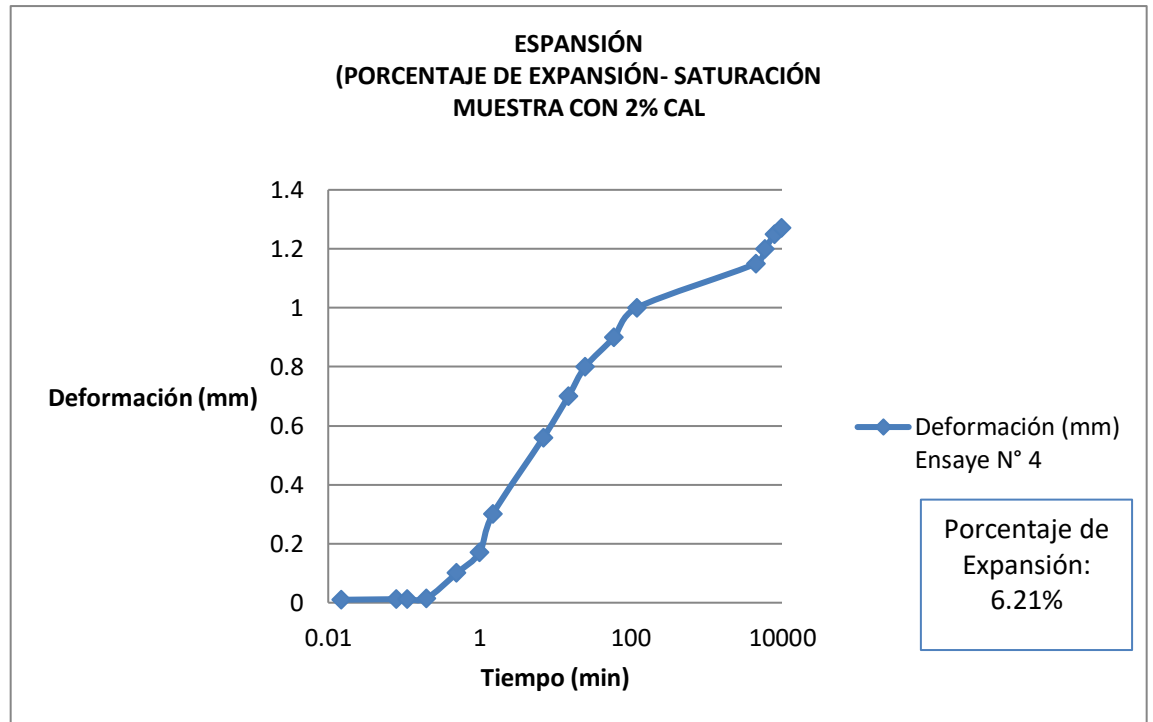
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.1          | 0.017                           |
| 0.6          | 0.05                            |
| 1            | 0.1                             |
| 2            | 0.2                             |
| 9            | 0.58                            |
| 20           | 0.7                             |
| 55           | 0.82                            |
| 1000         | 0.9                             |
| 2000         | 1                               |
| 6000         | 1.09                            |
| 7500         | 1.1                             |
| 9800         | 1.15                            |



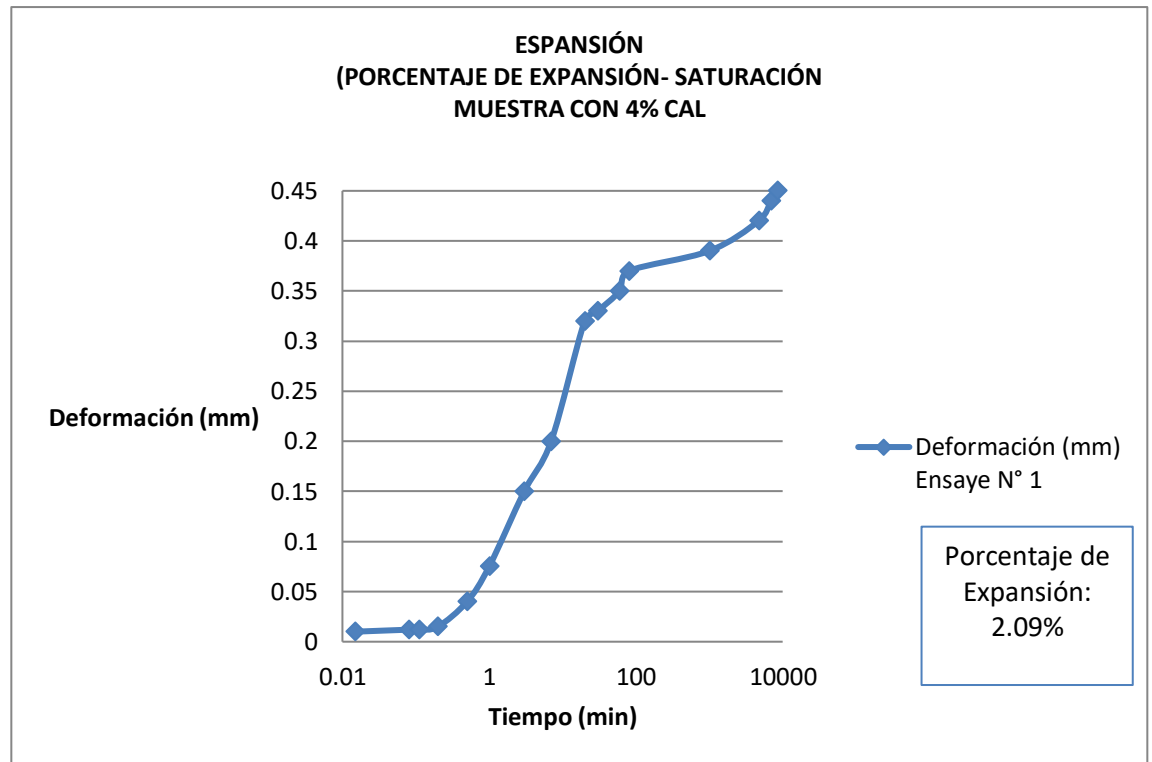
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.012                           |
| 0.11         | 0.012                           |
| 0.4          | 0.02                            |
| 1            | 0.04                            |
| 1.5          | 0.06                            |
| 6            | 0.12                            |
| 10           | 0.14                            |
| 40           | 0.2                             |
| 90           | 0.25                            |
| 120          | 0.28                            |
| 400          | 0.32                            |
| 6000         | 0.35                            |
| 8000         | 0.36                            |
| 9000         | 0.37                            |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 4 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.012                           |
| 0.11         | 0.012                           |
| 0.2          | 0.015                           |
| 0.5          | 0.1                             |
| 1            | 0.17                            |
| 1.5          | 0.3                             |
| 7            | 0.56                            |
| 15           | 0.7                             |
| 25           | 0.8                             |
| 60           | 0.9                             |
| 120          | 1                               |
| 4500         | 1.15                            |
| 6000         | 1.2                             |
| 8000         | 1.25                            |
| 9900         | 1.27                            |

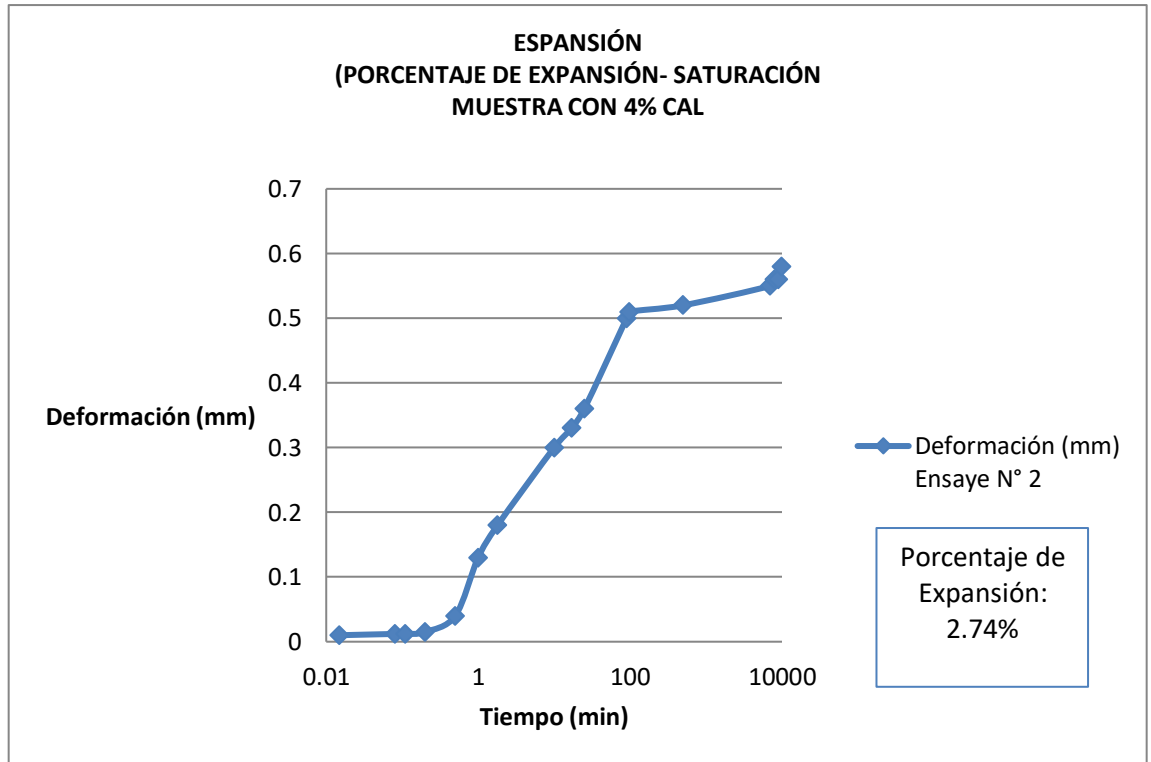


| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.012                           |
| 0.11         | 0.012                           |
| 0.2          | 0.015                           |
| 0.5          | 0.04                            |
| 1            | 0.075                           |
| 3            | 0.15                            |
| 7            | 0.2                             |
| 20           | 0.32                            |
| 30           | 0.33                            |
| 60           | 0.35                            |
| 80           | 0.37                            |
| 1000         | 0.39                            |
| 4700         | 0.42                            |
| 7000         | 0.44                            |
| 8500         | 0.45                            |
| 9800         | 0.47                            |

