



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Geotecnia)

COLUMNAS DE CAL PARA REDUCIR LA EXPANSIÓN EN ARCILLAS

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Andrea Berenice Medina Ramírez

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara
Presidente

Dr. Eduardo Rojas González
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Suplente



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas

por

Andrea Berenice Medina Ramírez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-309289

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

“Lo que es digno de hacerse, es digno de que se haga bien”

Conde de Chesterfield

*A mi mamá,
mi mayor ejemplo de fortaleza.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Berenice y Arturo, que siempre me apoyaron para obtener esta meta.

A mis hermanos Arturo y Mariana, a mi cuñada y comadre Montse que siempre me dieron ánimos.

A mis amigos Mateo, Erika, Chío, Lom, Diego, María, Yvette, Albert, Mariel, Alma, Paquito, a mis compadres Lili, Luis que siempre me brindaron su apoyo y su cariño.

A mi compañero de posgrado, Rafa que siempre me ayudo en todo.

A mis compañeros de posgrados Miriam, Emmanuel, Juanse, César, Ricardo, Adair, Adhareli, Marisol, Itzel, por esos buenos momentos y su apoyo.

A mi asesora Dra. Teresa López, por brindarme la ayuda, tiempo y tenerme la confianza de poder desarrollar este proyecto.

Finalmente, agradezco a CONACyT por el apoyo para poder obtener mi posgrado.

RESUMEN

Los suelos expansivos son considerados como suelos problemáticos en diferentes partes del mundo. Estos cambios se deben a la entrada y salida de agua que se genera por el cambio de estaciones o por cambios con el nivel de aguas freáticas. Estos cambios pueden generar problemas a las estructuras que se encuentran sobre ellos, sobre todo a las estructuras ligeras, por lo cual es importante conocer las propiedades del suelo en el que se piensa construir. En este documento se presenta un método a nivel laboratorio, con posibilidad de extenderlo a campo, para reducir la expansión del suelo de una manera sustentable, rápida y económica. Este procedimiento se desarrolló para evitar modificar la estructura del suelo, el cual se basa en la introducción de columnas de cal en él. Se realizaron varios ensayos con el fin de poder encontrar la solución más óptima el cual nos daría una metodología bastante viable en la reducción de expansión del suelo para construcciones ligeras. Los resultados que se obtuvieron nos muestran que es posible reducir la expansión del suelo hasta en un 60% colocando columnas de cal. Los mejores resultados se lograron colocando 1 y 3 columnas con porcentajes del 2% al 6% de cal, lo cual redujo la expansión de un 12.55% hasta un 5.08%.

(Palabras clave: Suelo expansivo, arcilla, columnas, cal)

SUMMARY

Expansive soils are considered problematic soils in different parts of the world. These changes are due to the entry and exit of water that is generated by the change of seasons or by changes in the level of groundwater. These changes can cause problems for the structures above them, especially for light structures, which is why it is important to know the properties of the soil on which you plan to build. This document presents a method at the laboratory level, with the possibility of extending it to the field, to reduce soil expansion in a sustainable, fast and economical way. This procedure was developed to avoid modifying the structure of the soil, which is based on the introduction of columns of lime into it. Several tests were carried out in order to find the most optimal solution which would give us a very viable methodology in reducing soil expansion for light constructions. The results obtained show us that it is possible to reduce soil expansion by up to 60% by placing lime columns. The best results were achieved by placing 1 and 3 columns with percentages of 2% to 6% of lime, which reduced the expansion from 12.55% to 5.08%.

(Keywords: Expansive soil, clay, columns, lime)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	2
2.1. Problemas asociados con los suelos expansivos	2
2.2. Zona activa.....	3
2.3. Factores que influyen en la expansión del suelo	4
2.4. Daños generados.....	5
2.5. Prevención.....	7
2.6. Soluciones más comunes para suelos expansivos.	8
3. ANTECEDENTES	15
4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
4.1. Suelo Expansivo.....	21
4.2. Ubicación de los suelos expansivos	21
4.3. Arcillas	23
4.4. Tipos de minerales en las arcillas	24
4.5. Composición de las arcillas expansivas	25
4.6. Identificación y clasificación de arcillas expansivas	26
4.6.1. Identificación en campo	26
4.6.2. Caracterización Mineralógica	27
4.6.3. Métodos directos.....	28
4.7. Ensayo para determinar la expansión libre y presión de expansión (ASTM D-4546)	34
4.7.1. Opción A.....	34
4.7.2. Opción B.....	35
4.7.3. Opción C.....	36
4.8. Equipos Utilizados para medir presión de expansión	37
4.8.1. Edómetro.....	37
4.8.2. Aparato de Lambe.....	38
4.8.3. Equipo de Komine Y Ogata (1994).....	39
4.9. Pruebas de expansión en pruebas remoldeadas	40
4.10. Expansión y presión de carga lateral	40
4.11. Cal	42

4.12.	Tipos de cal	43
4.13.	Estabilización con Cal	44
4.13.1.	Ventajas del tratamiento con cal.....	45
5.	HIPÓTESIS	46
6.	OBJETIVOS.....	46
6.1.	Objetivo General.....	46
6.2.	Objetivos específicos	46
7.	METODOLOGÍA	47
7.1.	Obtención de parámetros del suelo.....	47
7.1.1.	Obtención de muestras	47
7.1.2.	Caracterización Geotécnica	48
7.1.3.	Prueba de expansión y resistencia sin inclusiones	52
7.1.4.	Resumen del parámetro del suelo.....	55
7.2.	Modelo del suelo con material.....	56
7.2.1.	Propuesta y pruebas del material para colocar en cada columna.....	56
7.2.2.	Propuesta de dimensión y número de columnas.....	56
7.2.3.	Selección de dosificaciones y número de columnas.....	56
7.3.	Análisis experimental	56
7.3.1.	Preparación de especímenes.....	56
7.3.2.	Pruebas de expansión con columnas de cal.....	57
7.3.3.	Comportamiento Expansión-Volumen	57
7.3.4.	Medición de Resistencia con columnas de cal.....	57
8.	RESULTADOS	58
8.1.	Obtención de parámetros del suelo.....	58
8.1.1.	Obtención de Muestras	58
8.1.2.	Caracterización Geotécnica	58
8.1.3.	Prueba de expansión y resistencia sin inclusiones	67
8.1.4.	Resumen de las propiedades medidas en el suelo	71
8.2.	Modelo del suelo con material.....	72
8.2.1.	Propuesta y pruebas del material para colocar en cada columna.....	72
8.2.2.	Propuesta de dimensión y número de columnas.....	73
8.2.3.	Selección de dosificaciones y número de columnas.....	75

8.3.	Análisis experimental	77
8.3.1.	Preparación de especímenes.....	77
8.3.2.	Pruebas de expansión con columnas de cal.....	84
8.3.3.	Comportamiento Expansión-Volumen	86
8.3.4.	Medición de Resistencia con columnas de cal.....	93
8.4.	Análisis post-investigación	94
8.4.1.	Resultados de expansión con 8% de cal.....	94
8.4.2.	Extrapolación a campo.....	96
8.4.3.	Comparativa de precios con otros sistemas.....	101
8.4.4.	Reducción de expansión por secado de muestras.....	105
9.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	108
10.	CONCLUSIONES	109
11.	REFERENCIAS	111
12.	ANEXOS	118
12.1.	Caracterización geotécnica.....	118
12.2.	Pruebas sin inclusiones.....	121
12.3.	Pruebas con inclusiones.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Definición de la zona activa (Das B. M., Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, 2012).....	3
Figura 2. Pandeo de pavimentos (Kalantri, 2012).....	5
Figura 3. Daños a estructuras ligeras (Kalantri, 2012).....	6
Figura 4. Daños provocados por asentamientos diferenciales (Kalantri, 2012).....	6
Figura 5. Cimentación mediante pilotes (López-Lara and Romero-Zepeda, 2006)..	9
Figura 6. Cimentación mediante losa nervada.....	10
Figura 7. Reducción de expansión con las diferentes mezclas (Seco, 2011).....	16
Figura 8. Diferencia de expansión entre el suelo sin tratar y con el uso de las estructuras huecas invertidas (López-Lara, 2014).....	16
Figura 9. Clasificación del suelo natural y modificado con cal dentro de la carta de plasticidad (Uribe, 2019).....	17
Figura 10. Tendencias de expansión abatida contra volumen extraído en todas las combinaciones realizadas (Morales, 2019).....	18
Figura 11. Variación del porcentaje de expansión con diferentes agentes estabilizadores (Salinas y Villao, 2019).....	19
Figura 12. Variación del porcentaje de expansión con la colocación de arena (Bahia and Ramdane, 2012).....	20
Figura 13. Ubicación de suelos expansivos en el mundo (Modificado de G.W. Donaldson, 1969).....	22
Figura 14. Zonas con suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda y Castañeda, 1987).....	22

Figura 15. Perfil estratigráfico de un suelo arcilloso expansivo de Jurica, Querétaro (López-Lara, 1996).....	23
Figura 16. Elementos de una partícula de arcilla expansiva.....	25
Figura 17. Contracción y expansión de una arcilla.....	26
Figura 18. Límites de Atterberg (Braja M. Das, 2001).....	29
Figura 19. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. (Oswaldo, 2006).....	31
Figura 20. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. (Oswaldo, 2006).....	32
Figura 21. Relación de cambio de volumen con IP. (Chen, 2012).....	33
Figura 22. Deformación vs esfuerzo vertical, Método A (López-Lara,2008).....	35
Figura 23. Deformación vs esfuerzo vertical, Método B (López-Lara,2008).....	36
Figura 24. Deformación vs esfuerzo vertical, Método C (López-Lara,2008).....	37
Figura 25. Representación esquemática de un edómetro (Villar, 2001).....	38
Figura 26. Representación esquemática del Aparato de Lambe (Marcial & Landaeta, 2008).....	39
Figura 27. Representación esquemática del Equipo de Komine y Ogata (1994)....	40
Figura 28. Variación de presión de expansión con diferentes densidades secas (Marcial & Landaeta, 2008).....	42
Figura 29. Tipos de cal.....	43
Figura 30. Esquema de la metodología del proyecto.....	47
Figura 31. Ubicación de Querétaro, México.....	48
Figura 32. Distribución de tamaños del Suelo.....	51

Figura 33. Montaje de la probeta en el consolidómetro (Morales, 2019).....	54
Figura 34. Ubicación de las perforaciones. A) 2%, B) 4% y C) 6%.....	57
Figura 35. Ubicación del Muestreo (Google Earth).....	58
Figura 36. Obtención del Límite Líquido.....	60
Figura 37. Obtención del Límite Plástico.....	61
Figura 38. Obtención de Contracción Lineal.....	62
Figura 39. Clasificación del Suelo.....	63
Figura 40. Curva granulométrica.....	64
Figura 41. Prueba de Azul de Metileno.....	66
Figura 42. Expansión libre en muestras sin inclusiones.....	67
Figura 43. Presión de expansión en muestra Inalterada.....	68
Figura 44. Presión de expansión en muestra Remoldeada.....	69
Figura 45. Muestra de suelo para prueba de corte directo.....	70
Figura 46. Prueba de corte directo.....	70
Figura 47. Resistencia sin inclusiones.....	71
Figura 48. Expansión libre en muestras sin inclusiones.....	73
Figura 49. Ubicación de las perforaciones. A) 2%, B) 4% y C) 6% de cal.....	76
Figura 50. Ubicación de las perforaciones con 2%, 4% y 6% de cal para una columna	76
Figura 51. Ubicación de las perforaciones 2%, 4% y 6% de cal para dos columnas	76
Figura 52. Ubicación de las perforaciones 2%, 4% y 6% de cal para tres columnas	77

Figura 53. Colocación de material para hacer la pastilla.....	78
Figura 54. Compactación del material para crear la pastilla.....	78
Figura 55. Ubicación de la broca para hacer la columna.....	79
Figura 56. Perforación de pastilla.....	79
Figura 57. Hueco para colocar la cal.....	80
Figura 58. Preparación de especímenes.....	81
Figura 59. Colocación de Embudo.....	81
Figura 60. Columna de Cal.....	82
Figura 61. Colocación de papel filtro.....	82
Figura 62. Colocación de papel filtro.....	83
Figura 63. Colocación de molde en consolidómetro.....	83
Figura 64. Prueba con 1 perforación (2% cal).....	84
Figura 65. Prueba con 2 perforaciones (4% cal).....	85
Figura 66. Prueba con 3 perforaciones (6% cal).....	85
Figura 67. Resultados de expansión libre con muestra remoldeada sin inclusiones y muestras con columnas de cal.....	86
Figura 68. Área donde intervenía la cal	87
Figura 69. Porcentaje reducido dependiendo del número de columnas.....	88
Figura 70. Porcentaje de expansión con 1 columna con porcentajes de cal del 2%, 4% y 6%.....	89
Figura 71. Área donde intervenía la cal.....	89
Figura 72. Porcentaje de expansión con 2 columnas con porcentajes de 2%, 4% y 6% de cal.....	90

Figura 73. Área donde intervenía la cal	91
Figura 74. Porcentaje de expansión reducido dependiendo el número de columnas	91
Figura 75. Contorno donde la cal no controla la humedad.....	92
Figura 76. Interacción de la cal con el suelo.....	93
Figura 77. Resistencia con columnas de cal.....	94
Figura 78. Arreglo de 4 columnas (8% de cal).....	95
Figura 79. Resultado de la expansión del suelo natural vs con la muestra con 8 columnas (8% cal).....	95
Figura 80. Arreglo de columnas de cal en el terreno.....	98
Figura 81. Arreglo de columnas de cal en el terreno con base al análisis de Meza Tapia (2018).....	100
Figura 82. Comportamiento de la cal al secarse.....	106
Figura 83. Muestra posterior al secado.....	107
Figura 84. Resultados de expansión posterior al secado.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de daños estructurales (Boscardin and Cording 1989).....	7
Tabla 2. Comparación de soluciones más comunes para suelos expansivos.....	13
Tabla 3. Mezclas con diferentes porcentajes de subproductos y desechos (Seco, 2011)	15
Tabla 4. Propiedades índice del suelo natural y el suelo con Cal (Uribe, 2019).....	17
Tabla 5. Minerales más comunes en las arcillas.....	24
Tabla 6. Método de Holtz y Gibbs en función del índice de plasticidad (Das. B., 2012)	30
Tabla 7. Método de Seed Woodward y Lundgren (Jiménez Salas, 1980).....	30
Tabla 8. Método de Raman 1967(Das B., 2012).....	32
Tabla 9. Método de Chen 1987(Das B., 2012).....	32
Tabla 10. Relación entre PVC y peligro de expansión (Chen, 2012).....	41
Tabla 11. Parámetros de los materiales utilizados (Marcial & Landaeta, 2008).....	41
Tabla 12. Porcentajes de cal dependiendo el tipo de estabilización (Fontalvo, Medrano y Nadad, 2006).....	44
Tabla 13. Mineral predominante respecto a su área.....	52
Tabla 14. Resultado de Límite Líquido.....	59
Tabla 15. Resultado de Límite Plástico.....	60
Tabla 16. Resultado de Índice de Plasticidad.....	61
Tabla 17. Resultado de Contracción Lineal.....	62
Tabla 18. Resultado del Hidrómetro.....	64
Tabla 19. Resultado de Peso específico.....	65

Tabla 20. Resultado de Azul de Metileno.....	65
Tabla 21. Resultado de Peso Específico relativo de los sólidos.....	66
Tabla 22. Resultado de Expansión libre.....	67
Tabla 23. Propiedades del suelo.....	72
Tabla 24. Contracción lineal.....	73
Tabla 25. Áreas de columnas.....	74
Tabla 26. Dimensiones de brocas.....	75
Tabla 27. Resultados de expansión libre con 1.0 ton/m ²	86
Tabla 28. Resultados de expansión libre con 1 columna.....	89
Tabla 29. Resultados de expansión libre con 2 columnas.....	90
Tabla 30. Resultados de humedad.....	93
Tabla 31. Resultados de expansión libre con 4 columnas (8% cal).....	96
Tabla 32. Factores de extrapolación.....	97
Tabla 33. Resultados de extrapolación.....	97
Tabla 34. Tabla comparativa de resultados obtenidos en campo vs laboratorio (Meza Tapia 2018).....	99
Tabla 35. Resultados de la investigación de Meza Tapia (2018).....	99
Tabla 36. Resultados de extrapolación basados en la investigación de Meza Tapia (2018)	100
Tabla 37. Sustitución con excavadora 320.....	101
Tabla 38. Sustitución con retroexcavadora.....	101
Tabla 39. Mejoramiento con cal.....	102

Tabla 40. Mejoramiento con columnas de cal con retroexcavadora (opción 1)....	102
Tabla 41. Mejoramiento con columnas de cal con mini excavadora (opción 1)....	103
Tabla 42. Mejoramiento con columnas de cal con retroexcavadora (opción 2)....	103
Tabla 43. Mejoramiento con columnas de cal con mini excavadora (opción 2)....	104
Tabla 44. Resumen de costos en diferentes métodos.....	105
Tabla 45. Resultados de la expansión posteriores al secado.....	107
Tabla 46. Humedad natural.....	118
Tabla 47. Pruebas de caracterización 1.....	118
Tabla 48. Pruebas de caracterización.....	118
Tabla 49. Límite Líquido.....	118
Tabla 50. Límite Plástico.....	119
Tabla 51. Índice de plasticidad.....	119
Tabla 52. Contracción Lineal.....	119
Tabla 53. Contracción Volumétrica.....	119
Tabla 54. Peso específico relativo de los sólidos.....	119
Tabla 55. Prueba del Hidrómetro.....	120
Tabla 56. Prueba de Azul de metileno.....	120
Tabla 57. Prueba de contracción Lineal con diferentes porcentajes de cal.....	120
Tabla 58. Expansión Natural remoldeada.....	121
Tabla 59. Expansión Natural inalterada.....	122
Tabla 60. Presión de expansión remoldeada.....	123
Tabla 61. Presión de expansión inalterada.....	124

Tabla 62. Expansión con una columna (2% cal).....	125
Tabla 63. Expansión con dos columnas (4% cal).....	126
Tabla 64. Expansión con tres columnas (6% cal).....	127
Tabla 65. Humedad del suelo con columnas de cal.....	127
Tabla 66. Expansión con una columna (4% cal).....	128
Tabla 67. Expansión con una columna (6% cal).....	129
Tabla 68. Expansión con dos columnas (2% cal).....	130
Tabla 69. Expansión con dos columnas (6% cal).....	131
Tabla 70. Expansión con cuatro columnas (8% cal).....	132
Tabla 71. Expansión después de secado 1 con una columna (2% cal).....	133
Tabla 72. Expansión después de secado 2 con una columna (2% cal).....	134

1. INTRODUCCIÓN

Todas las obras se apoyan en diferentes tipos de suelos, el conocimiento que se tenga de estos es de suma importancia, esto con fin de saber el comportamiento a futuro que tendrá, después y durante del proceso de construcción y con esto evitar cualquier imprevisto o daño a la estructura.

Los suelos expansivos suelen ser muy problemáticos, han representado desde mucho tiempo dificultades para la rama de la construcción, esto debido a que ocasionan varios daños y estos a su vez generan demasiados costos (Torres García, 2018).

En México, se tiene un 8.6% de la superficie con suelo expansivo, a nivel mundial se tiene aproximadamente 335 millones de hectáreas (SEMARNAT, 2013)

Las arcillas expansivas suelen sufrir cambios de volumen, esto debido a los cambios de humedad, esto es que cambia su volumen con el agua que entre o salga del suelo. Cualquier construcción ligera construida en este tipo de suelos experimentará deformaciones provocadas por la expansión que genera la arcilla, estos movimientos se traducen en grietas sobre los muros y levantamiento de pisos (López-Lara et al., 2010).

Esta investigación propone un método viable para evitar el daño a las estructuras ligeras (casa-habitación), se basa en la colocación de columnas de cal en el suelo con el fin de poder reducir significativamente la expansión del mismo, se pretende reducir la expansión del suelo de una manera más económica y rápida, así mismo, se busca que este método sea sustentable, al colocarle las columnas de cal, y que estas puedan controlar la humedad sin tener que modificar la estructura del suelo, mismo que generalmente se deshecha o altera a gran escala.

2. JUSTIFICACIÓN

Los suelos expansivos suelen dañar distintos tipos de estructuras que se encuentran en ellos, esto es por la falta de prevención al construir, se tiene siempre que considerar un estudio previo, y con este poder definir las propiedades que tiene el suelo.

La expansión del suelo hoy en día se puede entender de diversas formas, pero todavía no se comprende completamente este fenómeno, que, aunque no suele ser un riesgo de vida tan grande como los desastres naturales, si tiende a generar grandes costos (Jones & Jones, 1987). Por lo tanto, es muy importante conocer y caracterizar este tipo de suelos con procedimientos específicos, y con esto poder determinar a expansión y buscar la mejor alternativa tanto económica como viable para poder estabilizarlo.

Un suelo expansivo es aquel que tiene cambios de volumen, esto se genera por la entrada y salida de agua en él. La causa de estos cambios va de la mano con las características físico-químicas del suelo, la principal causa es por la mineralogía que se tiene en el mismo, en este caso se le atribuye a la montmorillonita (Quintero Lemus, 2015), esta expansión se atribuye a un incremento o disminución de la tensión capilar.

Hoy en día ya se tienen varios métodos para solucionar este cambio de volumen, sin embargo, los costos siguen representando una gran suma, en algunos casos va del 21% al 25% del costo inicial de una vivienda (Cabrera-Ramírez & Delgado-Hernández, 2010).

2.1. Problemas asociados con los suelos expansivos

Los suelos expansivos son suelos de naturaleza arcillosa (en la mayoría de los casos), estos son capaces de experimentar tanto expansión como contracción cuando se tiene un cambio de humedad. Estos cambios de volumen pueden ocasionar que las estructuras tengan movimientos para las cuales no están

diseñadas, sobre todo en las cimentaciones, con estos se pueden generar daños importantes, desplomes parciales o totales, giros en la edificación, etc.

2.2. Zona activa

En una obra de ingeniería civil es indispensable el conocimiento de la zona activa, resulta sencillo identificar este tipo de suelos en campo, pues en tiempo de secas se pueden observar las grietas provocadas por la desecación. Normalmente estos cambios se encuentran de manera superficial en los primeros metros de la superficie, ya que a mayor profundidad los cambios de humedad son más estables y evitan la expansión o contracción del suelo.

Es muy importante identificar la profundidad donde la humedad es constante, como también tomar en cuenta el ascenso y descenso del Nivel de Aguas Freáticas (NAF), sobre todo si este se presenta en la superficie o a poca profundidad.

En pocas palabras la zona activa es zona del suelo responsable al levantamiento debido a la expansión que tiene el suelo.

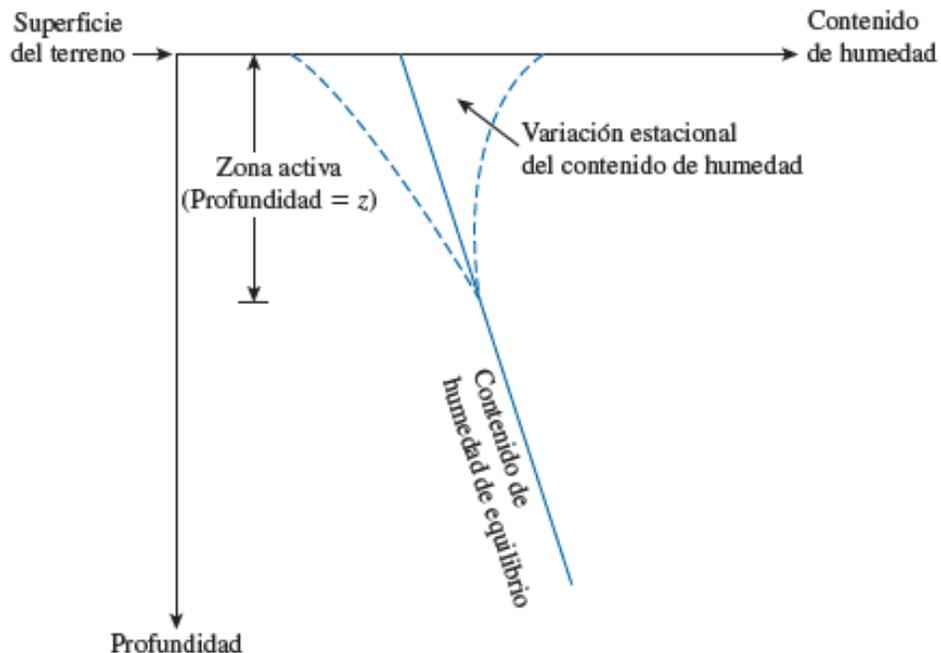


Figura 1. Definición de la zona activa (Das B. M., *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*, 2012).

2.3. Factores que influyen en la expansión del suelo

- **Tipos de materiales y cantidad.** Lo primero que se debe hacer es tomar una muestra de suelo y determinar la cantidad de partículas del material arcilloso de las cuales se compone, es decir, se debe definir el mineral predominante (Caolinita, Illita o Montmorillonita). También un factor importante es el tamaño de las partículas, por lo general se conoce que las partículas de minerales arcillosos son menores a 2 micras (0.002 mm), esto nos dice que mientras la partícula se más pequeña que esta medida, existe una mayor posibilidad que esta contenga minerales arcillosos, y por consecuencia este sea un suelo expansivo.
- **Densidad seca.** Cuan el valor de la densidad seca aumenta y la humedad inicial es la menor posible, el suelo está expuesto al cambio de volumen, esto porque si la humedad va incrementando progresivamente, su grado de saturación también lo hace, por lo tanto, esta expansión será mayor en un suelo poco saturado (Morales, 2015).
- **Grado de preconsolidación.** La consolidación del suelo se entiende como la expulsión de aire y agua que están en los poros, esta expulsión es causada por cargas aplicadas en el suelo, estos esfuerzos son producidos por peso propio o peso de la estructura que se coloca sobre él. Los suelos arcillosos son los que generalmente pueden presentar asentamientos debido a la consolidación.
- **Succión.** Cuando se presenta la succión en un determinado suelo, este cambiará de volumen, y esto está ligado al fenómeno de expansión, se conoce que la succión es un proceso capaz de absorber agua, y mientras la presión de absorción sea mayor, existirá mayor succión (Morales, 2015).
- **Tiempo y permeabilidad.** La permeabilidad de las arcillas generalmente es baja. Hay arcillas con mejores propiedades de permeabilidad y esto puede generar mayor expansión que arcillas con mayor permeabilidad, esto se basa respecto al tiempo y contacto que se tenga con el agua (Morales, 2015).

- **Humedad.** Este es uno de los valores más importantes para que un suelo sea expansivo y los principales problemas que genera el cambio de volumen son: Cambios climáticos, rotura de tuberías y elevación de nivel freático.

2.4. Daños generados.

Debido a los grandes cambios de volumen que sufre el suelo expansivo, la estructura tiende a tener diversos grados de daños, esto dependerá de que tan expansivo sea el suelo. Dentro de los problemas más comunes se encuentran (Kalantri, 2012):

- Pandeo de pavimentos (figura 2).
- Agrietamiento en losas de cimentación (figura 3).
- Asentamientos diferenciales, daños en muros (deformaciones tipo curva) (figura 4).
- Asentamiento diferencial y agrietamientos en tuberías que estén subterráneas.
- Agrietamiento en muros.

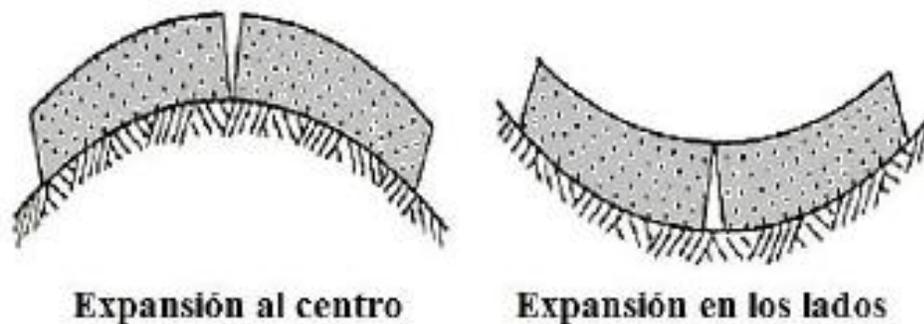


Figura 2. Pandeo de pavimentos (Kalantri, 2012).

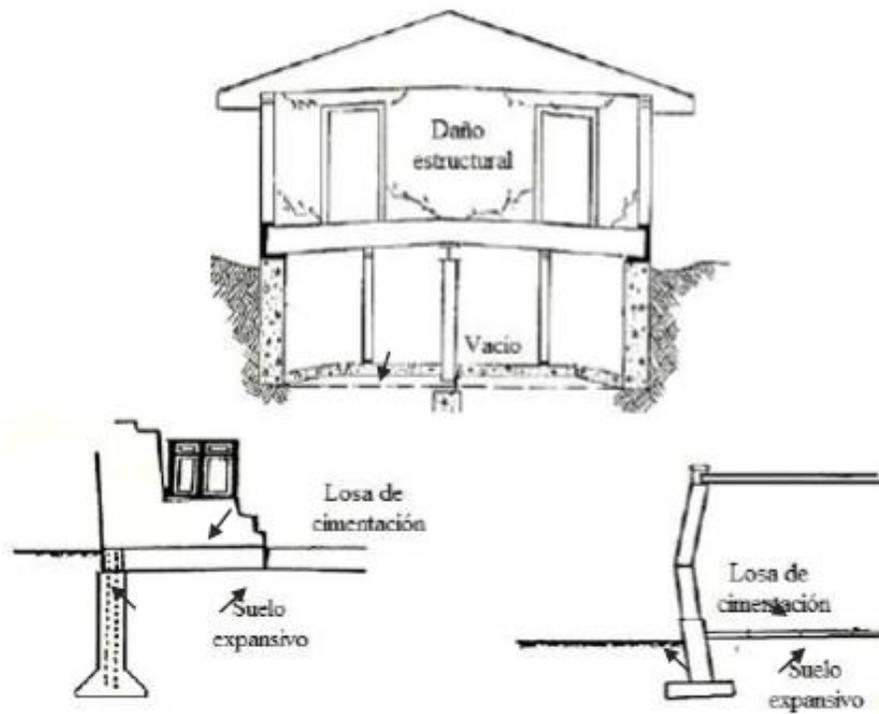


Figura 3. Daños a estructuras ligeras (Kalantri, 2012).

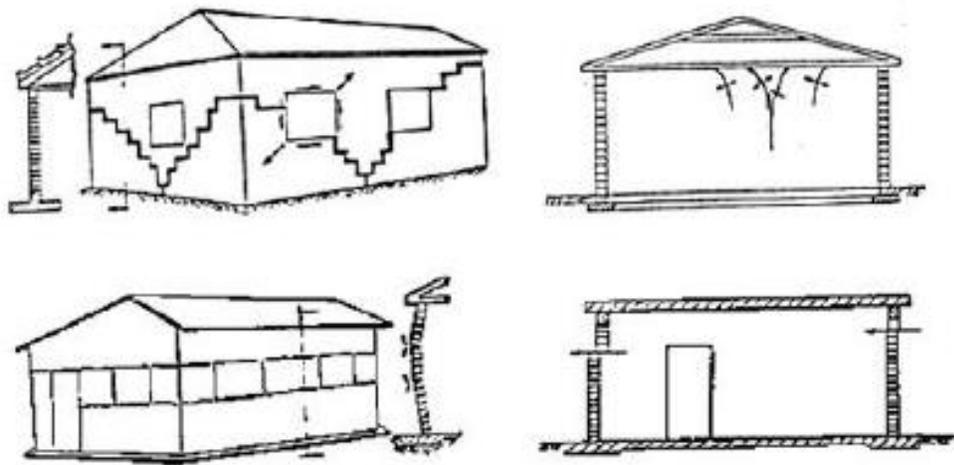


Figura 4. Daños provocados por asentamientos diferenciales (Kalantri, 2012).

Se propone un sistema de clasificación y evaluación de daños por Boscardin and Cording (1989), esto es basado en la dificultad de reparación de los mismos, estese muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de daños estructurales (Boscardin and Cording 1989)

Tipo de daño	Descripción del daño	Ancho de grieta (mm)
DESPECIABLE	Grietas pequeñas o muy finas.	<0.1
MUY LEVE	Grietas pequeñas que se reparan fácilmente.	<1
LEVE	Grietas rellenables con facilidad.	<5
MODERADO	Grietas con remiendo más delicado.	5-15 o varias grietas >3
SEVERO	Reparación mayor que puede involucrar remoción y/o reemplazo de secciones del muro.	15-25
MUY SEVERO	Se necesitan reparaciones mayores, en algunos casos reconstrucción parcial o completa de las áreas dañadas.	>25

Murthy (2002) especifica tres métodos generales preventivos para evitar daños en las estructuras donde se encuentra suelos expansivos:

- 1) Aislar la estructura del suelo expansivo.
- 2) Usar estructuras rígidas para que se puedan mantener en buen estado a pesar del cambio de volumen en el suelo.
- 3) Eliminar o reducir la expansión que tiene el suelo.

Cada uno de estos métodos puede tener una o varias técnicas, estas dependerán del potencial de expansión del suelo.

2.5. Prevención.

Para poder evitar los daños descritos anteriormente es necesario tomar precauciones y recomendaciones tanto en proyecto como en construcción, algunas se describen a continuación:

- **Profundidad de apoyo.** Se debe considerar una cimentación adecuada dependiendo el nivel de severidad de expansión que tenga el sitio, hoy en día existen varios métodos o cimentaciones para poder evitar daño a la estructura, por lo general este tipo de apoyos van a por debajo de 3.0 a 3.5 m, ya que a esa profundidad la humedad es más estable y ya no se generan cambios de volumen considerables.
- **Cargas.** Las cargas que se le apliquen al suelo deben poder contrarrestar la presión de expansión que genera, normalmente en las estructuras ligeras es donde se ven la mayoría de los daños, ya que esas no generan la suficiente carga para oponerse a la expansión del suelo.
- **Sistema de cimentación.** No todas las cimentaciones son aptas para este tipo de suelos, se tiene que hacer un estudio previo para poder medir la expansión que tiene el suelo, basado en ese parámetro se tiene que considerar la cimentación y esta dependerá tanto de la parte económica como el lugar donde esté ubicado el predio.
- **Condiciones subterráneas.** Deben tomarse en cuenta todas las tuberías, saneamientos y canalizaciones para evitar roturas posteriores, en estas se deben considerar ciertos parámetros como:
 - Las juntas, codos o conexiones de la tubería deben de ser flexibles.
 - Se debe colocar un encofrado o cama de grava para evitar que este en contacto con el suelo y pueda romperse.
- **En ejecución del proyecto.** Se deberá evitar que el suelo donde se desplanta la estructura tenga una exposición prolongada al cambio climático, debe hacerse la excavación y cubrirse lo más pronto posible.

2.6. Soluciones más comunes para suelos expansivos.

Se debe tener cuidado al elegir el tipo de cimentación en un suelo expansivo, esta debe analizarse de una manera muy minuciosa y deberá de depender de las características del suelo donde se pretende construir.

1) Aislamiento de la estructura.

Dentro de estas metodologías de construcción se encuentran varias técnicas de cimentación:

Pilas o pilotes. Estas generalmente tienen profundidades mayores a 3 metros, esta debe de tener una losa suspendida (espacio entre el suelo expansivo y losa) con el fin de que el movimiento del suelo sea totalmente independiente y no genere daños (figura 5). Esta cimentación es una de las más seguras y se recomienda donde el cambio de volumen es bastante considerable. Se emplea normalmente en edificios de varios niveles donde su costo es absorbido por la magnitud de la obra, ya que suele ser un sistema no tan económico, pero esta se compensa por la seguridad que proporciona (López-Lara and Romero-Zepeda, 2006). Los pilotes suelen ser de diferentes materiales, normalmente son de concreto, acero o madera y son hincados, excavados o helicoidales, con el objetivo de transferir las cargas al estrato más estable (Jones and Jefferson, 2012).