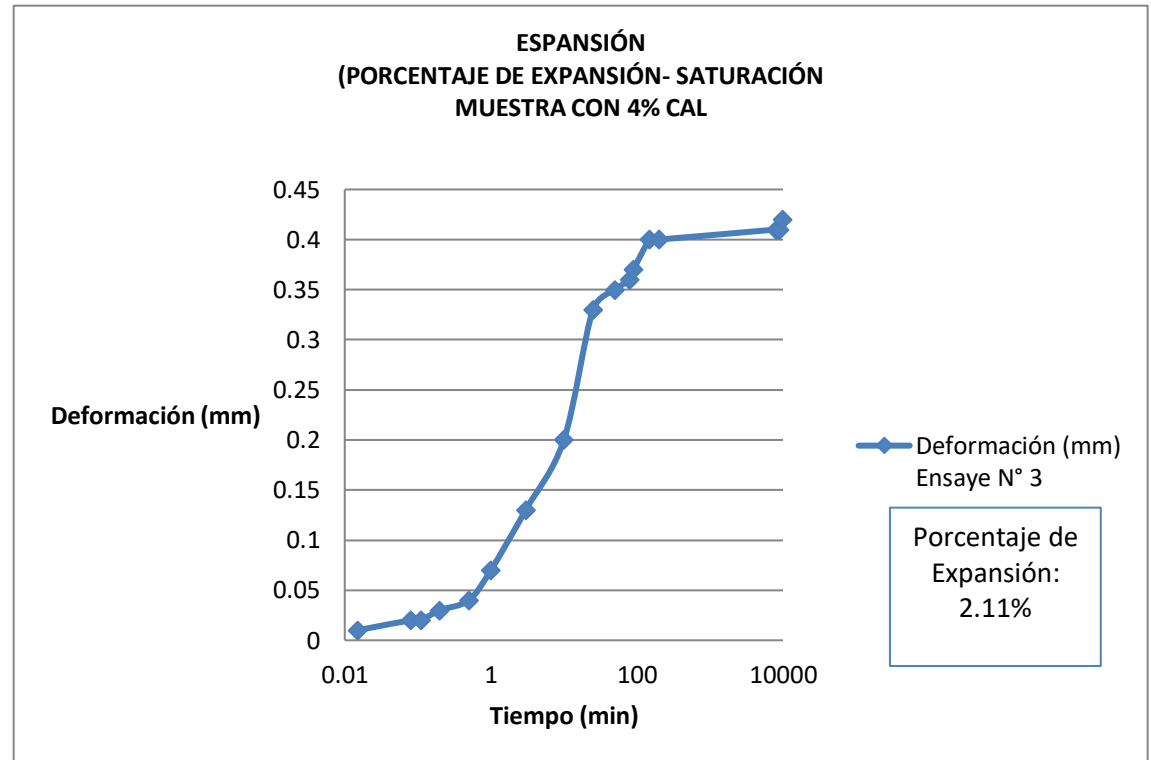




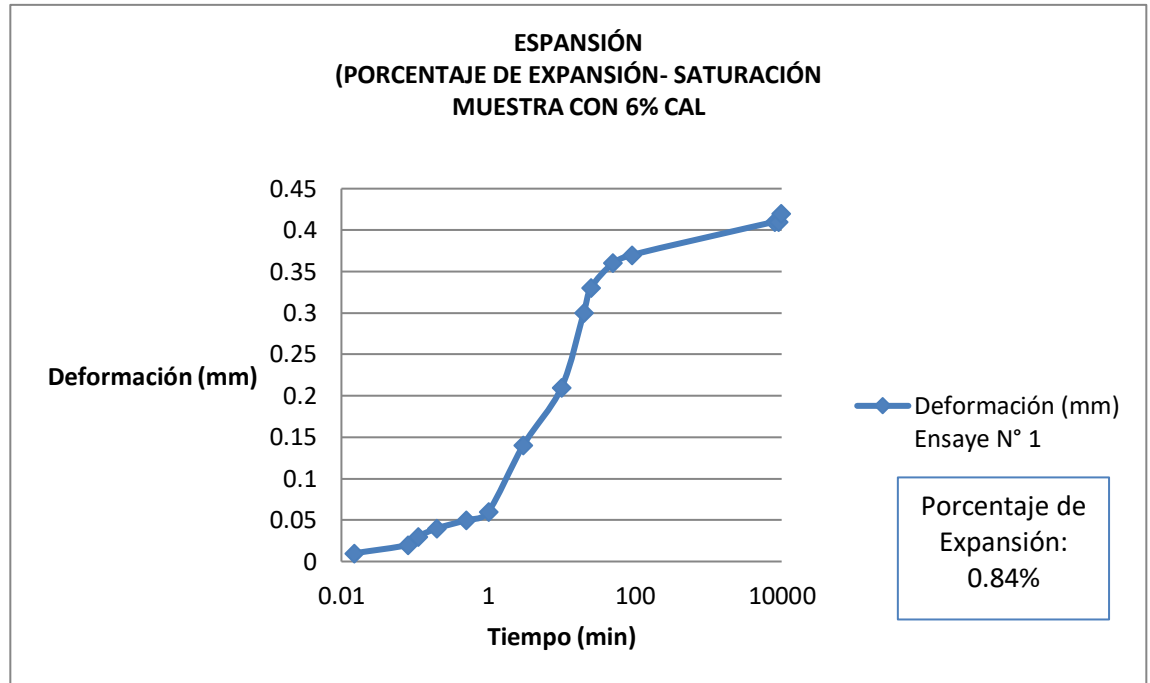
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.012                           |
| 0.11         | 0.012                           |
| 0.2          | 0.015                           |
| 0.5          | 0.04                            |
| 1            | 0.13                            |
| 1.8          | 0.18                            |
| 10           | 0.3                             |
| 17           | 0.33                            |
| 25           | 0.36                            |
| 90           | 0.5                             |
| 98           | 0.51                            |
| 500          | 0.52                            |
| 7000         | 0.55                            |
| 8000         | 0.56                            |
| 9000         | 0.56                            |
| 9800         | 0.58                            |



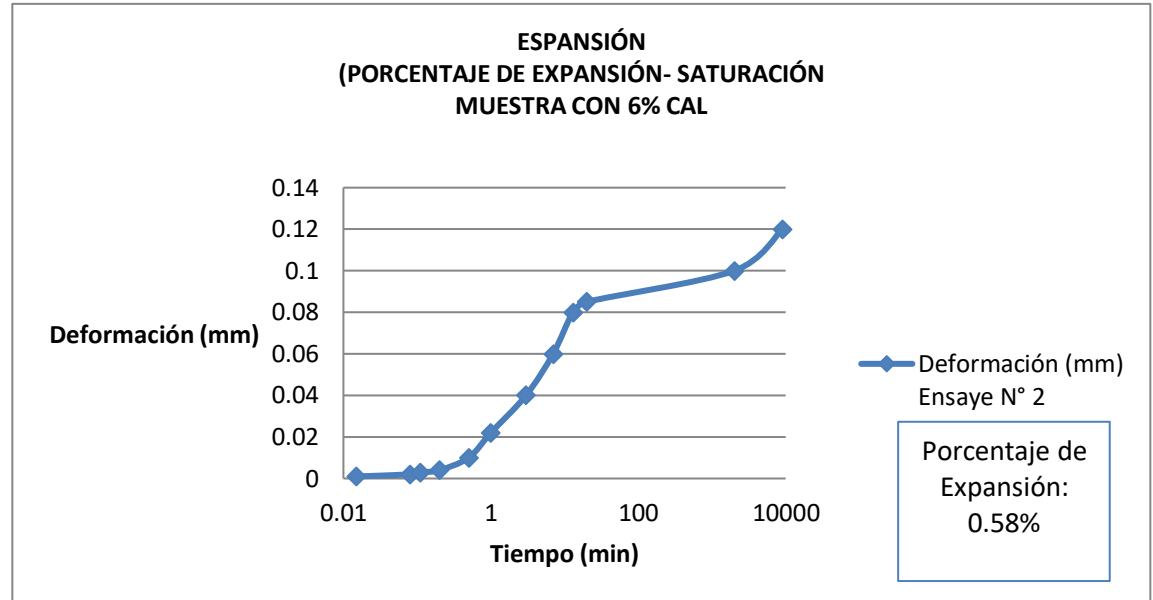
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.02                            |
| 0.11         | 0.02                            |
| 0.2          | 0.03                            |
| 0.5          | 0.04                            |
| 1            | 0.07                            |
| 3            | 0.13                            |
| 10           | 0.2                             |
| 25           | 0.33                            |
| 50           | 0.35                            |
| 80           | 0.36                            |
| 90           | 0.37                            |
| 150          | 0.4                             |
| 200          | 0.4                             |
| 8000         | 0.41                            |
| 9000         | 0.41                            |
| 9800         | 0.42                            |



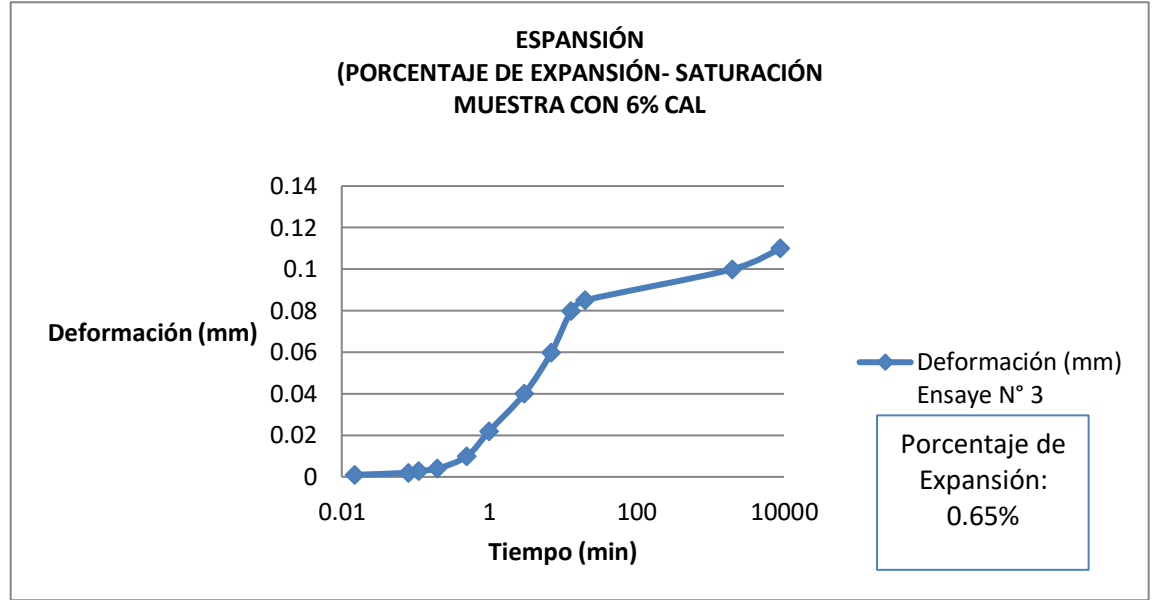
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.01                            |
| 0.08         | 0.02                            |
| 0.11         | 0.03                            |
| 0.2          | 0.04                            |
| 0.5          | 0.05                            |
| 1            | 0.06                            |
| 3            | 0.14                            |
| 10           | 0.21                            |
| 20           | 0.3                             |
| 25           | 0.33                            |
| 50           | 0.36                            |
| 90           | 0.37                            |
| 8000         | 0.41                            |
| 9000         | 0.41                            |
| 9800         | 0.42                            |