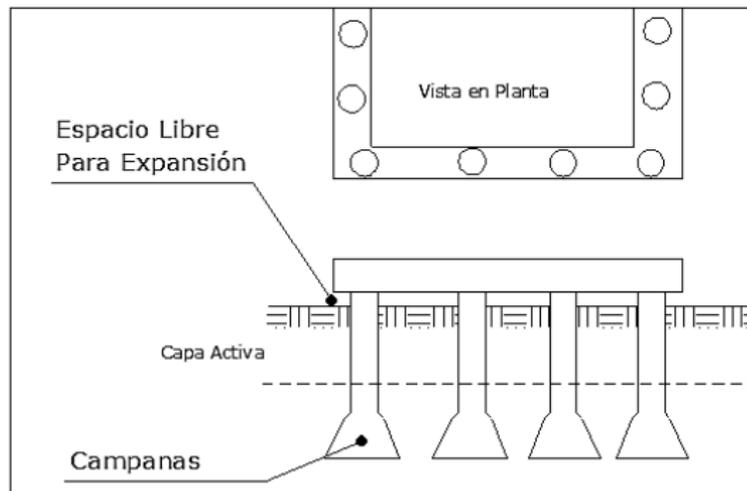


Figura 5. Cimentación mediante pilotes (López-Lara and Romero-Zepeda, 2006).

Losa nervada o tipo Waffle. Esta técnica consiste en construir un sistema que funcione como piso elevado (losa nervada), cuyos nervios son los que tienen contacto con el suelo dejando un espacio entre la losa y el suelo, para que cuando este tenga un cambio de volumen ocupe el espacio vacío (figura 6). De las

principales desventajas, no es posible utilizarla para suelos altamente expansivos, porque no siempre esta puede ejercer la suficiente presión al suelo y contrarrestar dicha expansión (Patrone and Prefumo, 2005).

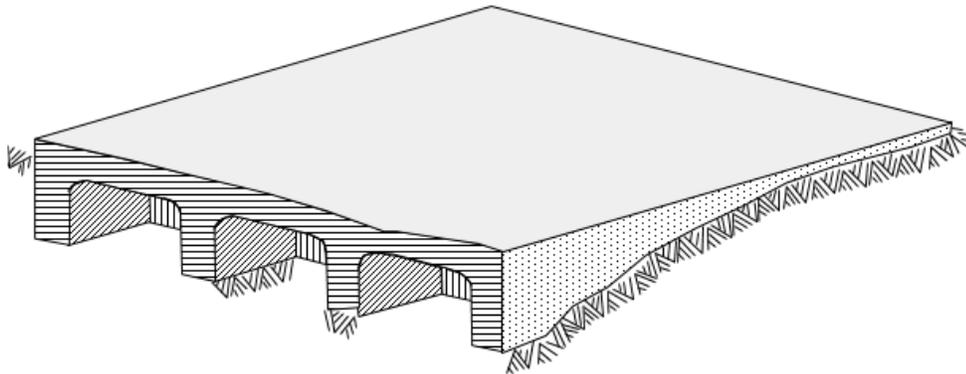


Figura 6. Cimentación mediante losa nervada.

2) Uso de estructuras rígidas

Estas tienen diferentes tipos, normalmente son cimentaciones superficiales, donde la profundidad de desplante es menor que la del ancho del cimiento (<3 metros).

Zapatas aisladas. Las zapatas aisladas no son tan comunes en este tipo de suelos, ya que solo tienen un buen funcionamiento con suelos menores a 1% de potencial de expansión y con presiones de expansión muy bajas, estas se usan donde se tiene una zona activa bastante corta y que la zapata llegue a alcanzar un estrato más estable. Son recomendables cuando el suelo tiene una buena capacidad de carga. (Pérez-Rea and Horta-Rangel, 2004).

Zapata corrida y Zapata esbelta. Al igual que las zapatas aisladas estas no suelen usarse para este tipo de suelos ya que solo funcionan para suelos con expansiones muy bajas (<1%) y presiones de expansiones menores a 15 ton/m². Para asegurarse de que esta funcione como corresponde es necesario que tenga una presión de carga muerta de cuando menos 5 ton/m², por lo tanto, se recomienda

usar la zapata lo más angosta posible (zapata esbelta) (Pérez-Rea and Horta-Rangel, 2004).

Losas de cimentación. Esta se utiliza para distribuir la carga de la estructura al suelo de manera uniforme en un área grande. Las más comunes consisten en una losa de concreto reforzada que se extiende sobre toda la zona de la estructura. Esta ayuda a disminuir los asentamientos diferenciales, ya que como está hecha de concreto este resiste los movimientos diferenciales entre las posiciones de carga. Son recomendadas en zonas donde hay suelos blandos o suelos con baja capacidad de carga.

3) Reducción de potencial expansivo

La estabilización de suelos es una de las técnicas más antiguas y conocida ampliamente por técnicos para estabilizar suelos (Salinas Suárez and Villao Carvajal, 2019). Cuando el suelo donde se desea construir no es adecuado, es necesario mejorarlo para que cumpla los requerimientos necesarios, para esto ya hay muchos métodos y esencialmente estos tratamientos se pueden agrupar en dos categorías (Jones and Jefferson, 2012).

- Estabilización de suelos.
- Métodos de control de humedad.

En ocasiones un método no es suficiente, en algunos casos es necesario hacer la combinación de varias técnicas o procedimientos.

Estabilización de suelos. Esta puede ser de diferentes formas ya sea por remoción y sustitución, remoldeo y compactación, prehumedecimiento y estabilización química.

- **Remoción o sustitución.** Este es uno de los métodos más confiables, pero como todos tiene sus limitantes. Cuando se tienen suelos moderadamente expansivos y su profundidad es muy poca se sugiere retirarlos y reemplazarlos por un suelo más inerte y compactado adecuadamente (Das.

M., 2012). Cuando la profundidad es mayor a la recomendable (>3m), se hace una sustitución parcial, esta con el fin de quitar la capa superior que es la que tiende a tener los cambios de volumen más grandes. El material que se utiliza como relleno debe de compactarse cuidadosamente para así evitar que se genere cambios de humedad y pueda afectar al estrato inferior.

- **Remoldeo y compactación.** Este es un método fácil, práctico y económico, no es muy usado ya que el suelo puede volver a expandirse si se le vuelve a colocar agua, volviendo a genera problemas y el resultado puede no ser un efecto no deseado (Sridharan and Gurtug, 2004). El principal objetivo de la compactación es generar mayor resistencia, esto consiste en hacer un remoldeo del suelo y volverlo a colocar con una humedad un poco más alta que la original, y así generar un peso volumétrico menor que él se tiene en estado in situ (López-Lara and Romero-Zepeda, 2006).
- **Prehumedecimiento.** Este es un método muy poco usual ya que tiende a demorarse meses yo hasta años, lo que hace este procedimiento es generar la mayor expansión posible del suelo al saturarse. Para esta técnica lo mejor es mezclar el suelo con algún otro material estabilizador (Cal), se compacta reduciendo la plasticidad del suelo y a su vez incrementa su capacidad de carga (Kalantri, 2012).
- **Estabilización Química.** Existen diferentes materiales para estabilizar un suelo, las más usadas son con Cal y Cemento, pero ya se han hecho con diferentes materiales como cenizas volantes de subproductos de la industria. La estabilización con cal es la más utilizada ya que no se necesita de mucho material y es un producto muy económico, se suele utilizar en porcentajes de 2% al 7%. Al hacer estas mezclas provoca que el índice de plasticidad aumente y se pueda trasformar en una arcilla de baja compresibilidad (Uribe, 2019).

4) Métodos de control de humedad.

Los métodos de control de humedad han resultado bastante eficientes para los suelos expansivos. Los más eficientes son las Barreras verticales.

- **Barreras verticales.** Estas consisten en controlar la humedad del suelo colocando barreras, estas impiden el paso del agua y así evitan el cambio de volumen, tienden a tener profundidades de 1.5 metros aproximadamente y se colocan en el perímetro de la losa, estas barreras normalmente se construyen haciendo zanjas delgadas, colocando grava y concreto con un recubrimiento de membrana para evitar que se dañe por humedad (Das, 1999).

Comparación entre métodos.

En la tabla 2 se hace una comparativa entre métodos, basándonos en costos, eficiencia y desventajas.

Tabla 2. Comparación de soluciones más comunes para suelos expansivos.

Método	Características	Costo	Desventajas	Eficiencia.
Aislamiento de estructura.	Se aísla la estructura del movimiento de expansión y se contrarresta el levantamiento al anclarse en el estrato estable.	\$\$\$	Procesos de diseño y construcción relativamente costosos.	100%
Estructuras Rígidas	Provee una cimentación Rígida para proteger a la estructura.	\$\$	Solo funciona para construcciones sencillas y en su mayoría son estructuras provisionales	Funciona por no más de 5 años.

"Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas"

Método	Características	Costo	Desventajas	Eficiencia.
Estabilización de Suelos por Métodos Químicos.	Todos los suelos de grano fino pueden ser tratados mediante estabilizadores químicos. Reduce la plasticidad y potencial expansivo del suelo entre el 60 y 80%	\$\$	La química del suelo puede ser perjudicial para el tratamiento.	60-80%
Métodos de Control de Humedad.	El contenido de agua incrementa para fomentar la expansión antes que la construcción.	\$	Compactación a baja densidad puede ser perjudicial para la capacidad de carga. Y el prehumedecimiento tarda mucho y solo funciona por 5 años máximo.	No se recomienda.
Sustitución del Suelo.	El suelo se remueve y se sustituye por un suelo que no es expansivo.	\$\$	Si la zona activa es mayor a los 3 metros no se recomienda ya que se podría elevar en costo la excavación del suelo.	100%

3. ANTECEDENTES

Ya se han hecho varios estudios con diferentes técnicas para buscar la mejor solución y evitar el cambio de volumen en suelos expansivos, con el fin de poder tener procedimientos más viables y económicos, y así evitar que este tipo de suelos siga generando daños a las estructuras.

En México López-Lara (2010) utilizó un poliuretano que generalmente se usaba para el sellado de grietas, para estabilizar un suelo expansivo, se propusieron varias mezclas de cantidades entre el 4% y 10%, con estas mezclas se generaron especímenes a las cuales se les hicieron pruebas para obtener propiedades índice, expansión, compactación y resistencia, dándonos como resultado un 40% menos de expansión respecto al suelo natural.

En Egipto en 2010, se usó un modelo para poder mejorar un suelo arcilloso expansivo mediante perforaciones rellenas de arena (pilas de arena). Nazir y Azzam (2010) determinaron que al colocar las pilas la capacidad de carga aumento considerablemente.

En España, en 2011, Seco llevó a cabo un estudio experimental con una arcilla altamente expansiva combinada con subproductos y material de desecho. Todas las pruebas lograron reducir la expansión en el suelo, la mezcla que tuvo mayor eficacia fue la que contenía 2% de cal y 1% de óxido de magnesio, reduciendo hasta un 85% la expansión el suelo natural como se muestran en la Tabla 3 y Figura 7.

Tabla 3. Mezclas con diferentes porcentajes de subproductos y desechos (Seco, 2011)

1	Suelo
2	2% Cal
3	4% Cal
4	2% óxido de magnesio
5	4% óxido de magnesio
6	1% cal + 2% óxido de magnesio
7	2% cal + 1% óxido de magnesio
8	5% cenizas cascara de arroz
9	5% cenizas de paja de cereales
10	5% yeso
11	5% ceniza volante de acero

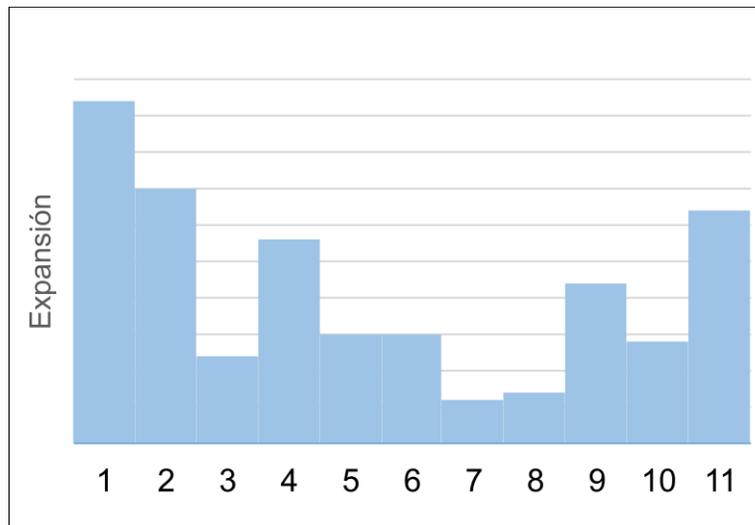


Figura 7. Reducción de expansión con las diferentes mezclas (Seco, 2011)

También se ha utilizado como alternativa, para solucionar los suelos expansivos, el uso de estructuras huecas invertidas (López-Lara, 2014). Esta técnica es descrita por Bowles (1987), y esto consistía en permitir que el suelo se expandiera dentro de los huecos hechos en por debajo de la cimentación, reduciendo el cambio de volumen del suelo a capacidades tolerables. Este procedimiento es muy parecido al análisis de losa nervada dejando el espacio suficiente para que el suelo pueda expandirse, estas perforaciones se calculan en función del volumen de expansión que se desea absorber, y con esto poder hacer que la expansión sea totalmente horizontal y no vertical (figura 8).

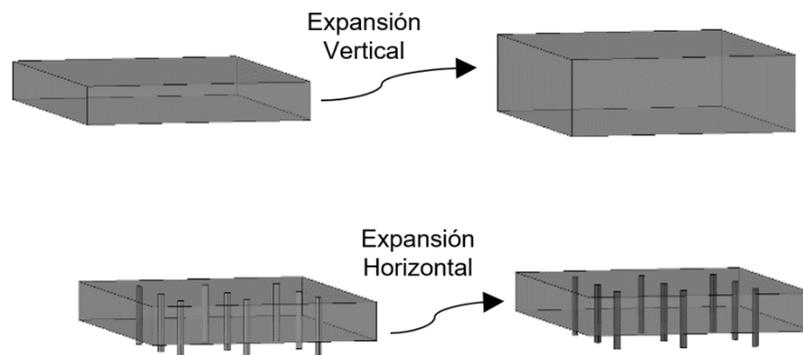


Figura 8. Diferencia de expansión entre el suelo sin tratar y con el uso de las estructuras huecas invertidas (López-Lara, 2014).

En México, específicamente en Querétaro existen suelos potencialmente expansivos, en el cual se hizo un experimento a nivel de tesis de la combinación del suelo con cal y aplicándole carga (Uribe, 2019). Se hizo el estudio de suelo natural y su combinación con cal en diferentes porcentajes, dándonos los siguientes resultados (Tabla 4):

Tabla 4. Propiedades índice del suelo natural y el suelo con Cal (Uribe, 2019).

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

*Peso específico de los sólidos.

El suelo que se utilizó fue una arcilla de compresibilidad alta clasificada por el sistema SUCS como CH, de tal forma que cuando se le aplicó el 6% de cal, material se termina clasificando como una arcilla de baja compresibilidad CL como se muestra en la figura 9.

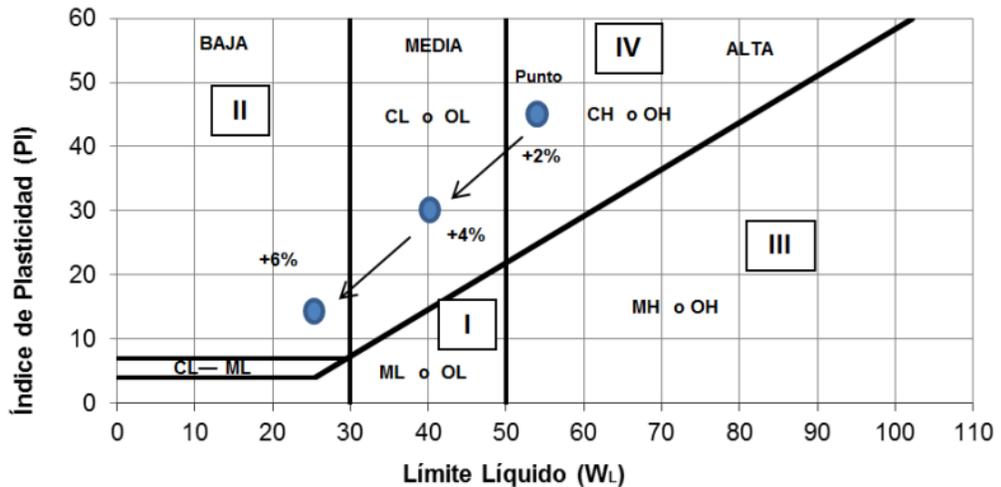


Figura 9. Clasificación del suelo natural y modificado con cal dentro de la carta de plasticidad (Uribe, 2019).

Otro de los métodos utilizados fue el de introducir estructuras tubulares porosas en un suelo expansivo, esta técnica no buscaba cambiar la estructura del suelo, sino poder conducirla en una dirección hacia la estructura evitando el cambio de volumen en el suelo (Morales, 2019). En este procedimiento se introdujeron varios tipos de estructuras porosas con diferentes diámetros (5, 7, 8.5 y 10 mm), los resultados más favorables fueron con las perforaciones de diámetros de 5 y 10 mm, logrando reducir la expansión en 54% y 62% respectivamente (figura 10).