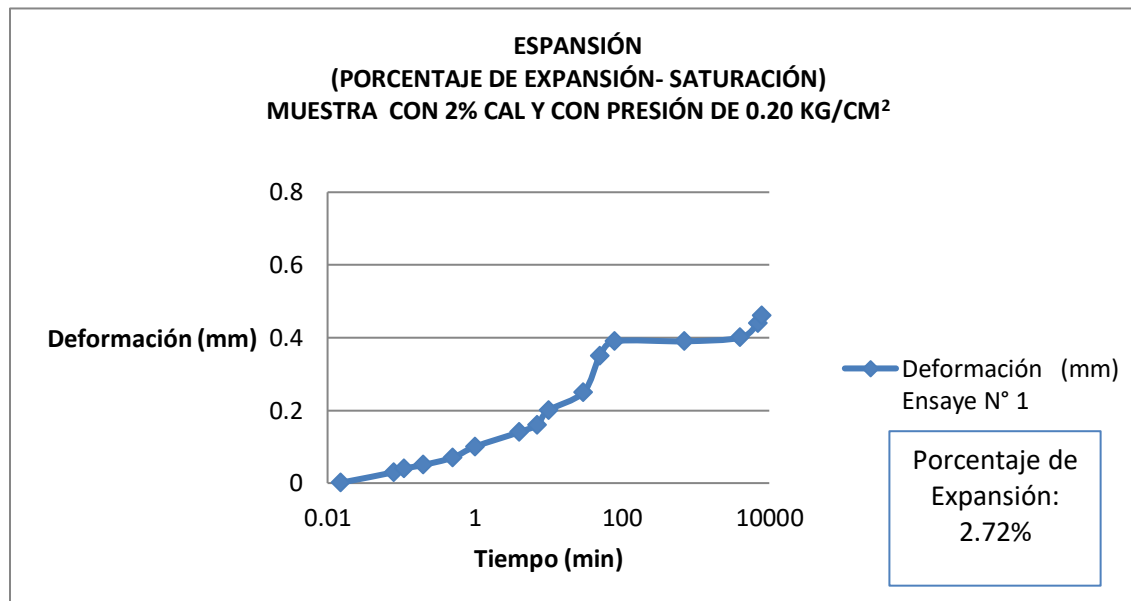
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.002                           |
| 0.11         | 0.003                           |
| 0.2          | 0.004                           |
| 0.5          | 0.01                            |
| 1            | 0.022                           |
| 3            | 0.04                            |
| 7            | 0.06                            |
| 13           | 0.08                            |
| 20           | 0.085                           |
| 2000         | 0.1                             |
| 9000         | 0.12                            |



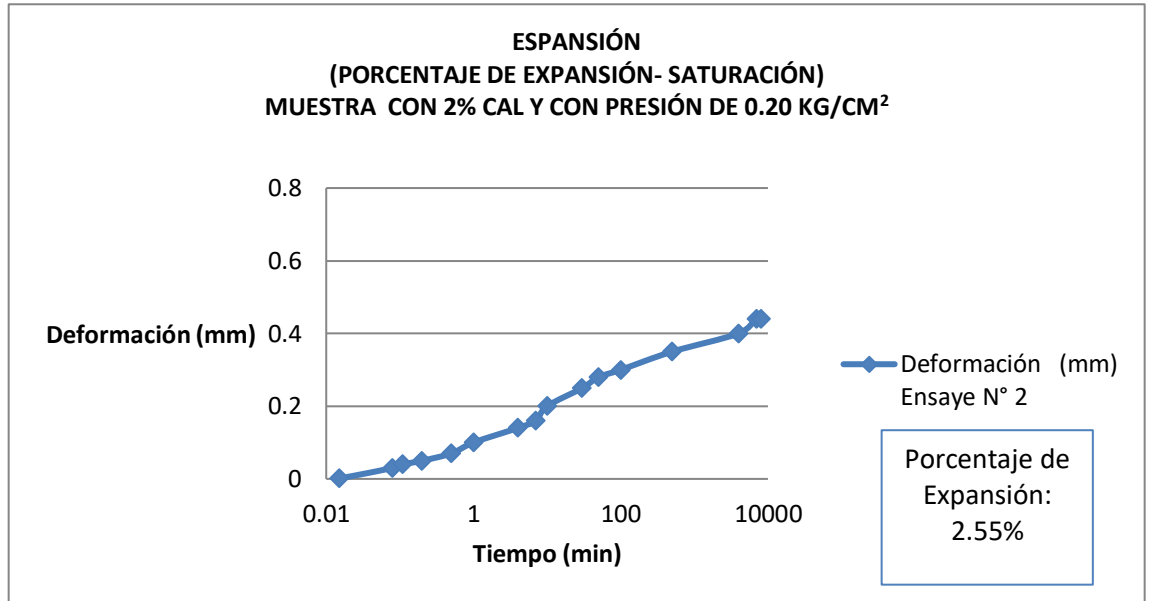
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.002                           |
| 0.11         | 0.003                           |
| 0.2          | 0.004                           |
| 0.5          | 0.01                            |
| 1            | 0.022                           |
| 3            | 0.04                            |
| 7            | 0.06                            |
| 13           | 0.08                            |
| 20           | 0.085                           |
| 2000         | 0.1                             |
| 9000         | 0.11                            |



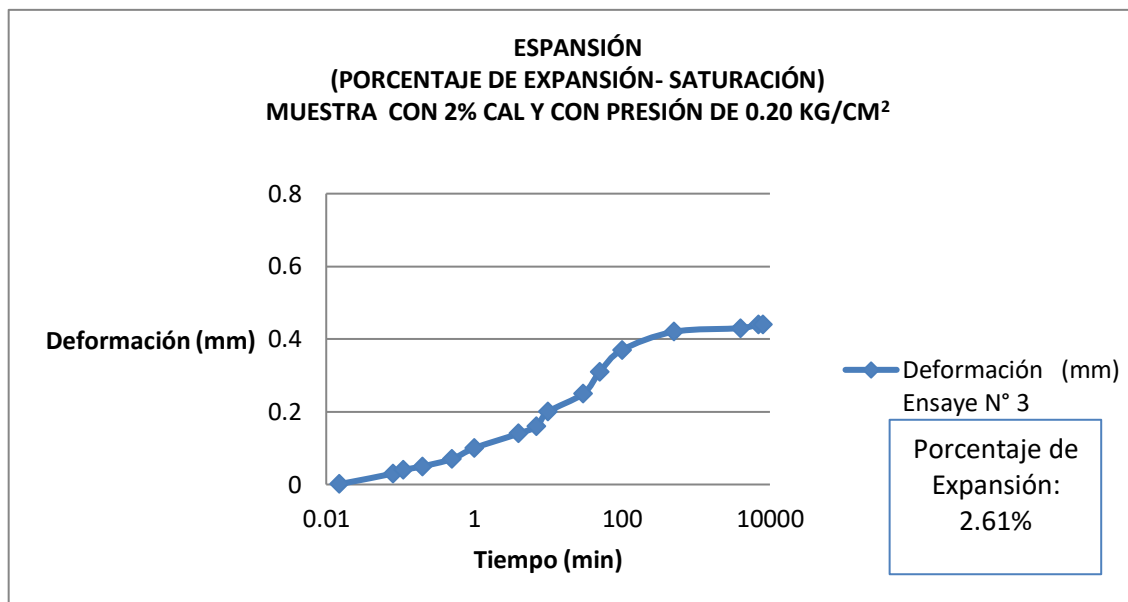
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.03                            |
| 0.11         | 0.04                            |
| 0.2          | 0.05                            |
| 0.5          | 0.07                            |
| 1            | 0.1                             |
| 4            | 0.14                            |
| 7            | 0.16                            |
| 10           | 0.2                             |
| 30           | 0.25                            |
| 50           | 0.35                            |
| 80           | 0.39                            |
| 700          | 0.39                            |
| 4000         | 0.4                             |
| 7000         | 0.44                            |
| 8000         | 0.46                            |
| 9500         | 0.5                             |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.03                            |
| 0.11         | 0.04                            |
| 0.2          | 0.05                            |
| 0.5          | 0.07                            |
| 1            | 0.1                             |
| 4            | 0.14                            |
| 7            | 0.16                            |
| 10           | 0.2                             |
| 30           | 0.25                            |
| 50           | 0.28                            |
| 100          | 0.3                             |
| 500          | 0.35                            |
| 4000         | 0.4                             |
| 7000         | 0.44                            |
| 8000         | 0.44                            |
| 9500         | 0.5                             |

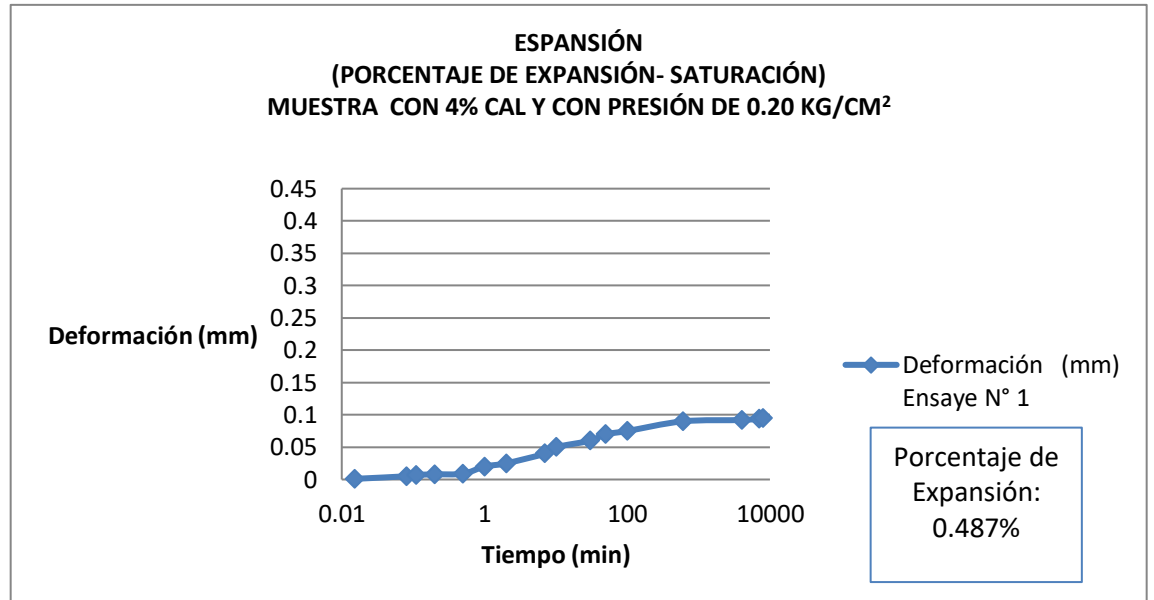


| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.03                            |
| 0.11         | 0.04                            |
| 0.2          | 0.05                            |
| 0.5          | 0.07                            |
| 1            | 0.1                             |
| 4            | 0.14                            |
| 7            | 0.16                            |
| 10           | 0.2                             |
| 30           | 0.25                            |
| 50           | 0.31                            |
| 100          | 0.37                            |
| 500          | 0.42                            |
| 4000         | 0.43                            |
| 7000         | 0.44                            |
| 8000         | 0.44                            |
| 9500         | 0.5                             |