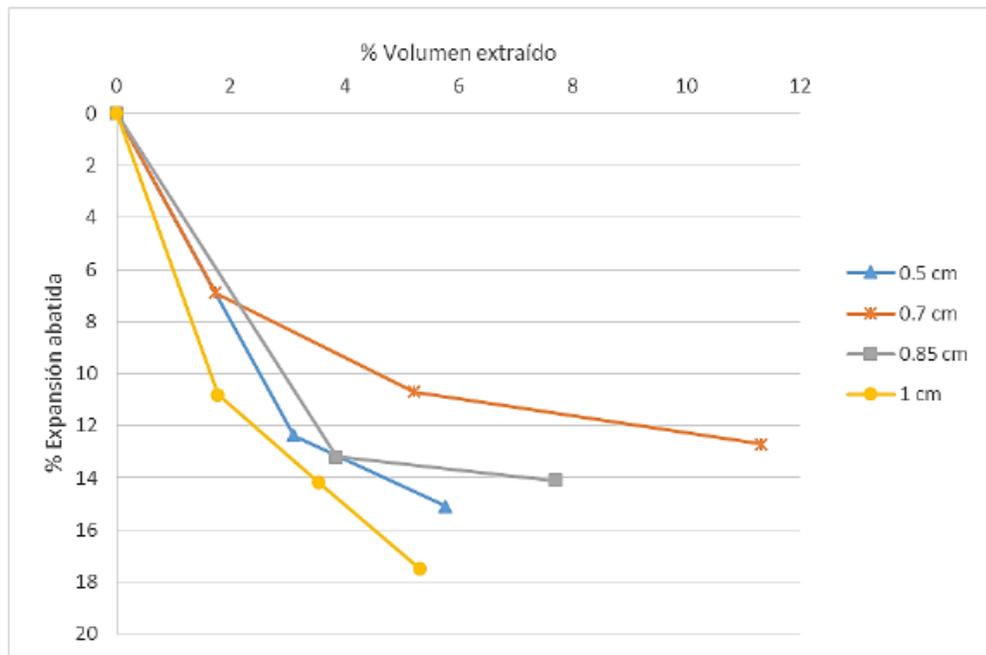


Figura 10. Tendencias de expansión abatida contra volumen extraído en todas las combinaciones realizadas (Morales, 2019)

En Ecuador Salinas y Villao (2019) hicieron un estudio con suelos expansivos existentes en la región estabilizándolos con cal, sal y geoceldas, estos elementos los utilizaron para comparar la resistencia que cada uno al agregarlo con el suelo y ayudando a disminuir el nivel de expansión. Las mezclas que se utilizaron tenían porcentajes del 3%, 5% y 7% tanto para la cal como para la sal, para el análisis con geoceldas se llevó el estudio en campo, mezclando este geosintético con el suelo.

Los resultados fueron bastante prometedores ya que se redujo un 49.74% la expansión con una mezcla de 5.53% de cal aumentado la capacidad de carga del suelo, de la mezcla con sal el mejor resultado fue con 4.93% el cual redujo la expansión 69.88% de igual forma aumentó la capacidad de carga del suelo. Con el análisis de la mezcla con geoceldas tuvo una reducción de expansión bastante favorable de un 82.39%, los resultados se muestran en la figura 11.

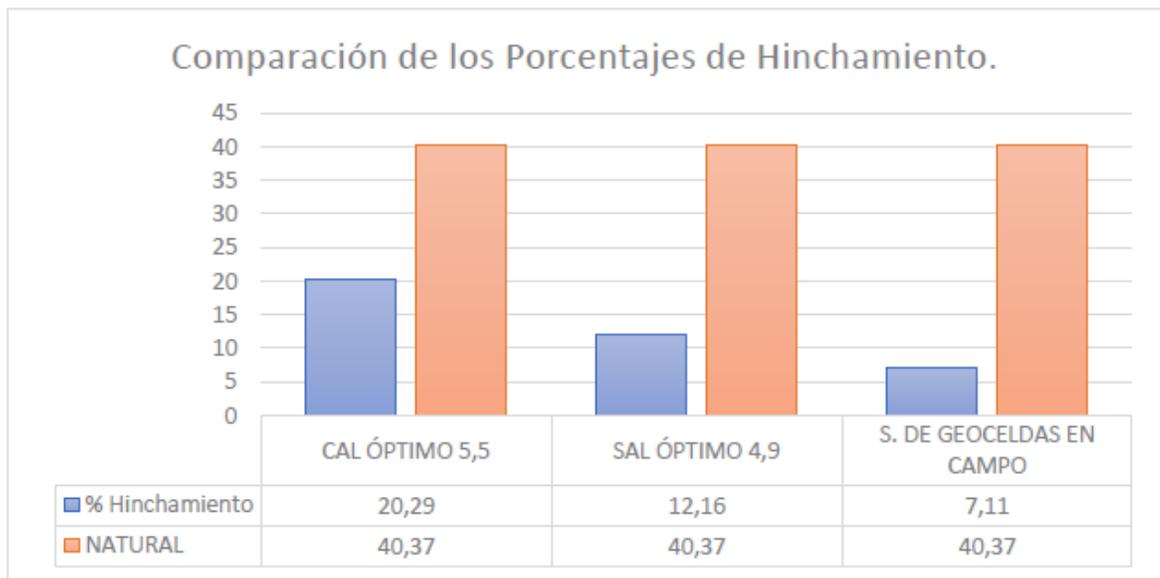


Figura 11. Variación del porcentaje de expansión con diferentes agentes estabilizadores (Salinas y Villao, 2019).

Finalmente, en Algeria, se hizo un experimento con suelo expansivo y material inerte (arenas) de dos distintas formas, mezclándola y poniendo capas de suelo expansivo y arena. El estudio se hizo con diferentes porcentajes de arena del 10% al 70%, demostrando que mientras más arena se colocaba, la expansión se reducía (figura 12). Esta reducción disminuía en gran parte por los vacíos que había entre los granos de arena, cuando la fracción de arena era más gruesa, los vacíos eran más grandes y, por consiguiente, se reducía mucho más la expansión (Bahia and Ramdane, 2012).

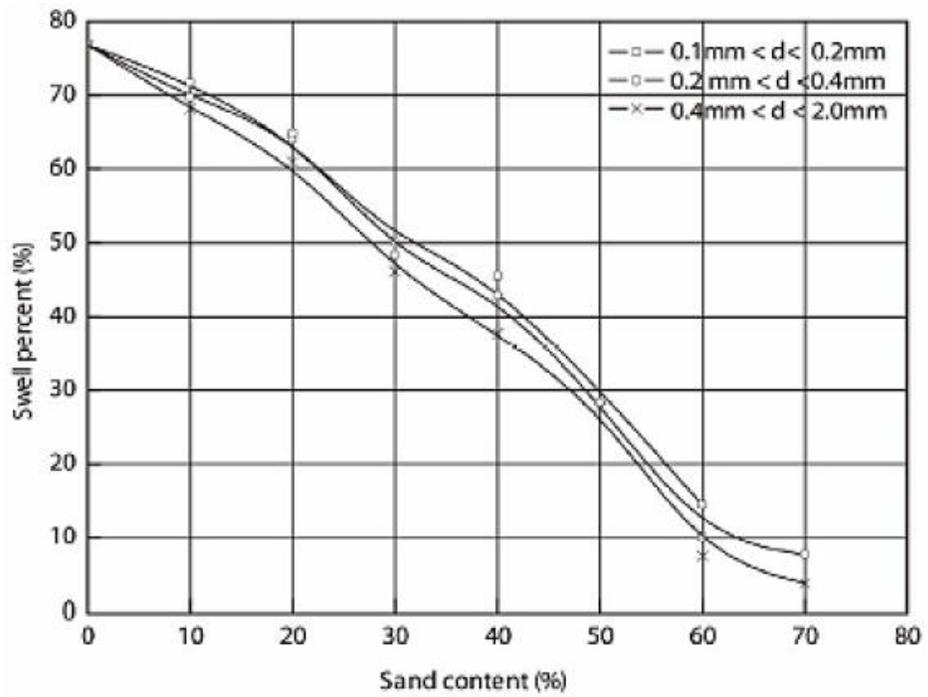


Figura 12. Variación del porcentaje de expansión con la colocación de arena (Bahia and Ramdane, 2012).

4. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Para poder conocer un poco más de la problemática se necesita conocer las características de los suelos expansivos, su localización, y como están conformados, ya que no toda arcilla es expansiva, para esto se requieren hacer un estudio previo y de esta manera poder clasificarlas.

4.1. Suelo Expansivo

Un suelo expansivo es cualquier tipo de suelo que tiene la capacidad de cambiar su volumen (expansión o contracción) bajo cambios en las condiciones de humedad (Méndez & Pineda, 2011). Estos cambios de volumen dependen de la mineralogía que tenga el suelo y esto va asociado a la variación del campo eléctrico, el cual es introducido por el agua.

4.2. Ubicación de los suelos expansivos

Los suelos expansivos se encuentran principalmente en regiones semiáridas y zonas de clima templado (tropical). Estos se presen en donde la evaporación del suelo excede a la precipitación, por lo tanto, se tiene la teoría de que en estas zonas es donde se forma con mayor frecuencia la montmorillonita (mineral altamente expansivo) (Méndez & Pineda, 2011).

Hay muchos países en el mundo donde se encuentran estos tipos de suelo (figura 13), donde se han destacado más son en ciertas partes de Latinoamérica, Estados Unidos, África y en algunas partes de Europa, principalmente en España, y Asia.

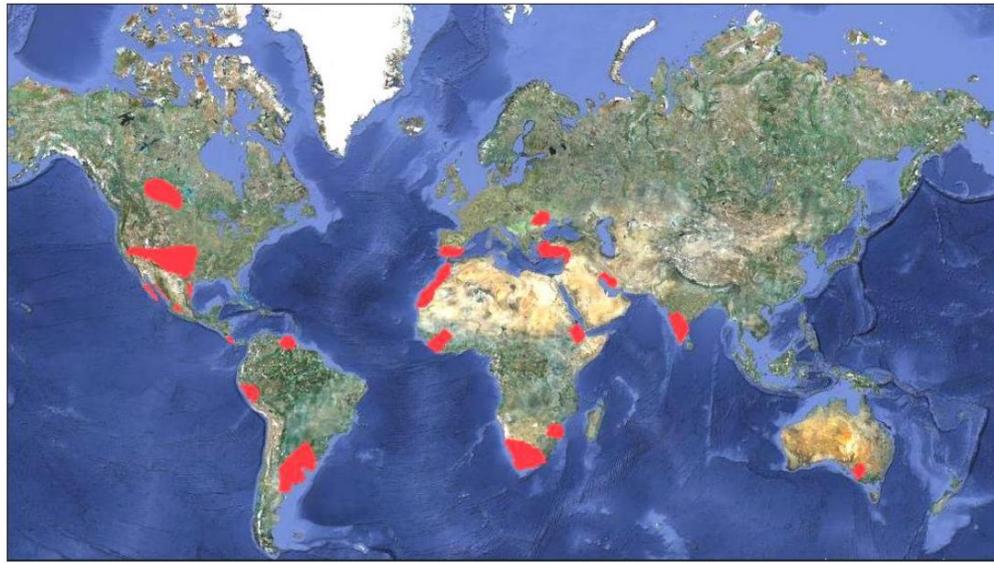


Figura 13. Ubicación de suelos expansivos en el mundo (Modificado de G.W. Donaldson, 1969).

En México estos suelos se han presentado en diferentes estados (figura 14). Los suelos expansivos se encuentran donde hay variaciones significativas de humedad: en zonas en estaciones muy variadas, y en las zonas semidesérticas donde hay poca lluvia. Tomando en cuenta las zonas donde se encuentran los suelos expansivos en la República Mexicana, es de esperarse que se presenten problemas en las estructuras que son provocadas por este tipo de suelo, pero aún no se dispone de información que afirme esto (Méndez & Pineda, 2011).

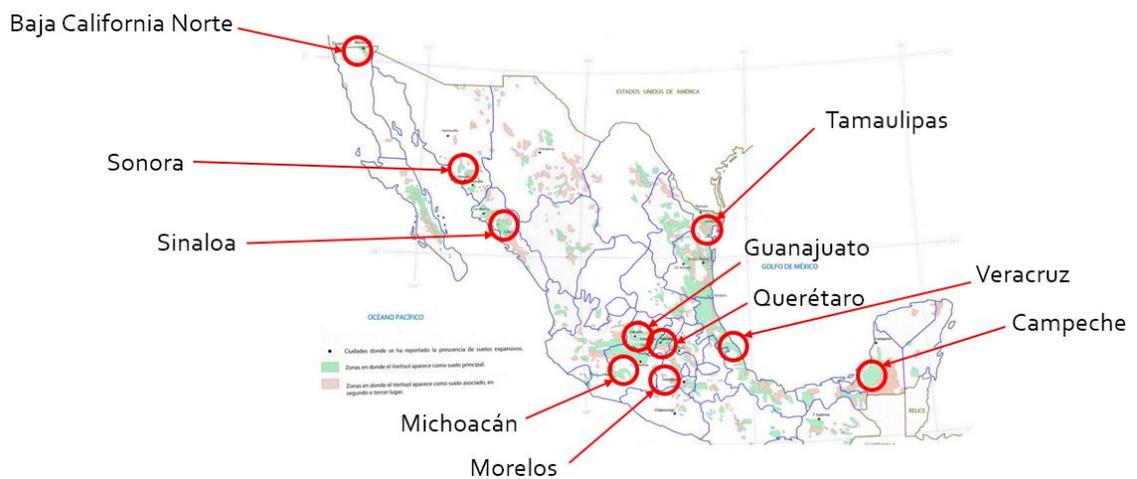


Figura 14. Zonas con suelos expansivos en la República Mexicana (Zepeda y Castañeda, 1987).

Basándonos en los datos anteriores y buscando algo más preciso respecto a las arcillas se encontró un perfil estratigráfico de un suelo expansivo de Querétaro (figura 15).

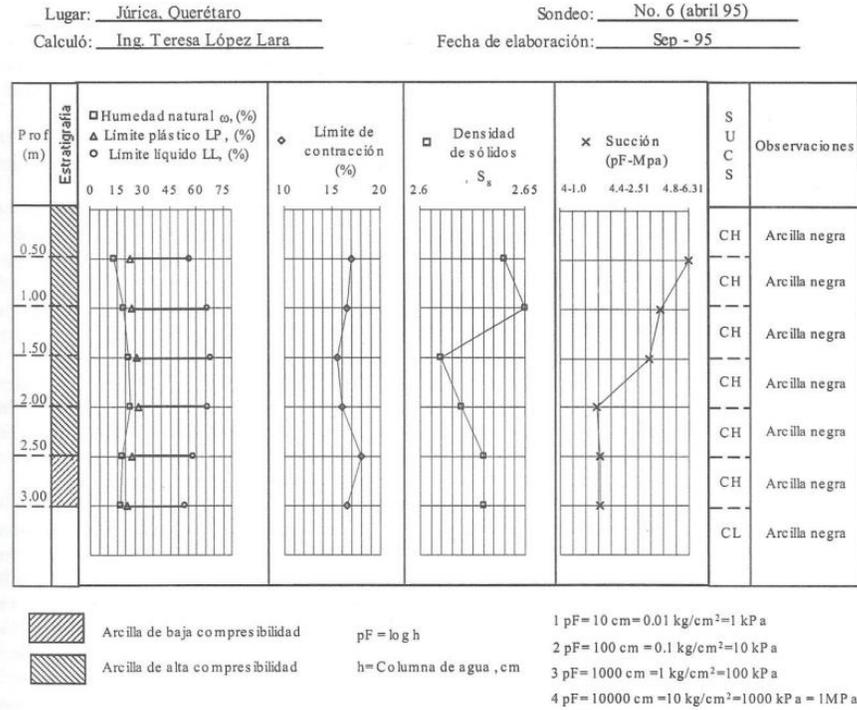


Figura 15. Perfil estratigráfico de un suelo arcilloso expansivo de Jurica, Querétaro (López-Lara, 1996).

4.3. Arcillas

Las arcillas son principalmente partículas muy pequeñas normalmente en forma de escamas, estas contienen minerales arcillosos y otros minerales. Las arcillas se encuentran como partículas menores a 0.002 mm (Das, 2015).

Los minerales arcillosos están compuestos de complejos de silicatos de aluminio que tienen de una o dos unidades básicas:

- Tetraedro de Sílice.
- Octaedro de Alúmina.

Su formación varia de los elementos que se encuentren en cada una de las partículas.

4.4. Tipos de minerales en las arcillas

La **caolinita** consiste en capas repetidas de láminas elementales de sílice-gibbsita que se mantienen unidas entre sí por enlaces hidrogénicos. La caolinita se forma como placas y el área superficial de cada partícula por masa unitaria es aproximadamente de $15\text{m}^2/\text{g}$. Esta área se le conoce como superficie específica (Das, 2015).

La **Ilita** consiste en una lámina de gibbsita que se enlazada (por iones de potasio) a dos láminas de sílice, una arriba y otra abajo. La carga negativa para balancear los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por silicio en las láminas tetraédricas. La superficie específica de las partículas es aproximadamente de $80\text{m}^2/\text{g}$. (Das, 2015).

La **Montmorillonita** tiene una estructura muy parecida a la ilita, es decir, que la lámina de gibbsita se intercala entre dos láminas de sílice, solo que los iones de potasio no están presentes como en el caso de la ilita y el agua es atraída con más facilidad hacia los espacios de las capas. La superficie específica es aproximadamente de $800\text{m}^2/\text{g}$. (Das, 2015)

Estos minerales son los que más predominan en los suelos arcillosos (Tabla 5).

Tabla 5. Minerales más comunes en las arcillas

Mineral	Absorción de agua	Expansión
Caolinita	Baja	Baja
Ilita	Baja	Baja
Montmorillonita	Alta	Alta

Además de caolinita, ilita y montmorillonita, otros minerales arcillosos comunes generalmente encontrados son clorita, haloisita, vermiculita y atapulgita.

4.5. Composición de las arcillas expansivas

Las arcillas en general tienden a contraerse cuando pierden humedad, esto dependerá que tanta agua sea absorbida, poseen una alta cohesión, son compresibles y cuando se les aplica carga estas se comprimen lentamente (Sowers, G, 1994).

Se define que el fenómeno de expansión va de la mano con la cantidad de Montmorillonita que contenga el suelo. La expansión se produce cuando se absorbe agua entre láminas (sílice y alúmina) estas forman la partícula de arcilla (figura 16).

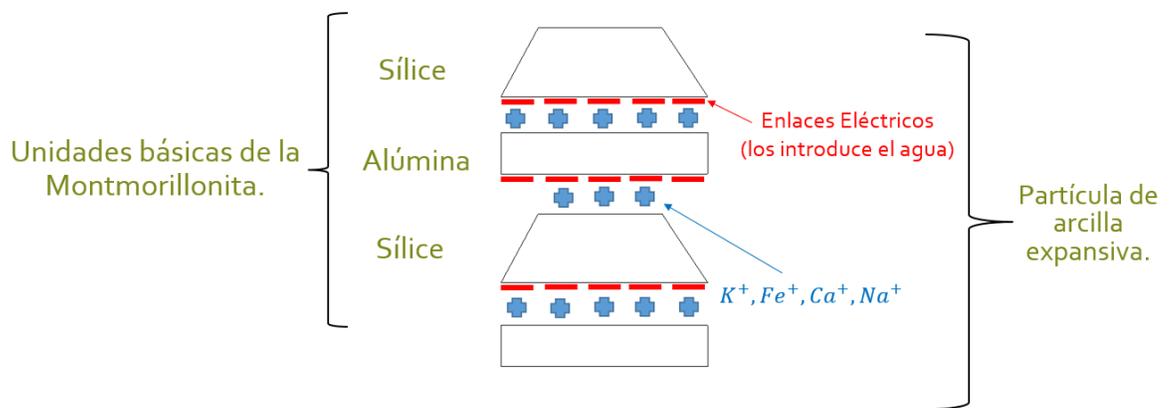


Figura 16. Elementos de una partícula de arcilla expansiva

Una montmorillonita pura es casi imposible de encontrar en la naturaleza, ya que este mineral en su forma más pura tiende a hincharse más de quince veces su volumen original. Por lo general, las arcillas que contienen este mineral suelen mezclarse con otros tipos de arcillas más estables y con arenas o limos. A lo que podríamos llamarle una típica “montmorillonita” muy probablemente no pueda expandirse más del 35% al 50%, incluso con las peores condiciones de laboratorio.

Las láminas de la Montmorillonita solo tienen conexiones débiles, por lo tanto, el agua se absorbe fácilmente en las arcillas que contengan este mineral y separan las láminas moleculares. Si este suelo se seca, las partículas de agua forman meniscos, y las fuerzas de tensión superficial hacen que se acerquen las partículas, provocando que el suelo se encoja (figura 17).

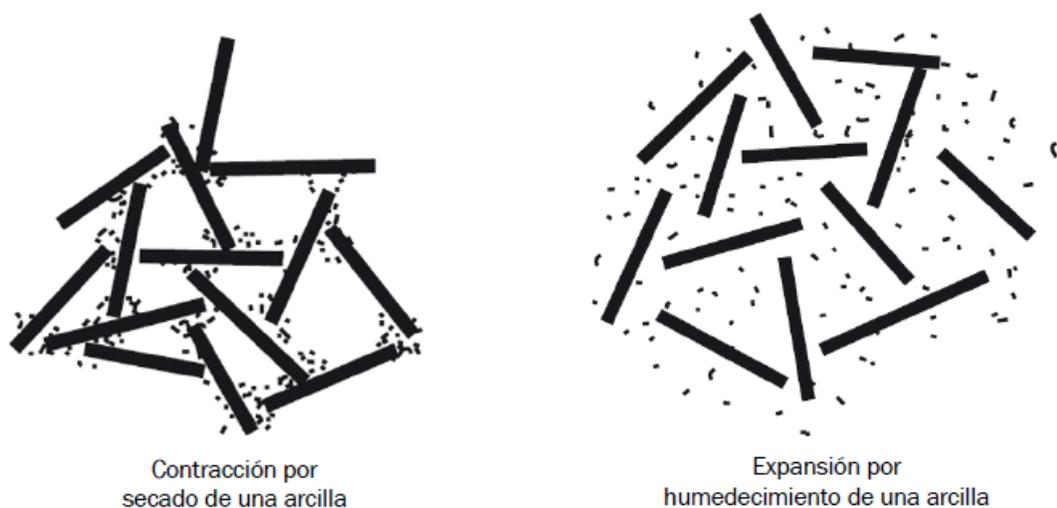


Figura 17. Contracción y expansión de una arcilla

Podría decirse que el suelo es como un resorte comprimido cuando se está seco, diríamos que en este punto tiene una succión muy alta, si hay agua disponible esta succión la atraerá hacia los espacios disponibles haciendo que el suelo se hinche, esto hace que el “resorte” sea liberado y quizá ahora se está forzando hacía afuera.

Hay dos tipos de arcillas de montmorillonita:

- Montmorillonita de calcio.
- Montmorillonita de sodio (bentonita).

Esta última es la más expansiva, pero es menos común.

4.6. Identificación y clasificación de arcillas expansivas

Con los estudios previos que ya se han realizado, existen varios criterios para identificar el suelo expansivo, los cuales se detallan a continuación:

4.6.1. Identificación en campo

Es un método en su mayoría empírico, el cual se da haciendo un reconocimiento visual, los principales indicadores son los siguientes:

- **Grietas.** Estas son provocadas en los periodos de sequía, estas suelen tener diferentes espesores, los cuales indican el potencial de expansión que tiene el suelo.
- **Plasticidad.** Este tipo de suelos al humedecerse tiende a tener un comportamiento como plastilina.
- **Textura.** Suelen ser resbaladizos cuando son expuestos al agua y tienden a pegarse a los zapatos o llantas.
- **Daños estructurales.** Suelen generar daños a las construcciones, los cuales se definen en grietas, pisos levantados o alguna otra falla, este es uno de los indicadores más importantes para poder definir si se tiene un suelo expansivo (Oswaldo, 2006).

4.6.2. Caracterización Mineralógica

El objetivo de estas pruebas es obtener una descripción de los minerales existentes para las muestras que se requieren estudiar, los ensayos de estos análisis son:

- **Difracción de rayos X.** La función principal de este estudio es determinar los porcentajes de minerales que se encuentran en las arcillas, este es el método que más se utiliza.
- **Análisis Térmico Diferencial.** Con este método se puede visualizar el comportamiento del suelo, ya que este es expuesto a cambios de temperatura, los cuales pueden ser cambios de volumen, pérdida de peso y transformaciones mineralógicas.
- **Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).** Con este equipo se puede obtener la microestructura de materiales a base de electrones, con el fin de poder ver su morfología, composición de superficie y tamaño de grano (Oswaldo, 2006).

Aunque estos métodos son capaces de reconocer los minerales que se encuentran en las arcillas expansivas, su uso es algo restringido. (Sridharan & Prakash, 2000; Asuri & Keshavamurthy, 2016) sugirieron que estos métodos no son rentables, esto

a que los requisitos de instrumentación de cada prueba son de alto nivel, es difícil interpretar resultados y tienen gran complejidad, esto hace que estos procedimientos no sean prácticos.

4.6.3. Métodos directos

Estos métodos son los más comunes y los que se consideran más exactos para poder determinar si un suelo es expansivo, estos pueden ser muy útiles para poder identificar los minerales arcillosos en la muestra, ya que estos se basan en encontrar propiedades índice y métodos directos para poder determinar si el suelo tiene un potencial de expansión, el método de hinchamiento libre propuesto por Sridharan & Prakash (2000), parece ser el más prometedor para poder identificar los minerales en suelos expansivos, de una manera altamente comparable a otros métodos que ya se han aplicado recientemente (Wubshet & Tadesse, 2014). La relación de hinchamiento libre se usa con la prueba de Límite Líquido, la cual usa el método de cono con agua para determinar el mineral dominante. Por lo que se obtiene valores altos de límite líquido para suelos que su mineral predominante es caolinita (Prakash & Sridharan, 2004).

Límites de Atterberg.

Los suelos expansivos en general suelen tener un alto límite líquido y un alto índice de plasticidad, lo cual se genera por el contenido de minerales activos. Atterberg se encargó de diferenciar los estados de consistencia que tiene el suelo en cuatro categorías: Sólido, semisólido, plástico y líquido (figura 18).

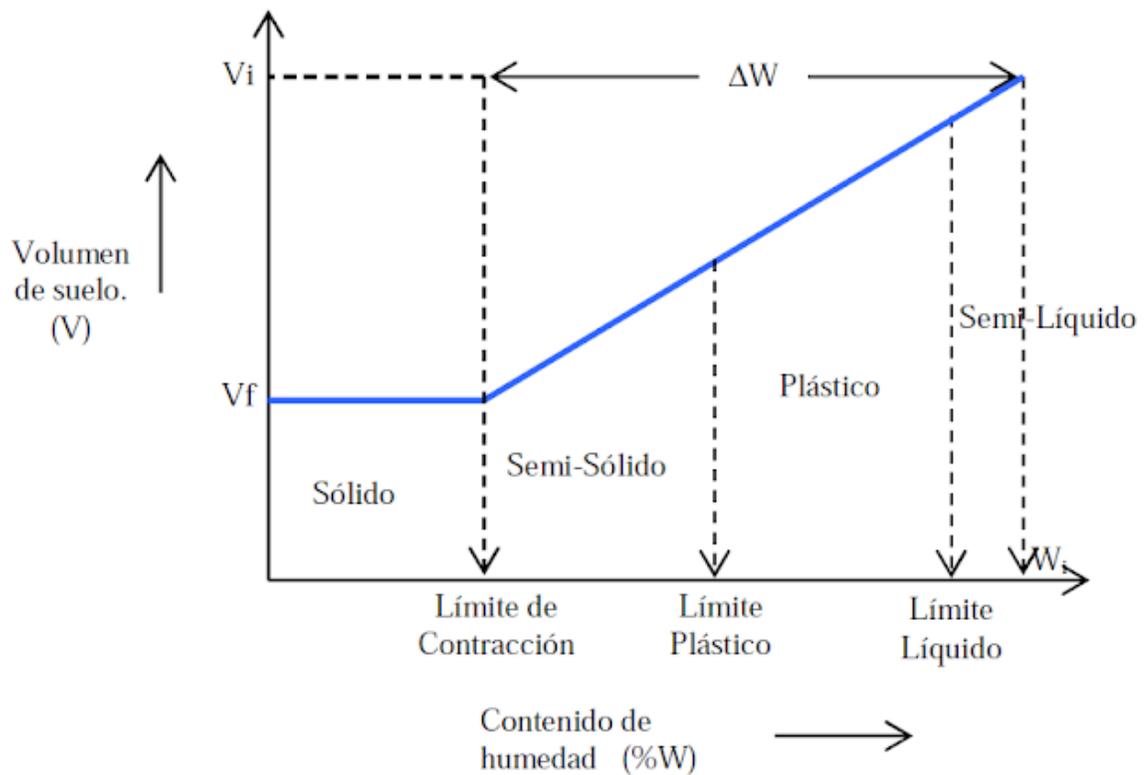


Figura 18. Límites de Atterberg (Braja M. Das, 2001)

- **Límite Líquido (LL).** Esta es una relación del porcentaje de humedad con el peso seco de la muestra, con el cual se mide el cambio de estado de la muestra, que va del líquido al plástico, a un punto la cohesión es casi nula. Este procedimiento generalmente se hace con la Copa de Casagrande.
- **Límite Plástico (LP).** Este mide el porcentaje de humedad respecto al suelo seco, en el cual pasa de un estado plástico a semisólido.
- **Índice de Plasticidad (IP).** Es la resta del límite líquido menos el límite plástico.
- **Límite de contracción (LC).** Es el límite que marca el cambio de un estado semisólido a sólido, el cual, al disminuir al agua, ya no genera el cambio de volumen de la muestra.

Métodos más comunes.

- **Método de Holtz y Gibbs.** Este método utiliza el IP y el LC con el cual califica el grado de expansión que tiene el suelo como se muestra en la tabla 6:

Tabla 6. Método de Holtz y Gibbs en función del índice de plasticidad (Das. B., 2012)

Índice Plástico	<15	13-23	20-31	>28
Límite de Contracción	<18	15-28	25-41	>35
Grado de expansión	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

- **Método de Seed Woodward y Lundgren.** Este método es una correlación del porcentaje de expansión y el IP (tabla 7), esto colocándole una sobrecarga de 1 psi, con la cual se determinó la siguiente ecuación:

$$S = 60K(IP)^{2.44} \tag{1}$$

Donde:

S Potencial de expansión

K 3.6x10⁻⁵

IP Índice de Plasticidad

Tabla 7. Método de Seed Woodward y Lundgren (Jiménez Salas, 1980)

Potencial de expansión	0-1.5	1.5-5	5-25	>25
Índice de plasticidad	0-15	10-35	20-55	>55
Potencial de Hinchamiento	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

Estos autores también hicieron un método basado en la actividad de la arcilla y el porcentaje de partículas menores al 0.002 mm (contenido de coloides), esta actividad se mide con la siguiente ecuación:

$$Actividad = \frac{IP}{C-10} \tag{2}$$

Donde:

IP Índice de Plasticidad

C Porcentaje de arcilla menor a 0.002 mm

Con esta relación se desarrolla una carta la cual se muestra en la figura 19:

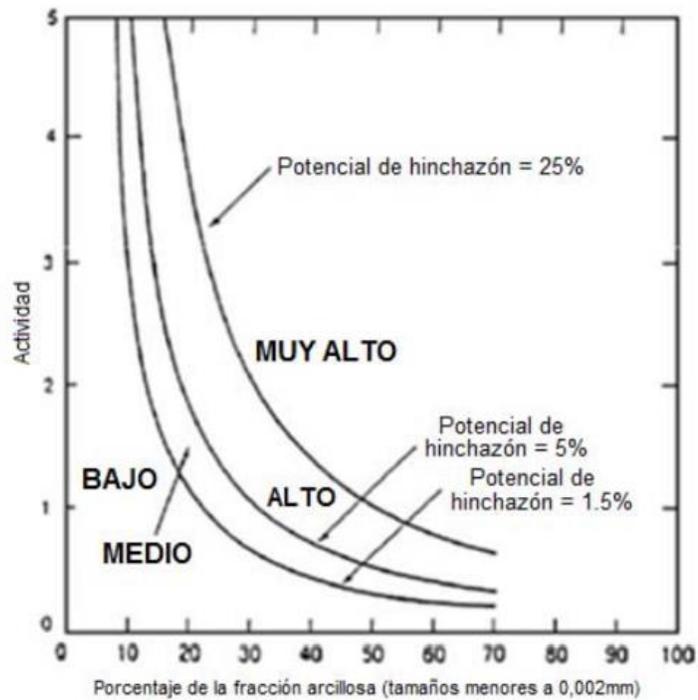


Figura 19. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. (Oswaldo, 2006)

- **Método Raman (1967).** Este método calcula el Índice de Contracción (IC) con base al LL y LC, utilizando la siguiente ecuación:

$$IC = LL - LC \quad (3)$$

Donde:

IC Índice de Contracción

LL Límite Líquido

LC Límite de Contracción

Tabla 8. Método de Raman 1967(Das B., 2012)

Índice de contracción	<20	20-30	30-60	>60
Potencial de expansión	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

- **Método Chen (1987).** Método que utiliza el IP, para poder determinar el grado de expansión (tabla 9).

Tabla 9. Método de Chen 1987(Das B., 2012)

Índice de plasticidad	<15	10-35	20-55	>35
Potencial de expansión	Bajo	Medio	Alto	Muy alto

En la figura 20, se encuentran los criterios más usados para determinar el potencial de expansión (Das B., 1999).

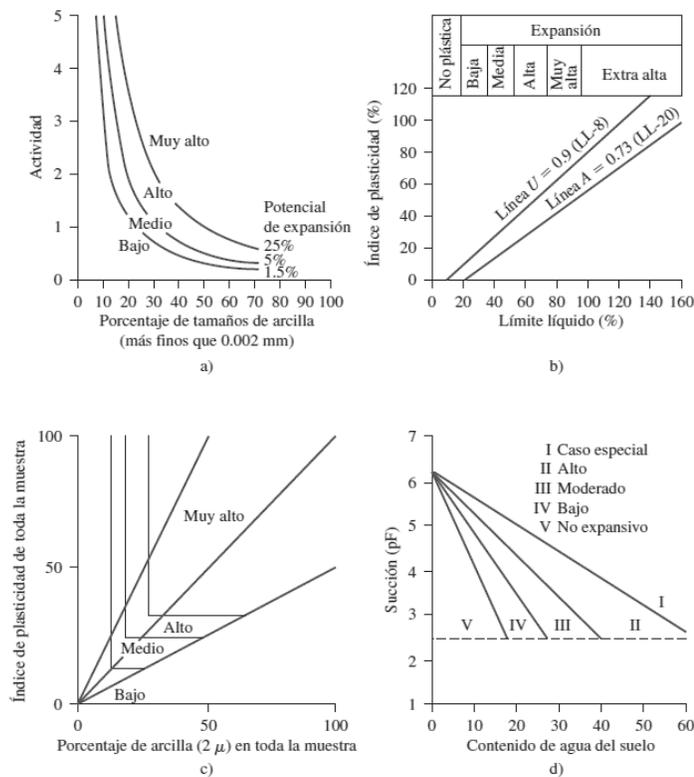


Figura 20. Potencial de hinchamiento en función de la actividad de las arcillas. (Oswaldo, 2006)

En la figura 21, se muestra la relación de cambio de volumen con el índice de plasticidad que predice Holtz, Seed y Chen.