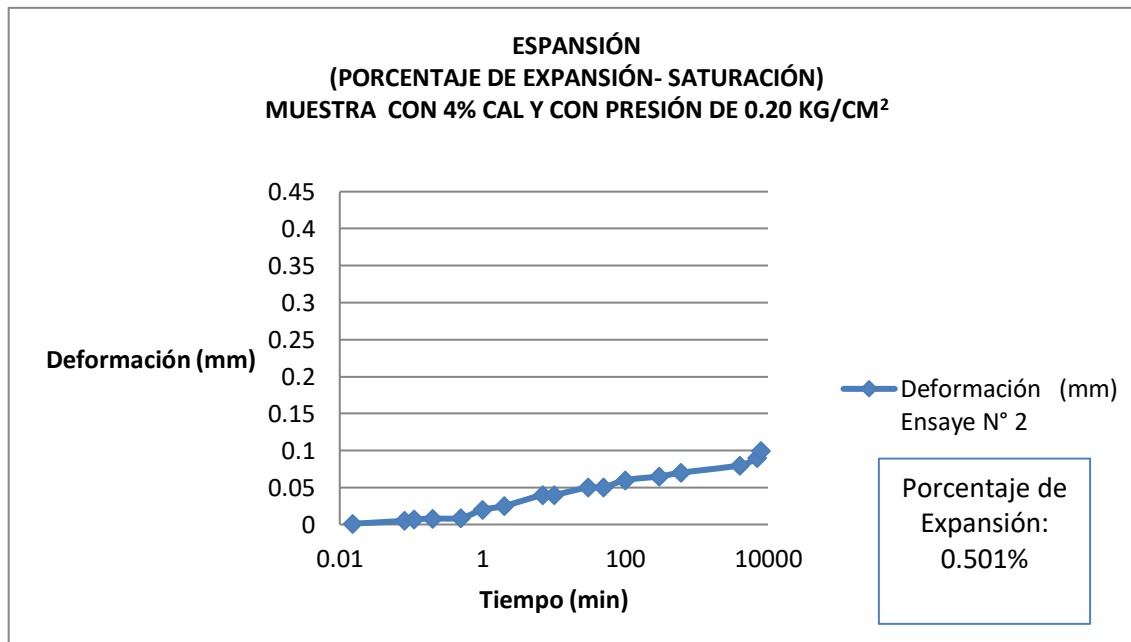




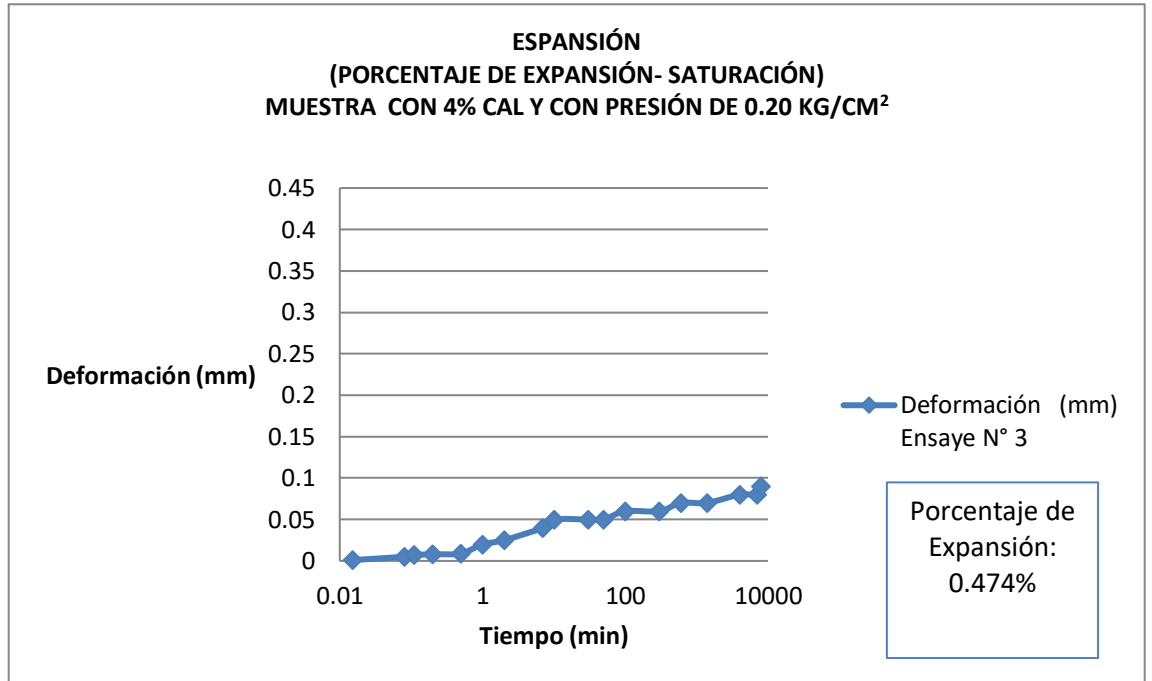
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.005                           |
| 0.11         | 0.007                           |
| 0.2          | 0.008                           |
| 0.5          | 0.009                           |
| 1            | 0.02                            |
| 2            | 0.025                           |
| 7            | 0.04                            |
| 10           | 0.05                            |
| 30           | 0.06                            |
| 50           | 0.07                            |
| 100          | 0.075                           |
| 600          | 0.09                            |
| 4000         | 0.092                           |
| 7000         | 0.094                           |
| 8000         | 0.095                           |
| 9500         | 0.096                           |



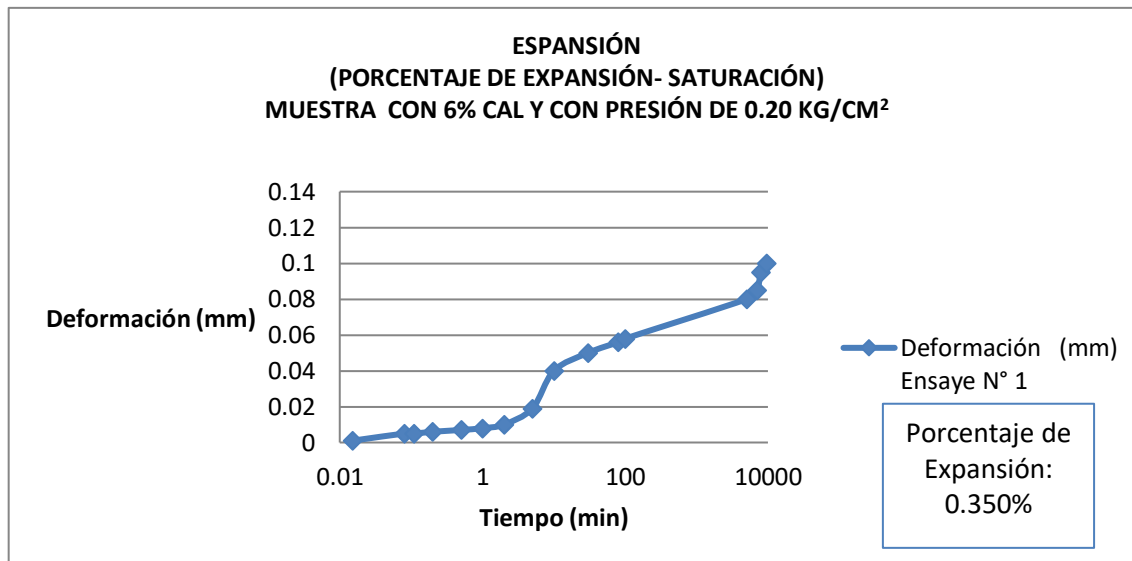
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.005                           |
| 0.11         | 0.007                           |
| 0.2          | 0.008                           |
| 0.5          | 0.009                           |
| 1            | 0.02                            |
| 2            | 0.025                           |
| 7            | 0.04                            |
| 10           | 0.04                            |
| 30           | 0.05                            |
| 50           | 0.05                            |
| 100          | 0.06                            |
| 300          | 0.065                           |
| 600          | 0.07                            |
| 4000         | 0.08                            |
| 7000         | 0.09                            |
| 8000         | 0.1                             |
| 9500         | 0.096                           |



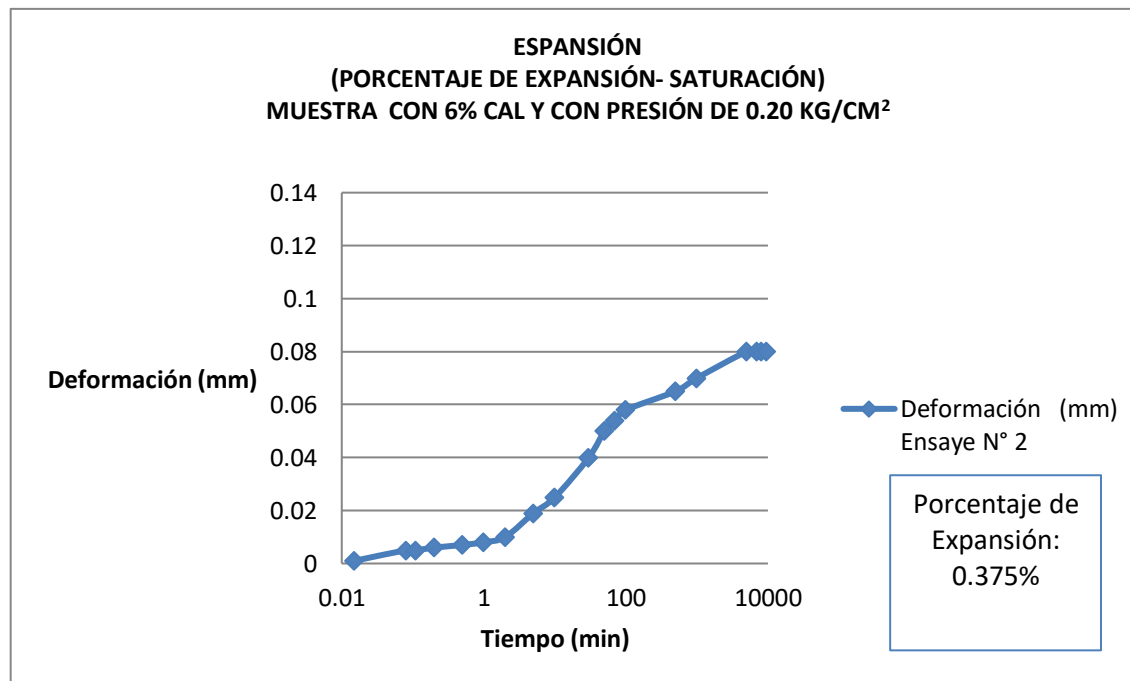
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.005                           |
| 0.11         | 0.007                           |
| 0.2          | 0.008                           |
| 0.5          | 0.009                           |
| 1            | 0.02                            |
| 2            | 0.025                           |
| 7            | 0.04                            |
| 10           | 0.05                            |
| 30           | 0.05                            |
| 50           | 0.05                            |
| 100          | 0.06                            |
| 300          | 0.06                            |
| 600          | 0.07                            |
| 1400         | 0.07                            |
| 4000         | 0.08                            |
| 7000         | 0.08                            |
| 8000         | 0.09                            |
| 9500         | 0.096                           |



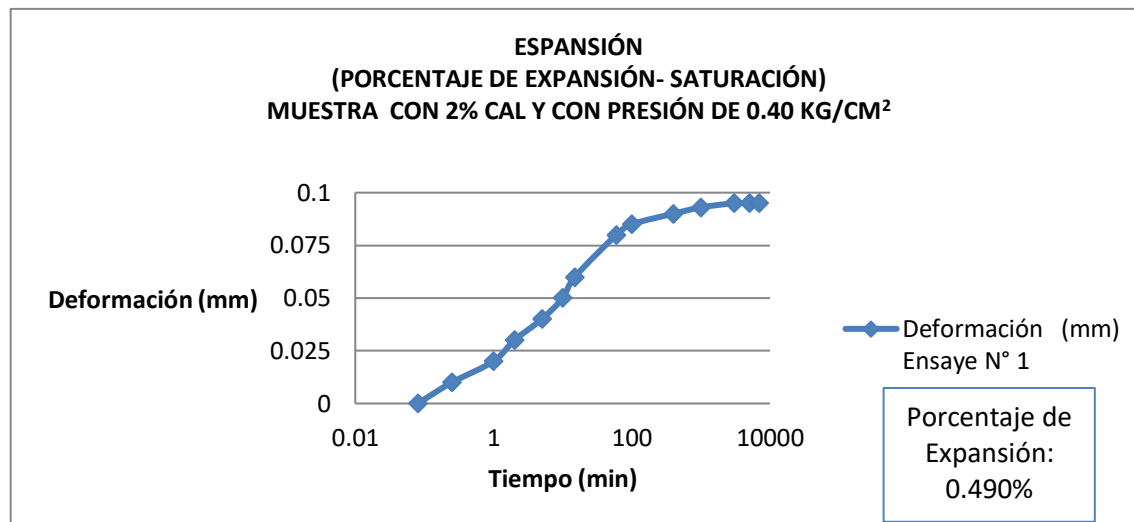
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.005                           |
| 0.11         | 0.005                           |
| 0.2          | 0.006                           |
| 0.5          | 0.007                           |
| 1            | 0.008                           |
| 2            | 0.01                            |
| 5            | 0.019                           |
| 10           | 0.04                            |
| 30           | 0.05                            |
| 80           | 0.056                           |
| 100          | 0.058                           |
| 5000         | 0.08                            |
| 7000         | 0.085                           |
| 8000         | 0.095                           |
| 9500         | 0.1                             |



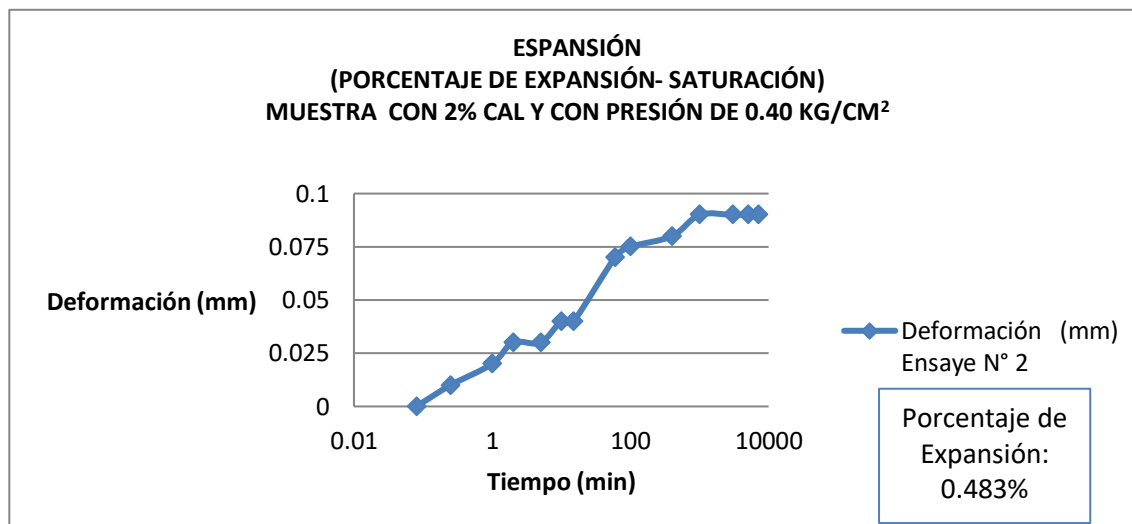
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.015        | 0.001                           |
| 0.08         | 0.005                           |
| 0.11         | 0.005                           |
| 0.2          | 0.006                           |
| 0.5          | 0.007                           |
| 1            | 0.008                           |
| 2            | 0.01                            |
| 5            | 0.019                           |
| 10           | 0.025                           |
| 30           | 0.04                            |
| 50           | 0.05                            |
| 70           | 0.054                           |
| 100          | 0.058                           |
| 500          | 0.065                           |
| 1000         | 0.07                            |
| 5000         | 0.08                            |
| 7000         | 0.08                            |
| 8000         | 0.08                            |
| 9500         | 0.08                            |



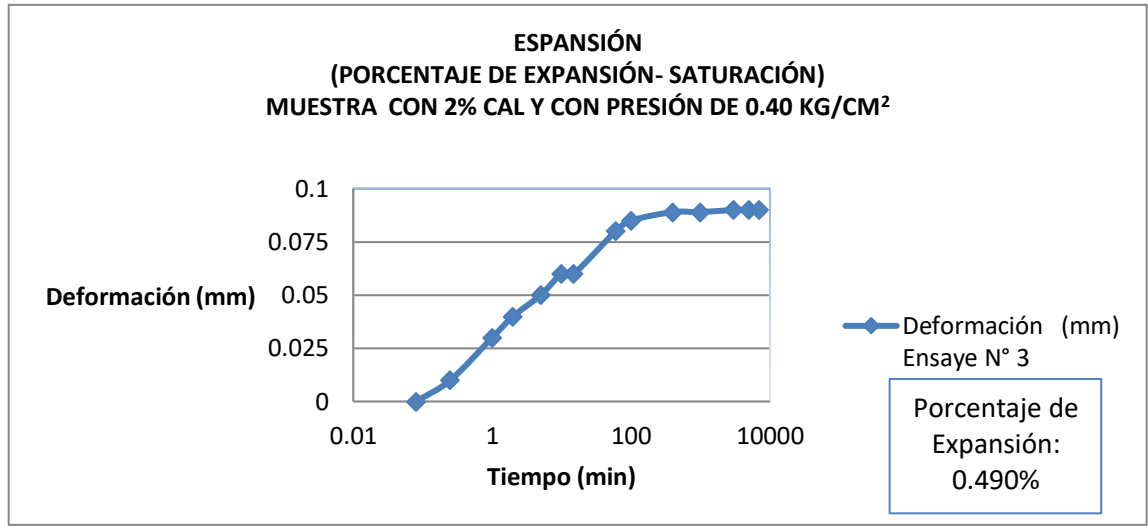
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.08         | 0                               |
| 0.25         | 0.01                            |
| 1            | 0.02                            |
| 2            | 0.03                            |
| 5            | 0.04                            |
| 10           | 0.05                            |
| 15           | 0.06                            |
| 60           | 0.08                            |
| 100          | 0.085                           |
| 400          | 0.09                            |
| 1000         | 0.093                           |
| 3000         | 0.095                           |
| 5000         | 0.095                           |
| 7000         | 0.095                           |
| 9000         | 0.095                           |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.08         | 0                               |
| 0.25         | 0.01                            |
| 1            | 0.02                            |
| 2            | 0.03                            |
| 5            | 0.03                            |
| 10           | 0.04                            |
| 15           | 0.04                            |
| 60           | 0.07                            |
| 100          | 0.075                           |
| 400          | 0.08                            |
| 1000         | 0.09                            |
| 3000         | 0.09                            |
| 5000         | 0.09                            |
| 7000         | 0.09                            |
| 9000         | 0.095                           |