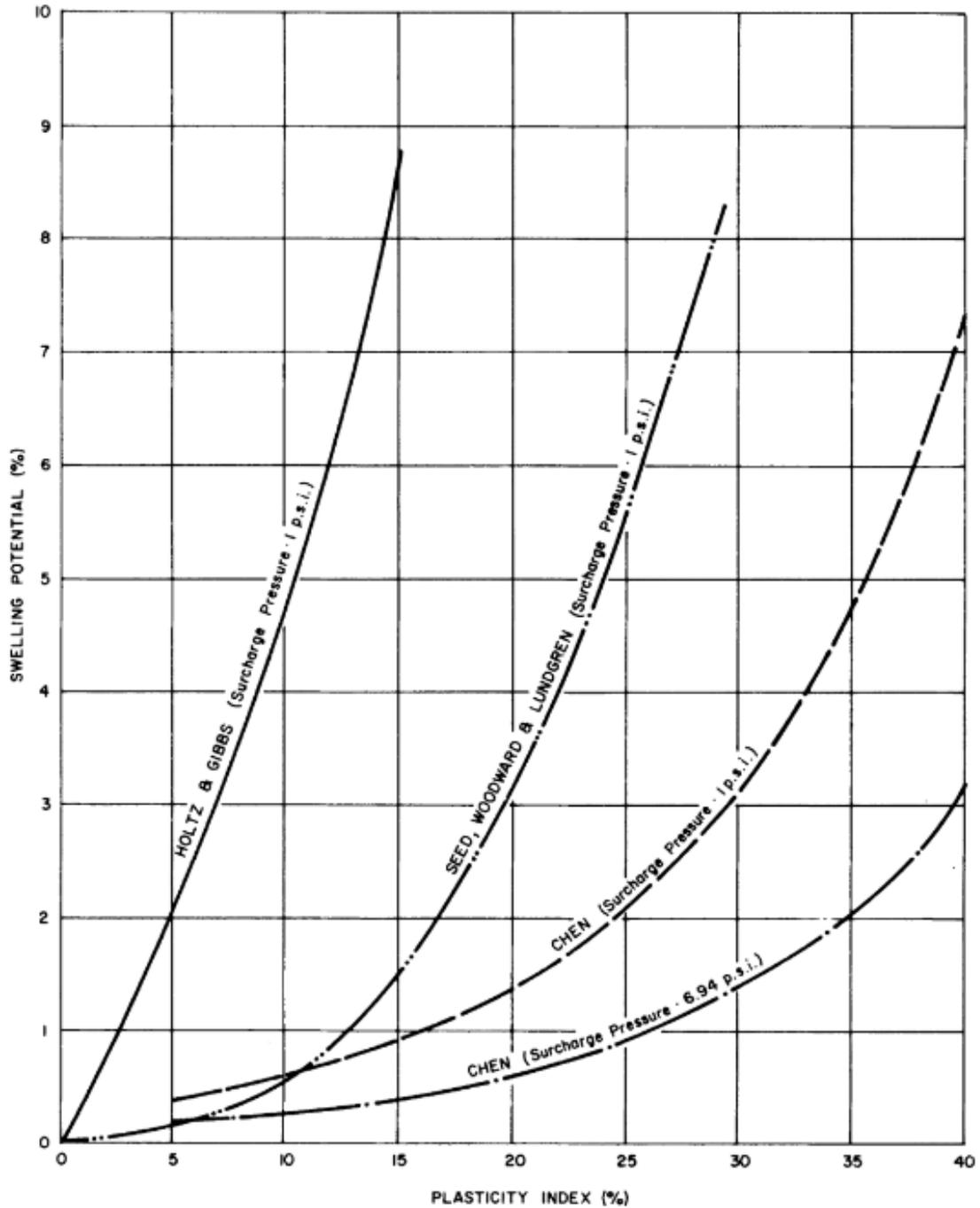


Figura 21. Relación de cambio de volumen con IP. (Chen, 2012)

Expansión libre.

Cuando se tiene este tipo de suelos, es necesario hacer la prueba de expansión libre, la cual determina la máxima expansión del suelo cuando se satura, esta prueba mide el cambio de volumen en porcentaje con la ecuación 4:

$$EL = \frac{V_f - V_o}{V_o} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

EL Expansión libre (%)

Vf Volumen final de la muestra (cm³)

Vo Volumen inicial de la muestra (cm³)

Presión de Expansión.

La presión de expansión es la fuerza que ejerce el suelo, cuando aumenta su volumen, esto con base a su grado de saturación.

Esta prueba es casi igual a la anterior, la diferencia es que para medir la presión de expansión se le va agregando carga hasta que la lectura del consolidómetro marque 0, esto con el fin de que vuelva a tener la relación de vacíos inicial, contrarrestando la expansión libre del suelo.

4.7. Ensayo para determinar la expansión libre y presión de expansión (ASTM D-4546)

Esta norma describe tres métodos directos para poder evaluar el potencial de expansión que tiene el suelo (A, B y C).

4.7.1. Opción A

Este método determina:

- Expansión Libre.
- Presión de Expansión.

- Porcentaje de cambio de volumen bajo una carga vertical, mayor a la presión de expansión.

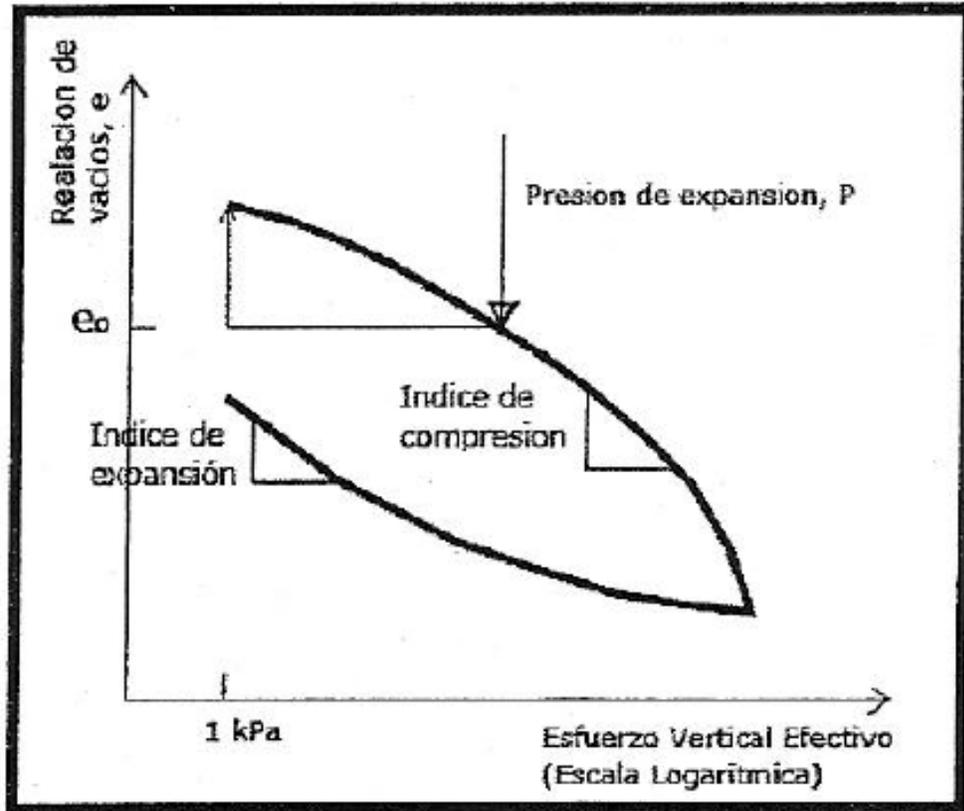


Figura 22. Deformación vs esfuerzo vertical, Método A (López-Lara, 2008)

4.7.2. Opción B

Este método determina:

- Presión de expansión.
- Porcentaje de cambio de volumen bajo una carga vertical igual a la carga que se encuentra in situ, o sobrecarga estructural u otras mayores a la presión de expansión

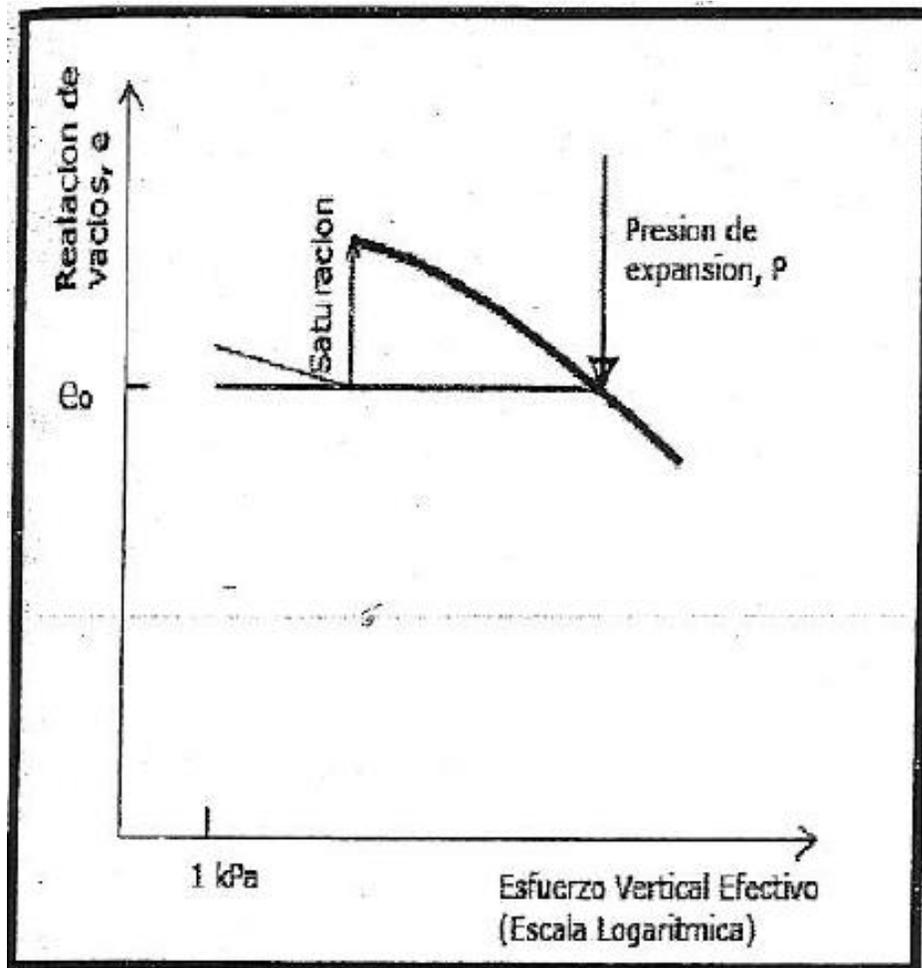


Figura 23. Deformación vs esfuerzo vertical, Método B (López-Lara, 2008)

4.7.3. Opción C

Este método determina:

- Presión de pre-consolidación.
- Presión de expansión.
- Porcentaje de cambio de volumen.

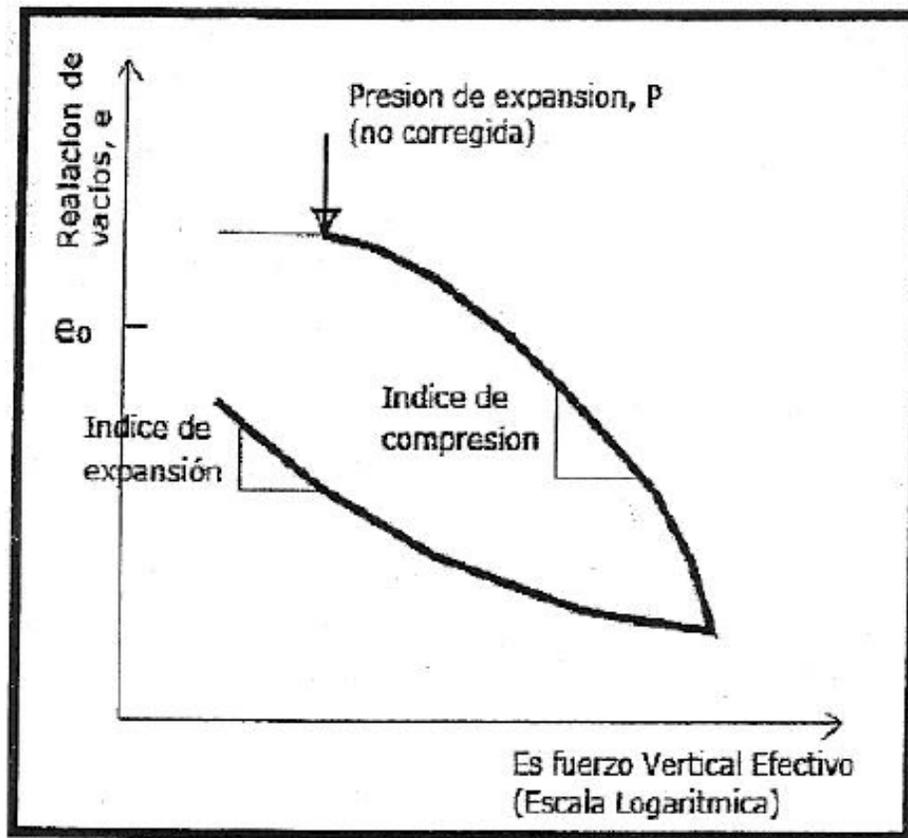


Figura 24. Deformación vs esfuerzo vertical, Método C (López-Lara, 2008)

4.8. Equipos Utilizados para medir presión de expansión

Los suelos arcillosos se caracterizan por el cambio de volumen que tienen al hidratarse, ya que estas partículas de agua se incorporan a la estructura y por ende hace que la distancia entre interláminas aumente. Si a este cambio de volumen se le ejerce una presión o carga donde la deformación es impedida, a esta se le conoce como presión de expansión (Marcial & Landaeta, 2008).

Existen hoy en día muchos equipos para la medición de presión de expansión, el más utilizado es el edómetro, mejorado por Casagrande, a continuación, se describen los dispositivos más conocidos.

4.8.1. Edómetro

En este método la muestra se introduce en un anillo, el cual impide la deformación lateral del suelo, con dos piedras porosas colocadas una arriba y otra abajo, Se le

coloca un pistón que va conectado a un vástago (no todas las pruebas lo usan), el cual por medio de un micrómetro mide la deformación del suelo. A esta muestra se le coloca una carga (esta dependerá del método que se está utilizando bajo la norma ASTM D-4546) la cual es calculada por el brazo de palanca y la superficie de la pastilla de suelo (figura 25).

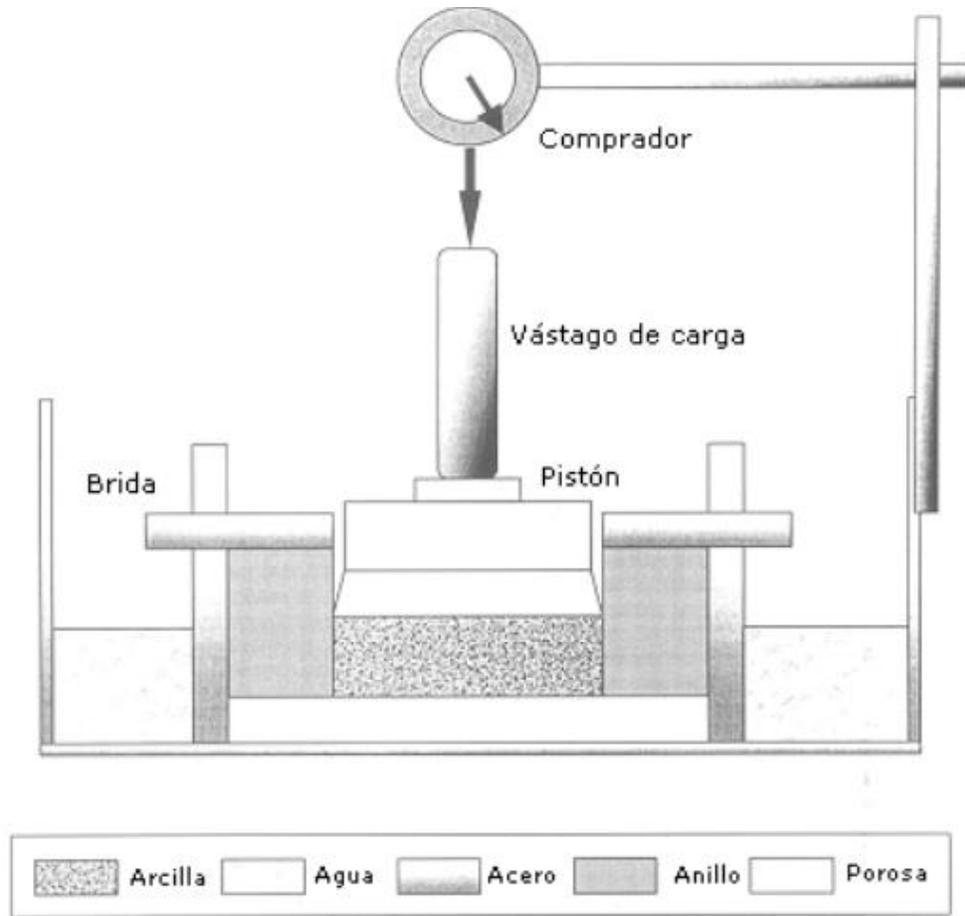


Figura 25. Representación esquemática de un edómetro (Villar, 2001)

4.8.2. Aparato de Lambe

Este equipo tiene como objetivo determinar la expansión o contracción de un suelo de una manera rápida. Las partes de este ensayo se describen en la figura 26.