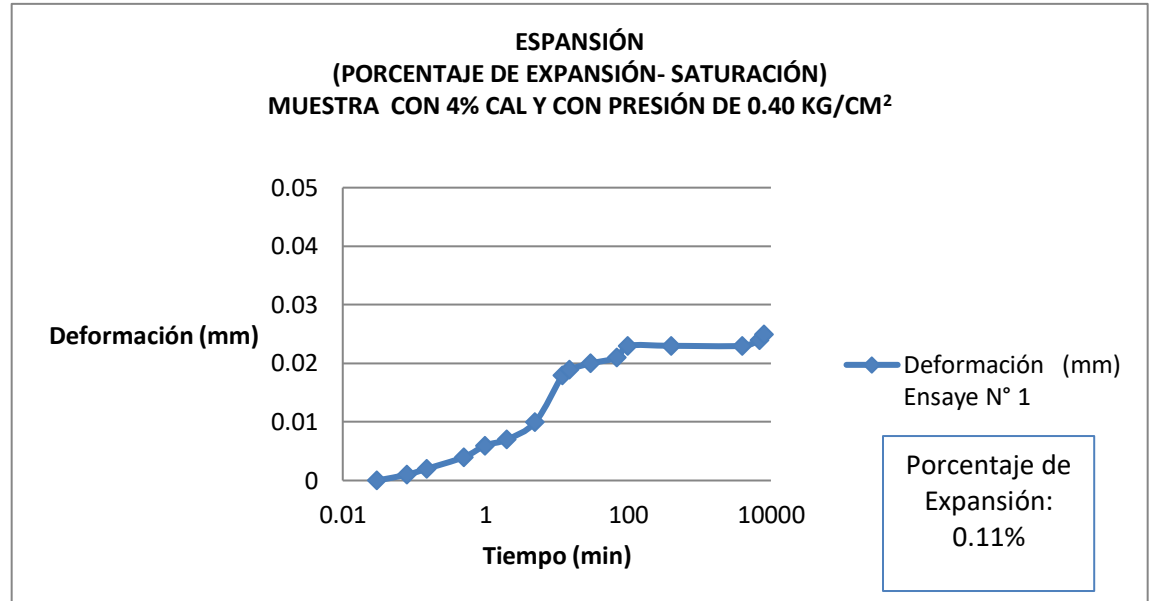


| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.08         | 0                               |
| 0.25         | 0.01                            |
| 1            | 0.03                            |
| 2            | 0.04                            |
| 5            | 0.05                            |
| 10           | 0.06                            |
| 15           | 0.06                            |
| 60           | 0.08                            |
| 100          | 0.085                           |
| 400          | 0.089                           |
| 1000         | 0.089                           |
| 3000         | 0.09                            |
| 5000         | 0.09                            |
| 7000         | 0.09                            |
| 9000         | 0.09                            |

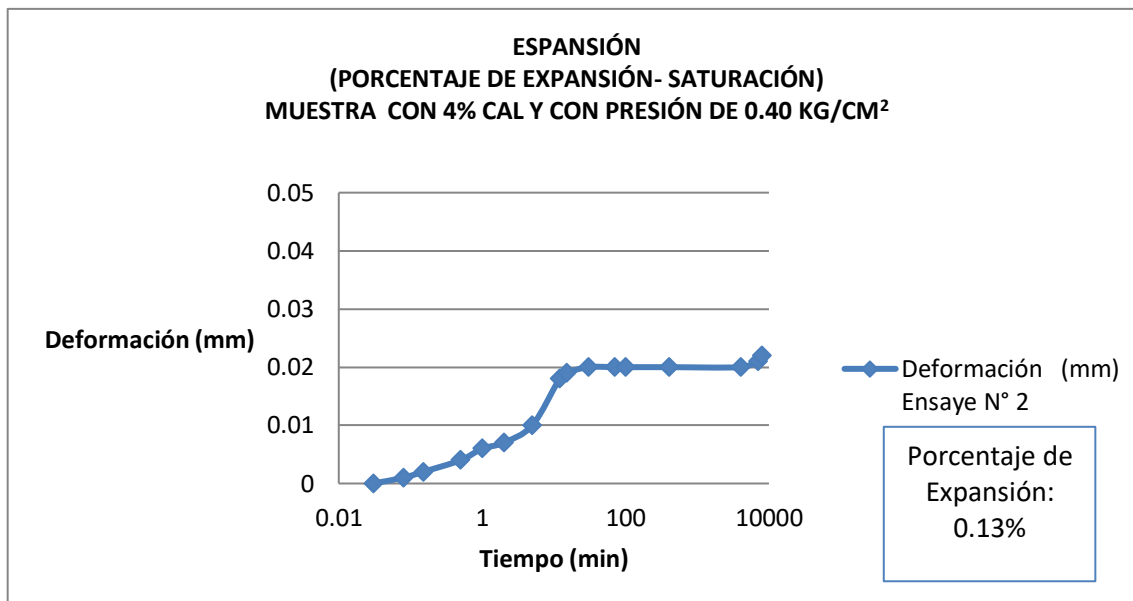




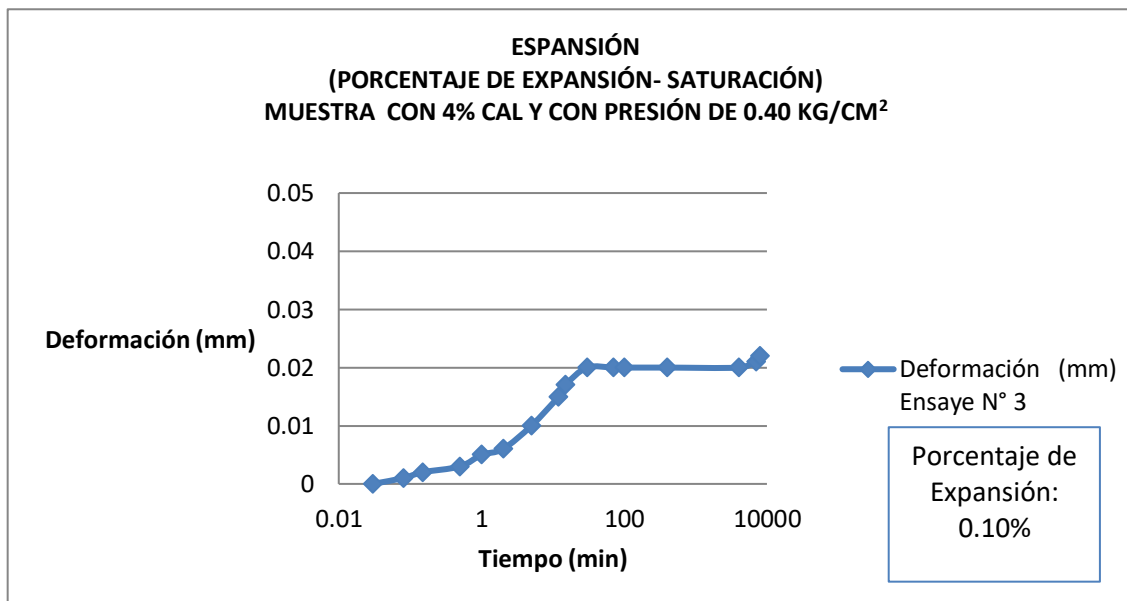
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.08         | 0.001                           |
| 0.15         | 0.002                           |
| 0.5          | 0.004                           |
| 1            | 0.006                           |
| 2            | 0.007                           |
| 5            | 0.01                            |
| 12           | 0.018                           |
| 15           | 0.019                           |
| 30           | 0.02                            |
| 70           | 0.021                           |
| 100          | 0.023                           |
| 400          | 0.023                           |
| 4000         | 0.023                           |
| 7000         | 0.024                           |
| 8000         | 0.025                           |
| 9500         | 0.025                           |



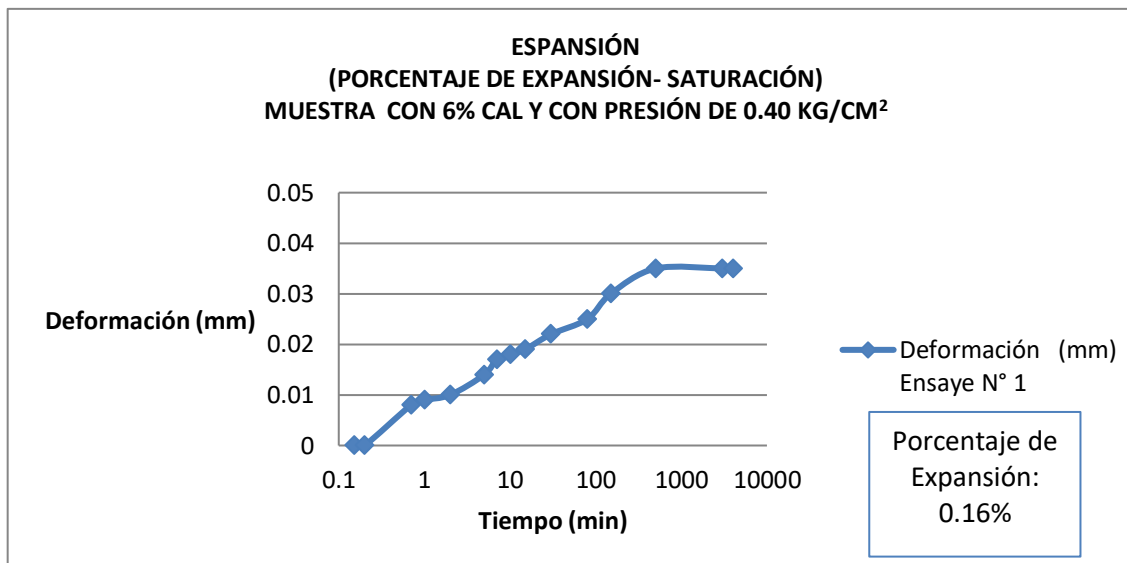
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.08         | 0.001                           |
| 0.15         | 0.002                           |
| 0.5          | 0.004                           |
| 1            | 0.006                           |
| 2            | 0.007                           |
| 5            | 0.01                            |
| 12           | 0.018                           |
| 15           | 0.019                           |
| 30           | 0.02                            |
| 70           | 0.02                            |
| 100          | 0.02                            |
| 400          | 0.02                            |
| 4000         | 0.02                            |
| 7000         | 0.021                           |
| 8000         | 0.022                           |
| 9500         | 0.0023                          |



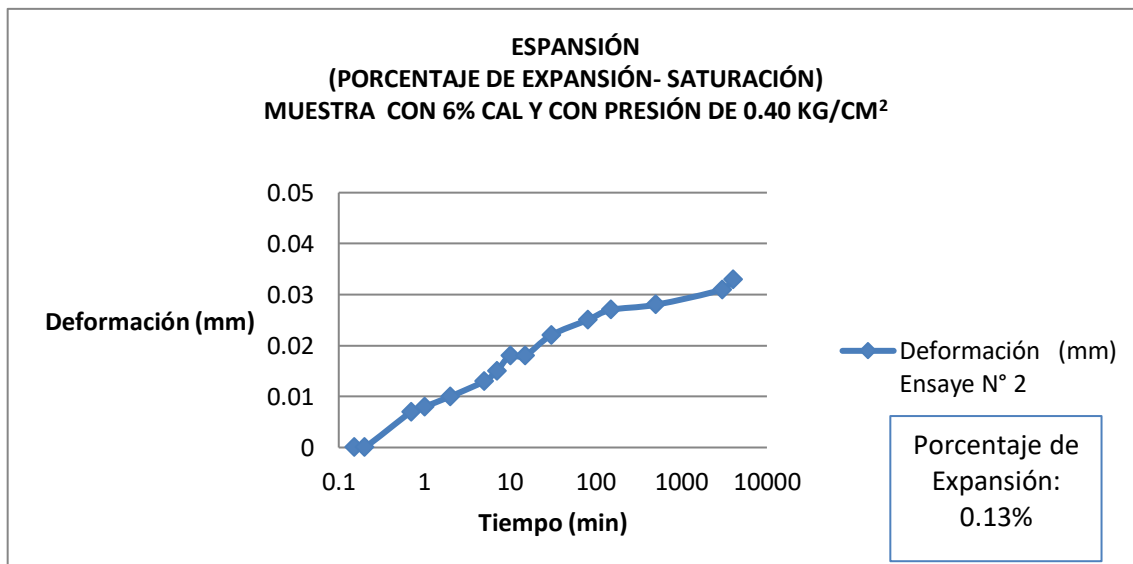
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.08         | 0.001                           |
| 0.15         | 0.002                           |
| 0.5          | 0.003                           |
| 1            | 0.005                           |
| 2            | 0.006                           |
| 5            | 0.01                            |
| 12           | 0.015                           |
| 15           | 0.017                           |
| 30           | 0.02                            |
| 70           | 0.02                            |
| 100          | 0.02                            |
| 400          | 0.02                            |
| 4000         | 0.02                            |
| 7000         | 0.021                           |
| 8000         | 0.022                           |
| 9500         | 0.022                           |



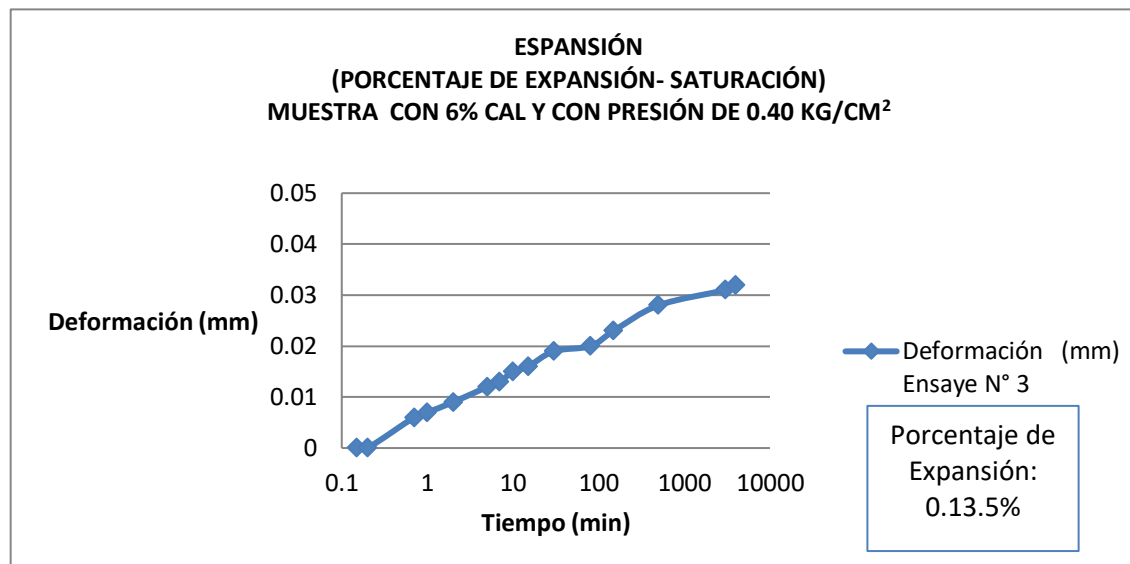
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.15         | 0                               |
| 0.2          | 0                               |
| 0.7          | 0.008                           |
| 1            | 0.009                           |
| 2            | 0.01                            |
| 5            | 0.014                           |
| 7            | 0.017                           |
| 10           | 0.018                           |
| 15           | 0.019                           |
| 30           | 0.022                           |
| 80           | 0.025                           |
| 150          | 0.03                            |
| 500          | 0.035                           |
| 3000         | 0.035                           |
| 4000         | 0.035                           |
| 5000         | 0.035                           |



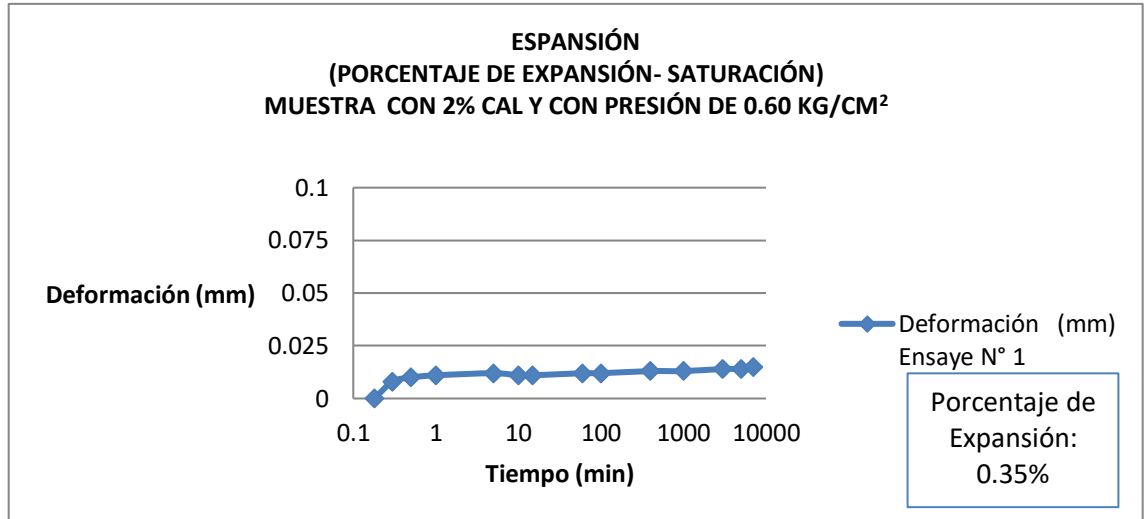
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.15         | 0                               |
| 0.2          | 0                               |
| 0.7          | 0.007                           |
| 1            | 0.008                           |
| 2            | 0.01                            |
| 5            | 0.013                           |
| 7            | 0.015                           |
| 10           | 0.018                           |
| 15           | 0.018                           |
| 30           | 0.022                           |
| 80           | 0.025                           |
| 150          | 0.027                           |
| 500          | 0.028                           |
| 3000         | 0.031                           |
| 4000         | 0.033                           |
| 5000         | 0.035                           |



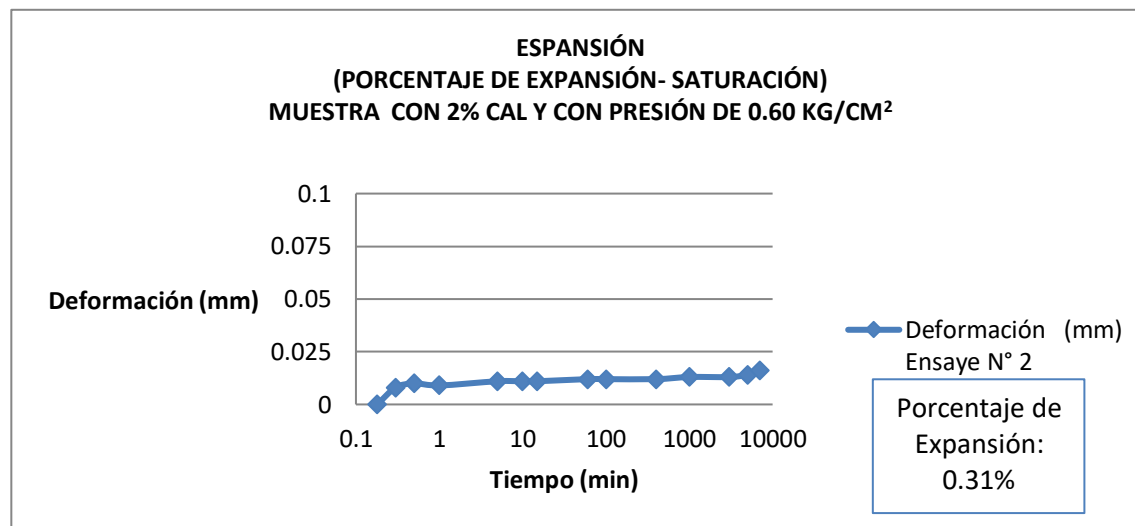
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.15         | 0                               |
| 0.2          | 0                               |
| 0.7          | 0.006                           |
| 1            | 0.007                           |
| 2            | 0.009                           |
| 5            | 0.012                           |
| 7            | 0.013                           |
| 10           | 0.015                           |
| 15           | 0.016                           |
| 30           | 0.019                           |
| 80           | 0.02                            |
| 150          | 0.023                           |
| 500          | 0.028                           |
| 3000         | 0.031                           |
| 4000         | 0.032                           |
| 5000         | 0.035                           |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.18         | 0                               |
| 0.3          | 0.008                           |
| 0.5          | 0.01                            |
| 1            | 0.011                           |
| 5            | 0.012                           |
| 10           | 0.011                           |
| 15           | 0.011                           |
| 60           | 0.012                           |
| 100          | 0.012                           |
| 400          | 0.013                           |
| 1000         | 0.013                           |
| 3000         | 0.014                           |
| 5000         | 0.014                           |
| 7000         | 0.015                           |
| 9000         | 0.015                           |

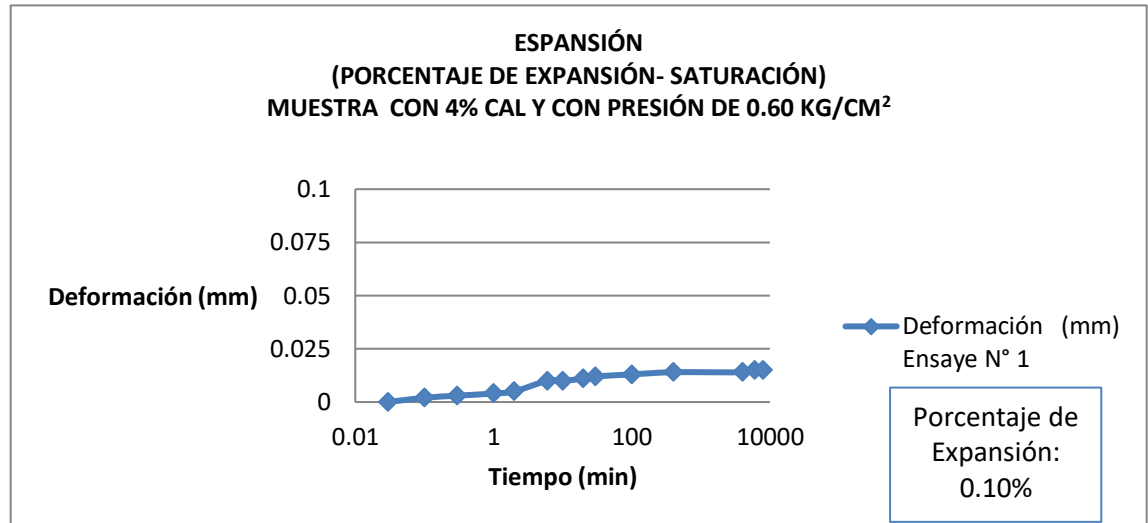


| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.18         | 0                               |
| 0.3          | 0.008                           |
| 0.5          | 0.01                            |
| 1            | 0.009                           |
| 5            | 0.011                           |
| 10           | 0.011                           |
| 15           | 0.011                           |
| 60           | 0.012                           |
| 100          | 0.012                           |
| 400          | 0.012                           |
| 1000         | 0.013                           |
| 3000         | 0.013                           |
| 5000         | 0.014                           |
| 7000         | 0.016                           |
| 9000         | 0.016                           |