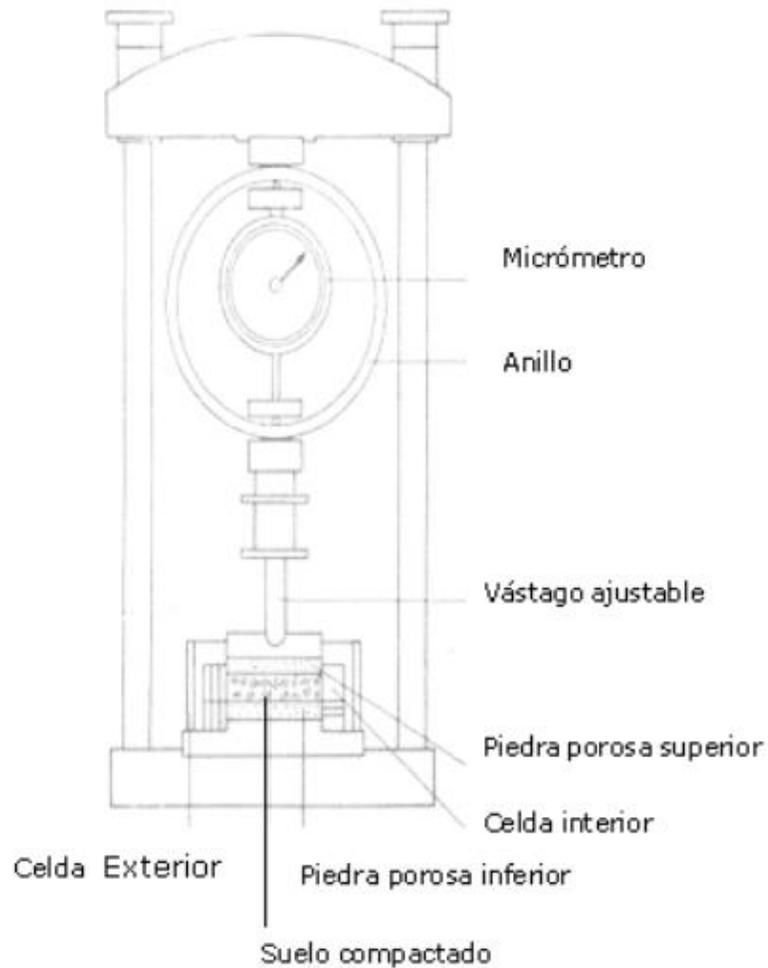


Figura 26. Representación esquemática del Aparato de Lambe (Marcial & Landaeta, 2008)

4.8.3. Equipo de Komine Y Ogata (1994)

Este dispositivo se inspiró en el Aparato de Lambe, pero en este se sustituye el anillo por uno menos deformable. Se compone por un marco de reacción y celdas de carga y consolidación, estas permiten monitorear las presiones durante la saturación de la muestra (figura 27).

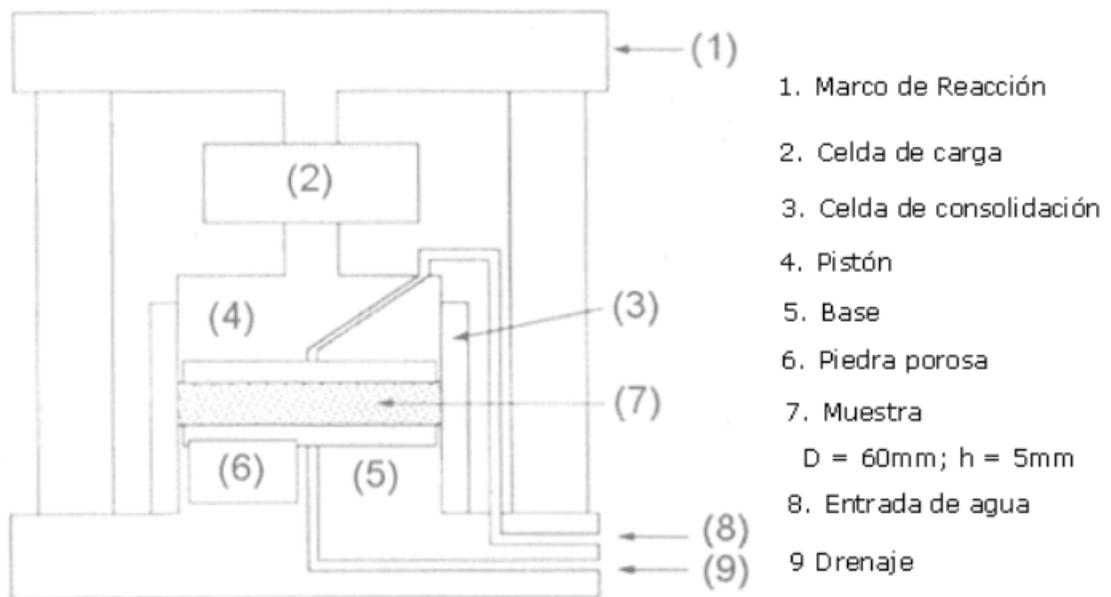


Figura 27. Representación esquemática del Equipo de Komine y Ogata (1994)

4.9. Pruebas de expansión en pruebas remoldeadas

En 2008, López-Lara hace un estudio utilizando el método B de la Norma ASTM-D4546 para hacer una comparativa de muestras inalteradas y remoldeadas. En este análisis se obtuvo un resultado bastante considerable, ya que las muestras remoldeadas presentaron valores de aproximadamente de 50% mayor en la presión de expansión respecto a las pruebas inalteradas bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, se recomienda que para medir la presión de expansión se debe utilizar muestras inalteradas.

4.10. Expansión y presión de carga lateral

Lambe en 1960 desarrollo un método de Potencial de Cambio Volumétrico (PVC), para este análisis las muestras con compactadas en un anillo de consolidómetro con una fuerza de 270 ton-m/m^3 , al cual después de le aplica una carga de 15 kg/cm^2 , se satura la muestra y se le toma lectura después de dos horas, el cual este valor es designado como Índice de Expansión. En la tabla 10 se describe los rangos de PVC y los peligros de expansión.

Tabla 10. Relación entre PVC y peligro de expansión (Chen, 2012)

Rango de PVC	Peligro de Expansión
< 2	No crítico
2-4	Marginal
4-6	Crítico
> 6	Muy crítico

En 2014, López-Lara et al., hace un estudio de la expansión lateral mediante la colocación de huecos en el suelo, a estas muestras se les hicieron pruebas de expansión. Se extrajo aproximadamente el 19% del volumen del material, reduciendo la expansión un 27%, lo cual nos dice que una parte de la expansión que tiene el suelo es horizontal y el resto es de manera vertical. Por lo anterior mencionado, se logra concretar que la expansión lateral que genera el suelo puede ser hasta 1.4 veces mayor que la expansión que se tiene verticalmente, por lo tanto, la expansión horizontal es mucho mayor que la vertical.

Marcial & Landaeta (2008), hacen un estudio experimental de cómo influye la densidad seca con la presión de expansión. Para este estudio se tomaron dos tipos de arcillas, una de mediana expansión y otra de alta expansión. Las muestras fueron compactadas a diferentes densidades con humedades muy bajas. Los materiales que se utilizaron se describen en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de los materiales utilizados (Marcial & Landaeta, 2008)

Propiedades	Arcilla de Maracaibo	Bentonita comercial
Límite Líquido (LL)	65	404
Límite Plástico (LP)	19	54
Peso específico (Gs)	2.67	2.71

Los ensayos se realizaron según la Norma ASTM D-2435.

Se le hizo a cada uno de los materiales cinco pruebas a cinco densidades diferentes, para medir la presión de expansión de cada uno. Los resultados se muestran en la figura 28.

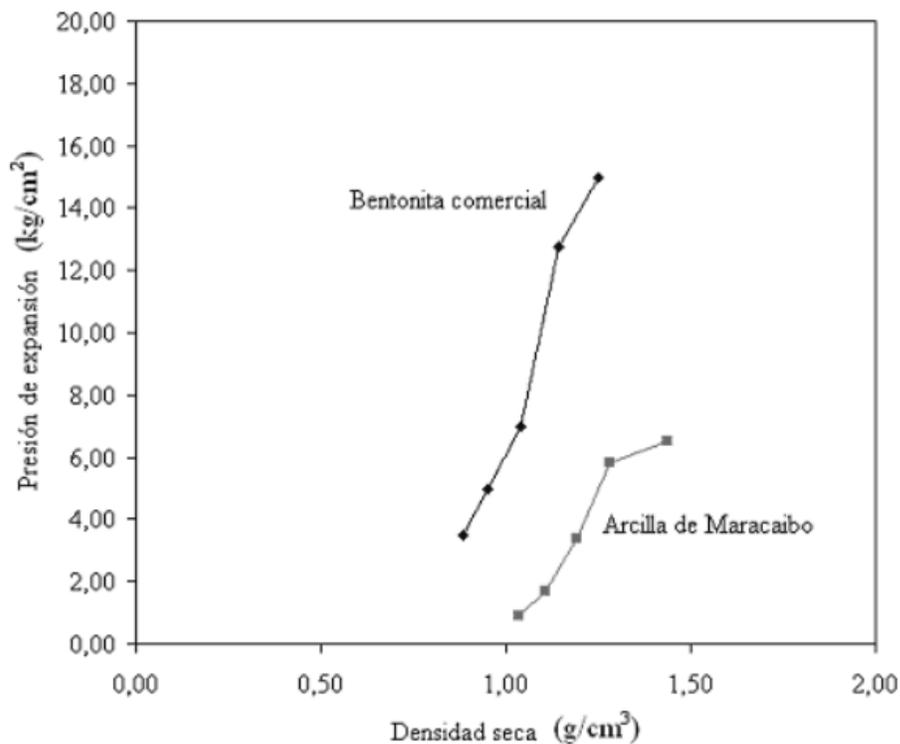


Figura 28. Variación de presión de expansión con diferentes densidades secas (Marcial & Landaeta, 2008)

Estos resultados nos muestran que cuando se tiene una mayor densidad seca en el material hay una mayor presión de expansión.

4.11. Cal

Es un producto de color blanco y amorfo, resultado de la descomposición mediante la quema de roca caliza el cual da como resultado óxido de magnesio mejor conocido como cal, en cantidades más pequeñas también se le puede encontrar sílice, hierro, aluminio, magnesio, fósforo y azufre. La cal tiene diversos usos, sobre todo en la parte de la construcción, estas deben reunir ciertas condiciones en sus propiedades para que la cal se considere aceptable para realizar algún trabajo (ANCADE, 2015).

4.12. Tipos de cal

Es importante considerar que la roca caliza tiene una cantidad distinta de impurezas o materiales que al no eliminarse forman distintos tipos de cal (Parra-Gómez, 2018).

La cal se divide en dos tipos (figura 29), las cales aéreas y las cales apagadas o con propiedades hidráulicas, ambas son formadas de la misma manera, pero cuando se le coloca agua en el proceso, esta cambia de ser una cal viva a una cal apagada.

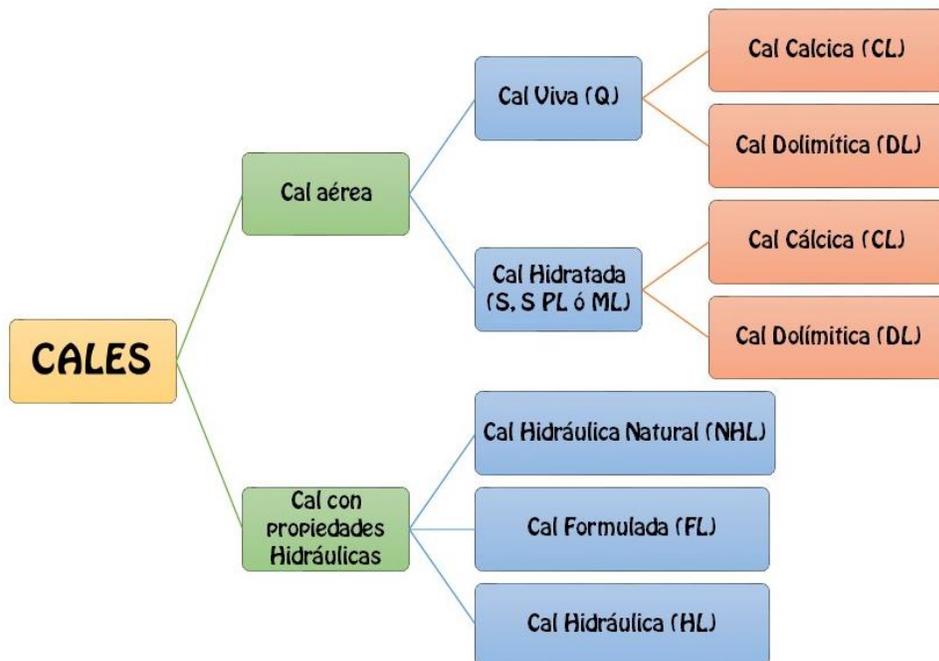


Figura 29. Tipos de cal

Para este proyecto son viables dos tipos de cal: la cal hidratada y la cal viva, ya que en varios estudios realizados anteriormente han dado los mejores resultados para reducir la expansión en suelos arcillosos. Estos tipos de cales tienen la habilidad de absorber agua la cual produce un desprendimiento de calor, y este provoca, dependiendo de la cantidad colocada, que la humedad se reduzca considerablemente, este material produce un intercambio de cationes el cual estabiliza la estructura de las arcillas. Normalmente los porcentajes para

estabilización de suelos expansivos van de porcentajes del 2% al 15%, esto dependerá de tipo de cal y la expansión que tenga el suelo.

En la siguiente tabla se muestran diferentes porcentajes de cal dependiendo el tipo de estabilización que se requiera.

Tabla 12. Porcentajes de cal dependiendo el tipo de estabilización (Fontalvo, Medrano y Nadad, 2006)

Tipo de estabilización	Cantidad de cal (% en peso de suelo seco)		
	Cal viva	Hidrato de Cal	Cal altamente hidratada
Estabilización del suelo: efecto a largo plazo	3-6	4-8	4-12
Mejoramiento de suelos: resultados inmediatos	2-4	2-5	4-8

4.13. Estabilización con Cal

Anteriormente se han mencionado ya los problemas que existen en suelos que contienen gran cantidad de minerales arcillosos ya que estos suelen ser suelos deformables, tener cambios de estado o lo más característico que es el cambio de volumen (expansión o contracción), para estos suelos es necesario hacer algún tipo de mejoramiento (Salinas y Villao, 2019).

La estabilización de suelos es un proceso que busca cambiar las propiedades de estos mejorando su resistencia, durabilidad (a largo plazo) y estabilidad. Para poder definir si un suelo es apto para un mejoramiento debe tener mínimo un 25% de grano fino (pase la malla 200) (Parra-Gómez, 2018).

Lograr una adecuada estabilización y con resultados óptimos, es hacer que el suelo inestable se transforme en un suelo utilizable. Con el avance de equipos y procesos para la construcción, y el mejoramiento de la calidad de la cal, este procedimiento ha sido utilizado en grandes obras de ingeniería, la accesibilidad de este producto

y su bajo costo, hacen el utilizar este tipo de estabilizador, sea un método bastante sustentable.

4.13.1. Ventajas del tratamiento con cal

- Reduce considerablemente el Límite Líquido, y por ende el índice de Plasticidad.
- Genera una barrera resistente al agua.
- Reduce agrietamientos en el suelo.
- Aumenta el pH, el cual favorece a la formación de aluminatos de calcio y silicatos, los cuales ayudan a la unión de partículas.
- Produce un efecto cementante, aumentando la resistencia del suelo.

5. HIPÓTESIS

Las columnas de cal aplicadas en la arcilla permitirán controlar la humedad en el suelo y por ende disminuir la expansión en un 20% respecto al suelo natural, estabilizándolo y manteniendo sus propiedades de resistencia.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo General

Estabilizar arcillas expansivas mediante la aplicación de columnas de cal en el suelo a nivel laboratorio para evitar el cambio de volumen del estrato activo y evitar el daño en la estructura.

6.2. Objetivos específicos

- Establecer el material adecuado (suelo expansivo y cal) para garantizar la estabilidad y reducir la expansión del suelo.
- Obtener el comportamiento expansión-volumen con la introducción de columnas de cal en el suelo.
- Obtener el mejor diseño para lograr minimizar la expansión del suelo sin que pierda su resistencia.

7. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló en tres etapas: Obtención de parámetros del suelo, Modelo del suelo con material y Análisis experimental, las cuales se describen en la figura 30.

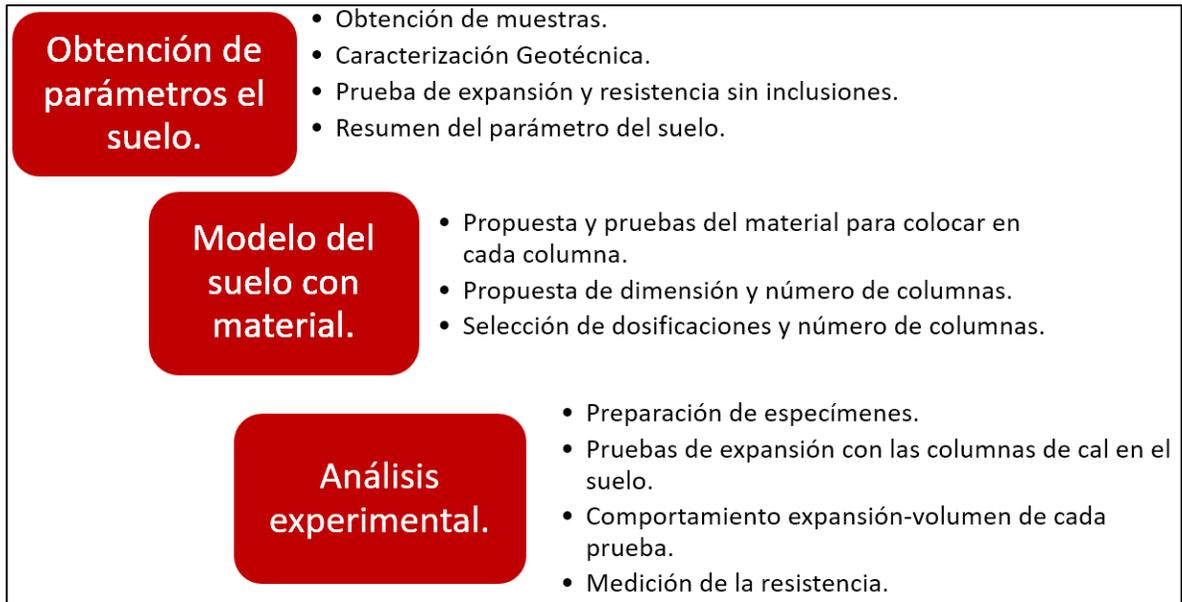


Figura 30. Esquema de la metodología del proyecto

7.1. Obtención de parámetros del suelo

7.1.1. Obtención de muestras

El suelo que se utilizó en este proyecto fue extraído de un predio al cual se le estaban haciendo un estudio de suelos ya que se pretendía dividir en lotes y vender, este se encuentra en el municipio de El Refugio, del estado de Querétaro, México. En esta zona se encontraron suelos expansivos, los cuales son arcillas y limos.