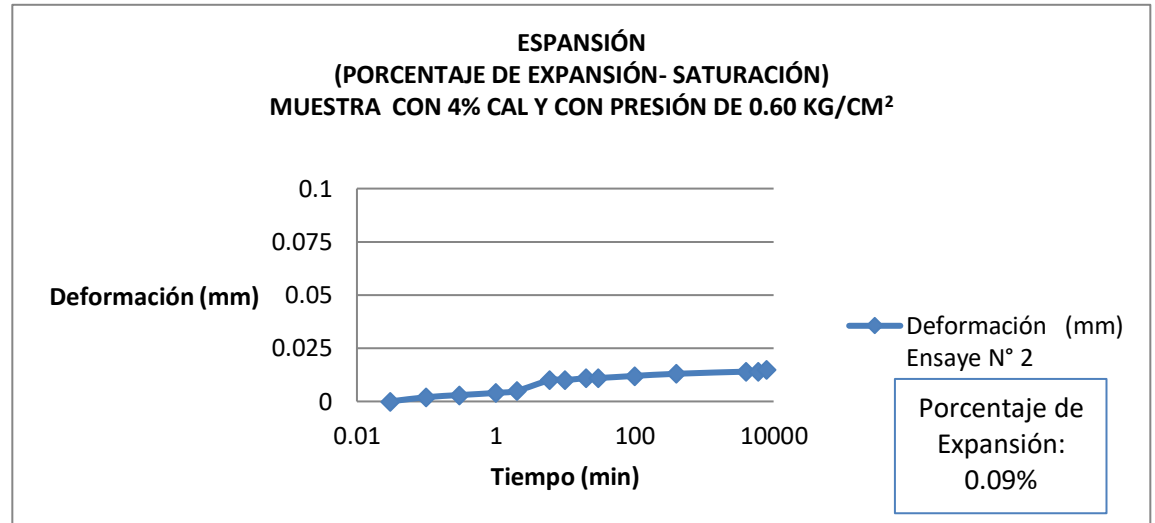




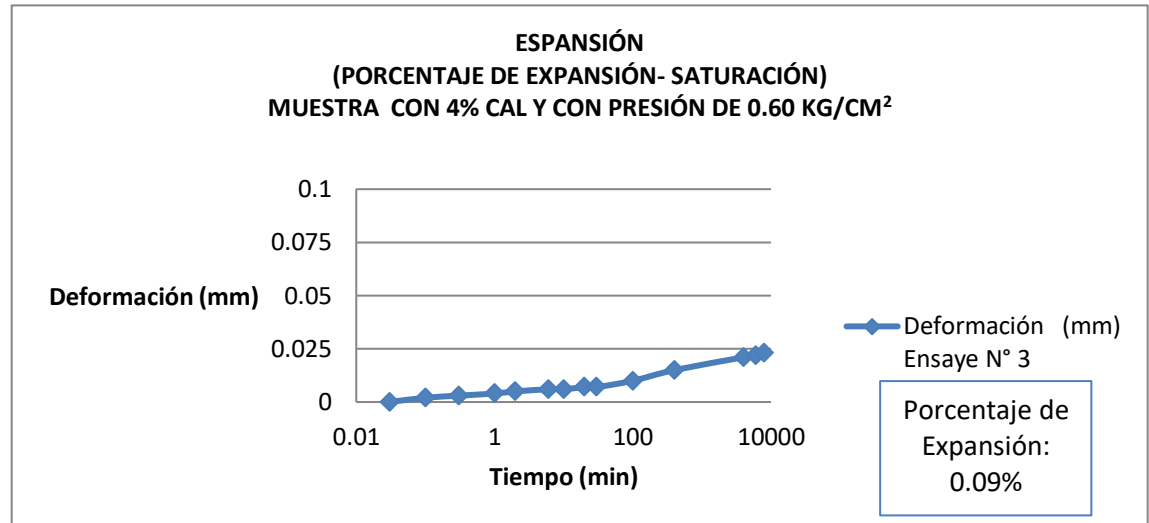
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 6            | 0.01                            |
| 10           | 0.01                            |
| 20           | 0.011                           |
| 30           | 0.012                           |
| 100          | 0.013                           |
| 400          | 0.014                           |
| 4000         | 0.014                           |
| 6000         | 0.015                           |
| 8000         | 0.015                           |



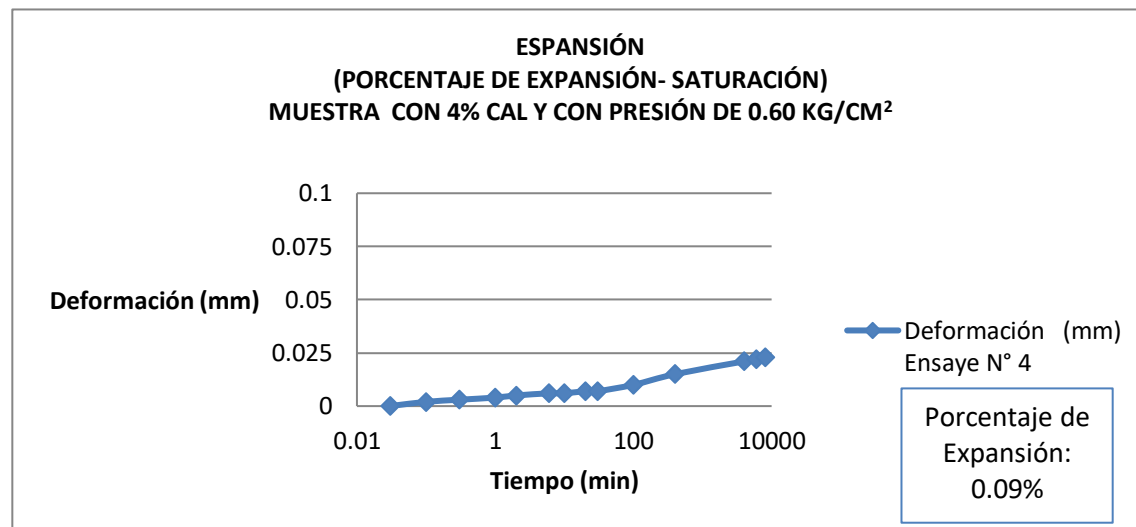
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 6            | 0.01                            |
| 10           | 0.01                            |
| 20           | 0.011                           |
| 30           | 0.011                           |
| 100          | 0.012                           |
| 400          | 0.013                           |
| 4000         | 0.014                           |
| 6000         | 0.014                           |
| 8000         | 0.015                           |



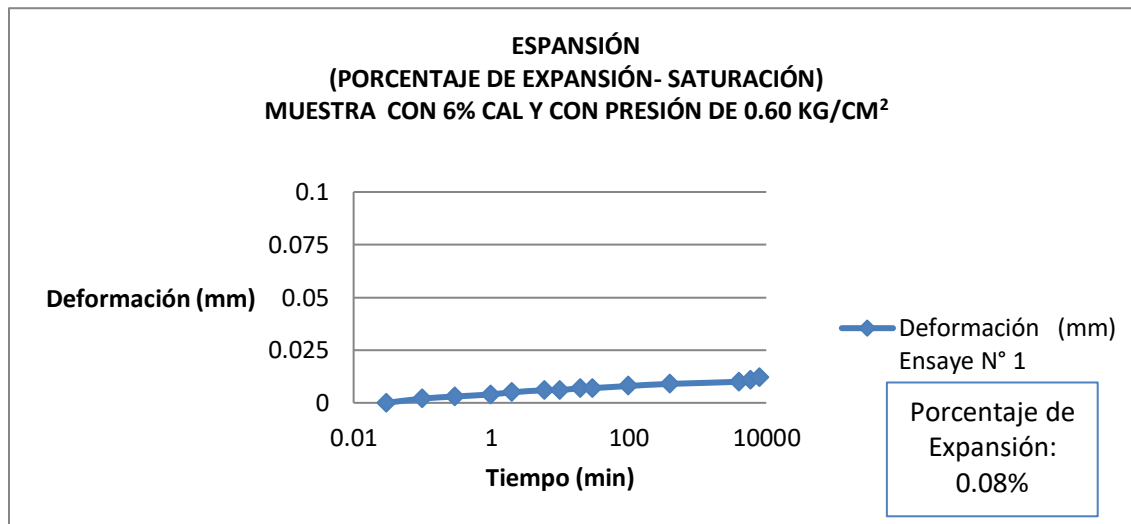
| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 3 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 6            | 0.006                           |
| 10           | 0.006                           |
| 20           | 0.007                           |
| 30           | 0.007                           |
| 100          | 0.01                            |
| 400          | 0.015                           |
| 4000         | 0.021                           |
| 6000         | 0.022                           |
| 8000         | 0.023                           |
| 9000         | 0.023                           |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensayo N° 4 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 6            | 0.006                           |
| 10           | 0.006                           |
| 20           | 0.007                           |
| 30           | 0.007                           |
| 100          | 0.01                            |
| 400          | 0.015                           |
| 4000         | 0.021                           |
| 6000         | 0.022                           |
| 8000         | 0.023                           |
| 9000         | 0.023                           |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 1 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 6            | 0.006                           |
| 10           | 0.006                           |
| 20           | 0.007                           |
| 30           | 0.007                           |
| 100          | 0.008                           |
| 400          | 0.009                           |
| 4000         | 0.01                            |
| 6000         | 0.011                           |
| 8000         | 0.012                           |
| 9000         | 0.023                           |



| Tiempo (min) | Deformación (mm)<br>Ensaye N° 2 |
|--------------|---------------------------------|
| 0.03         | 0                               |
| 0.1          | 0.002                           |
| 0.3          | 0.003                           |
| 1            | 0.004                           |
| 2            | 0.005                           |
| 7            | 0.006                           |
| 10           | 0.006                           |
| 30           | 0.007                           |
| 40           | 0.007                           |
| 100          | 0.008                           |
| 500          | 0.009                           |
| 4000         | 0.01                            |
| 7000         | 0.011                           |
| 8000         | 0.012                           |
| 95000        | 0.023                           |