El estado de Querétaro tiene 11,684 km², es el quinto estado menos extenso y se encuentra al centro de la República Mexicana, limita con los estados de Guanajuato y San Luis Potosí al norte, Hidalgo y Estado de México al sur y Michoacán al oeste (Figura 31).



Figura 31. Ubicación de Querétaro, México

Para extraer la muestra se hizo una pequeña excavación, no mayor a 1 metro, ya que la capa que nos interesaba estaba en la parte superior. Se obtuvieron dos muestras inalteradas, las cuales se identificaron y guardaron debidamente para no perder humedad, y también se obtuvieron varias muestras de suelo alterado. El muestreo fue realizado bajo los lineamientos de la Norma ASTM-D420 (1993).

7.1.2. Caracterización Geotécnica

La principal característica que el suelo debería tener es que fuera un suelo arcilloso con potencial expansivo, por lo cual a este suelo se le hicieron diferentes pruebas con el fin de poder conocer sus propiedades índice.

Se llevó a cabo una caracterización geotécnica, de la cual al suelo de la muestra se le hizo diferentes pruebas, como contenido de agua, límites de Atterberg,

granulometría a través de mallas y para la fracción fina la prueba del Hidrómetro, peso específico del suelo, superficie específica (azul de metileno) y peso relativo de los sólidos. Estas pruebas se hicieron bajo las normas de la ASTM a excepción de la prueba de Azul de Metileno, esta se hizo bajo la norma de la SCT.

Contenido de Agua

Este parámetro se debe obtener tan pronto como la muestra llegue al laboratorio, ya que si no puede perder humedad. Para esta prueba se toma una muestra representativa del suelo y se pesa (W_m), la puedes pesar antes o después de colocarla en un recipiente de vidrio (flanera), pero si la pesas en el recipiente es necesario pesar el recipiente antes. La muestra se mete al horno durante 24 horas a una temperatura de 105° y 110° , la temperatura debe de ser constante. Cuando pasa el tiempo se saca la muestra y se vuelve a pesar, este nuevo peso es el peso seco de la muestra (W_s). Para obtener el contenido de agua se utiliza la siguiente ecuación:

$$w\% = \frac{W_m - W_s}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

Este procedimiento es con base en la Norma ASTM D-2216 (2005).

Límites de Consistencia (Atterberg)

Los límites de Atterberg o también conocidos límites de consistencia, solo se utiliza para suelos finos (arenas finas, limos o arcillas), esto para poder conocer su comportamiento dependiendo de su contenido de agua.

Estos límites generalmente son los parámetros más utilizados para poder clasificar el suelo fino y poder correlacionar otros parámetros del suelo. La plasticidad que tiene el suelo depende del contenido de agua que se le agregue o retire y se divide en los siguientes estados (Braja M. Das, 2001):

- **Líquido.** El suelo se comporta como un fluido.
- **Plástico.** El suelo tiende a comportarse como una plastilina.

- **Semisólido.** El suelo se ya se puede considerar un sólido, pero todavía varía su volumen si a este se le retira humedad.
- **Sólido.** El suelo ya no cambia de volumen con el secado.

Los límites de Atterberg son el punto intermedio de estos estados, se puede considerar como la frontera entre uno y otro (Braja M. Das, 2001).

- **Límite Líquido (LL).** Va del estado líquido al plástico, en este punto la cohesión es casi nula.
- **Límite Plástico (LP).** Este pasa de un estado plástico a semisólido.
- **Límite de contracción (LC).** Es el límite que marca el cambio de un estado semisólido a sólido.
- **Índice de Plasticidad (IP).** Es la resta del límite líquido menos el límite plástico.

Otro de los parámetros importantes del suelo es la contracción lineal, este parámetro se mide colocando el suelo con su límite líquido en un molde rectangular, el cual es secado de manera lenta para evitar quebrarse. Cuando el suelo está totalmente seco se mide ese cambio de volumen al que se considera como contracción lineal, de igual manera se mide la contracción volumétrica, la diferencia es el molde, ya no será rectangular, en este caso se utilizará una caja Petri.

Esta prueba fue hecha con la Copa de Casagrande (Límite Líquido), y con base en la Norma ASTM D-4318 (1993).

Granulometría

Este análisis es uno de los más importantes, ya que con él se puede medir los tamaños del suelo, el cual se grafica del mayor al menor en la curva granulométrica. Estos tamaños se dividen en tres partes: Gravas, arenas y finos; y los finos dependiendo su tamaño se dividen en limos o arcillas (figura 32)

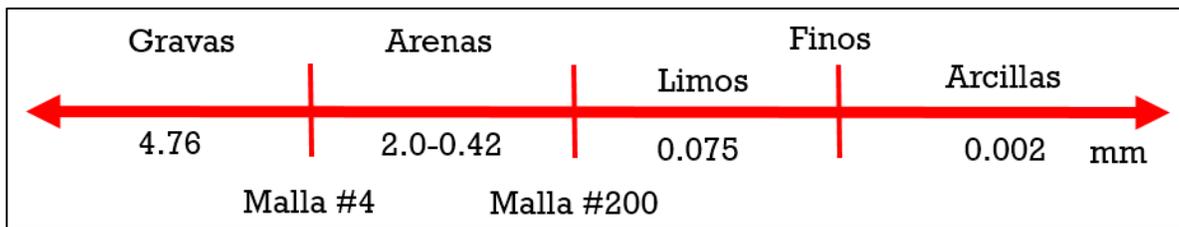


Figura 32. Distribución de tamaños del Suelo

Este procedimiento se hace por una serie de mallas, que va desde a malla #4 hasta la malla #200, lo que se retiene en la malla #4 se considera grava, lo que se queda entre la malla #4 y la #200, se define como arenas y lo que pasa de la malla #200 se considera fino (Juárez-Badillo and Rico-Rodríguez, 2005).

Para medir la partícula que pasa la malla #200 (0.075 mm) se hace a través del Hidrómetro, el cual se basa en un procedimiento de sedimentación, donde las partículas más grandes se van depositando en la parte inferior y así sucesivamente hasta llegar a las partículas más pequeñas.

Estas pruebas se hacen con base a la Norma ASTM D-422 (1990).

Peso específico del suelo

Esta prueba se basa entre el peso del suelo y su volumen. Para obtener este parámetro se tomaron pequeñas muestras inalteradas, se pesan y se recubren con cera para que no pierdan ni humedad ni forma y se vuelve a pesar. Para obtener su volumen se hace por inmersión en agua, el cual se hace introduciendo la muestra recubierta en el contenedor, midiendo el volumen que fue sacado de este. Lo que se obtiene el peso del suelo contenido por unidad de volumen. Para esta prueba se utilizó la Norma ASTM D4531 (1992).

Superficie específica (Azul de Metileno)

Esta prueba es para poder medir el grado de reactividad para materiales finos (partículas menores a 0.075 mm, lo que pasa la malla #200), el procedimiento consiste en ir añadiendo dosificaciones de azul de metileno, hasta que el suelo ya

no pueda absorber más. Mientras más porciones retenga el azul de metileno, esto indica que el suelo es más propenso a ser expansivo, ya que con esto se define que mineral es el más predominante (tabla 13).

Tabla 13. Mineral predominante respecto a su área

Mineral	Área
Caolinita	3-10
Ilita	10-20
Montmorillonita	>100

Esta prueba se hizo con base en la Norma M-MMP-4-04-014/09 de la SCT.

Peso específico relativo de los sólidos

Esta prueba es la relación entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua. El procedimiento se hizo en dos partes, primero se calibró un matraz, el cual se hizo calentándolo con agua a una temperatura de 80° C, se le retiró todo el aire y se fue pesando conforme baja la temperatura, hasta llegar a la temperatura natural del sitio. Posteriormente para la segunda parte, se hizo el mismo procedimiento solamente que aquí se le agrego 50 gramos de material saturado. En la mayoría de los casos se puede obtener un valor promedio del peso específico de la materia sólida (Juárez-Badillo and Rico-Rodríguez, 2005).

Esta prueba se hace con base a la Norma ASTM D-854 (1992).

7.1.3. Prueba de expansión y resistencia sin inclusiones

Prueba de Expansión sin inclusiones

Esta prueba se hace para medir la expansión del suelo bajo la carga in situ o bajo cargas que puedan ser aplicadas por la estructura. El método que se vaya a seleccionar (Norma ASTM D-4546, A, B o C), debe basarse para q la condición en laboratorio sea la más cercana a la que se tiene en sitio, de igual forma dependerá

de las cargas que se les desea aplicar respecto a la construcción que se vaya hacer posteriormente.

En este caso la prueba se hizo bajo la Norma ASTM D-4546 (2008) por el método A, para medir la expansión libre y la presión de expansión. Ambos métodos se describen a continuación.

Lo primero que se hizo fue remoldear las muestras en el anillo del consolidómetro, respecto a los parámetros del suelo in situ, para esto fue necesario medir el anillo y con respecto a su volumen calcular cuánto material y cuánta agua se iba a requerir.

El material que se utilizó en esta prueba se cribó con la malla #40, como lo marca la norma, se secó en horno por 24 hrs para que perdiera totalmente su humedad y posteriormente se le colocó el agua necesaria para que quedará en las mismas condiciones del sitio. El material se compacto dentro del anillo por medio de una prensa, y así se logró finalmente formar la pastilla que se colocará el centro del consolidómetro.

A esta pastilla confinada se le colocan dos papeles filtro, uno abajo y otro arriba, después se le colocan dos piedras porosas, una en el filtro de abajo y otra en el filtro de arriba. Se coloca el anillo con sus papeles filtro y sus piedras porosas dentro de la probeta, a la cual se le coloca una placa, a la cual es a la que se le aplica la carga, pasando esta carga uniformemente al suelo, se monta todo en el consolidómetro, se nivela el brazo de palanca para que quede totalmente vertical y se coloca el micrómetro en cero (Figura 33).

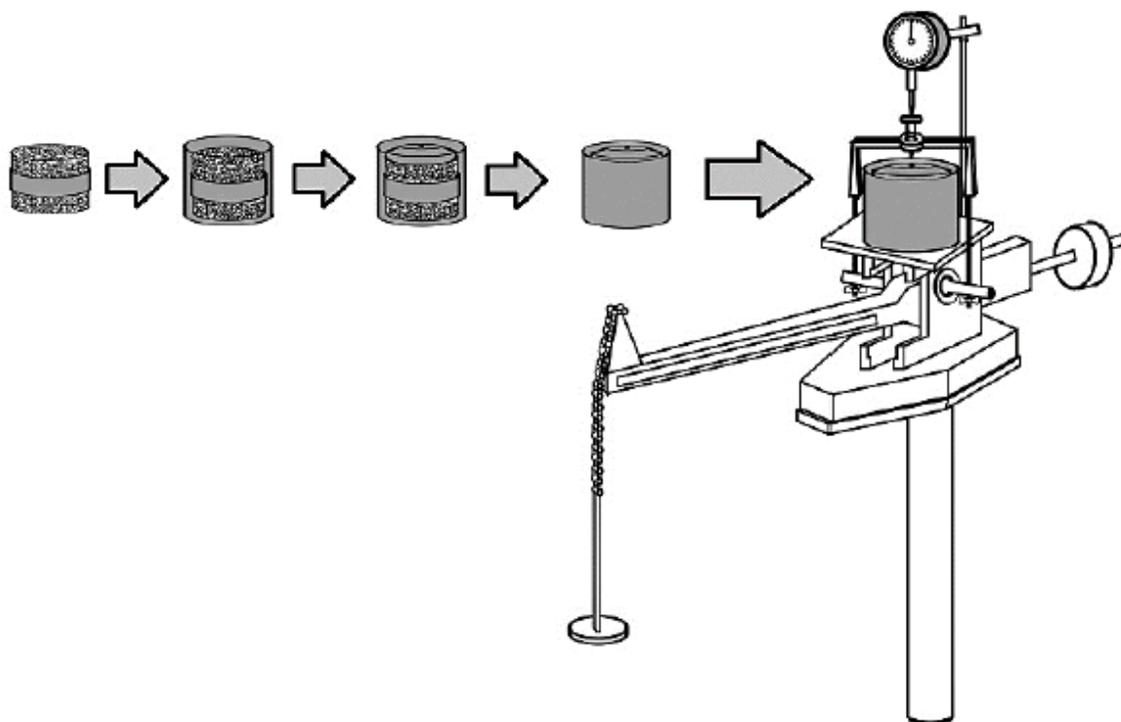


Figura 33. Montaje de la probeta en el consolidómetro (Morales, 2019)

Para inicial la prueba se le coloca la carga que tiene del sitio, la cual se obtiene multiplicando el peso específico (γ_m) por la profundidad (z) de donde fue obtenida la muestra, y en este caso se le colocó una carga estructural para igualar el peso de una estructura ligera (1 ton/m^2).

Se deja actuar la carga hasta que el movimiento del micrómetro este estable (no debe ser mayor a 1 hora), se toma esa lectura y se comienza a saturar la muestra por capilaridad, mientras se va saturando se coloca un cronometro para poder ir tomando las lecturas como marca la norma (30 seg, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8 y 24 horas) posterior a este tiempo se va tomando lecturas cada 24 horas, hasta que la curva cambie de una consolidación primaria a una consolidación secundaria, a este cambio de volumen se le conoce como expansión libre. Cuando se llega a este punto, se le retira el agua poco a poco, se quita la carga y se retira la muestra del consolidómetro, se le quita el exceso de agua a la muestra con un papel filtro y se pesa una muestra considerable, que posteriormente se pone al horno por 24

horas para que se seque y se vuelve a pesar, para así poder obtener el grado de saturación de la muestra. Este procedimiento es para el método A de la norma.

Para medir la presión de expansión, se repite el mismo procedimiento ya antes mencionado, la diferencia de este es que cuando se llega a la consolidación secundaria, no se retira la muestra, a esta se le van aplicando cargas cada 24 horas hasta que el micrómetro vuelve a marcar la lectura inicial, con lo cual se obtiene la presión de expansión, de igual forma durante este proceso se van tomando lecturas. Posteriormente se le hace un retiro de cargas, este proceso debe ser igual a como se las fueron colocando en cada etapa, y de igual forma se toman lecturas.

Finalmente se dibuja la curva la cual muestra el cambio de volumen del suelo respecto al tiempo y la curva de compresibilidad respecto a la carga con la relación de vacíos (método A).

Prueba de resistencia sin inclusiones

Esta prueba se hizo con base a la Norma ASTM D-3080 (2011), la cual tiene como alcance determinar la fuerza de corte de una muestra bajo condiciones de carga por corte directo. Esta muestra se deforma en un rango controlado la cual determina rápidamente las propiedades de resistencia del suelo, esto debido a que el recorrido a través de la muestra es corto y permite con rapidez reducir la presión de poro excesiva. Este ensaye es para todo tipo de suelo (inalterado, remoldeado o compactado), pero el resultado puede ser afectado si a la muestra se le colocan rocas, lo cual limita el tamaño máximo de las partículas.

7.1.4. Resumen del parámetro del suelo

Con base en los parámetros obtenidos en las pruebas que se describieron anteriormente, y siguiendo el método por la Norma ASTM D2487 (1993), el suelo para este proyecto deberá ser clasificado como CH, arcilla de alta plasticidad con un potencial expansivo, con el fin de poder obtener los mejores resultados para esta investigación.

7.2. Modelo del suelo con material

7.2.1. Propuesta y pruebas del material para colocar en cada columna

Con base a la investigación realizada se propuso hacer la investigación con Cal hidratada ya que los porcentajes que se utilizan para reducir la expansión son menores que otros tipos de cal u otros materiales, estos van del 2% al 7% respecto al suelo seco.

Para saber cuánto material o qué porcentaje de cal se iba a utilizar, se hicieron pruebas con diferentes dosificaciones del 2% al 10%, esta prueba fue con base a la contracción lineal que tuvo el suelo con las diferentes mezclas.

7.2.2. Propuesta de dimensión y número de columnas

Para ser más óptima la investigación, se decidió considerar la menor cantidad de columnas en el suelo las cuales iban de 1 a 6 columnas dependiendo el porcentaje de cal y la dimensión del anillo del consolidómetro, ya que no todos eran iguales. De igual forma la dimensión dependería del porcentaje de cal y número de columnas a colocar.

7.2.3. Selección de dosificaciones y número de columnas

Con base a la información se optó por trabajar de 1 a 3 columnas dependiendo el porcentaje de cal a colocar y de igual manera se calculó el diámetro que tendría cada columna, este diámetro fue calculado dependiendo el volumen y área de cada anillo, y se buscó la broca que tuviera el diámetro más adecuado para hacer la perforación cumpliendo el porcentaje de suelo que se deseaba sustituir por cal.

7.3. Análisis experimental

7.3.1. Preparación de especímenes

Cada muestra fue remoldeada con base a la Norma ASTM D-4546, se tomó el suelo seco, se le agrego agua, para obtener la humedad que se tenía en sitio y se confino dentro del anillo, con el fin de igualar condiciones de campo.

A cada anillo se le hizo diferentes números de perforaciones, iban de 1 a 3, para las perforaciones se utilizó una broca, y para no generar algún daño al suelo se utilizó

la broca de forma manual. Se pesó la cal dependiendo el porcentaje que se deseaba sustituir y se le colocó a cada columna la porción adecuada.

La ubicación de las perforaciones se consideró con base al área del anillo, se buscó que fuera de manera uniforme, para una sola columna se colocaba al centro, para dos columnas se dividía el círculo a la mitad y se buscaba el Centroides de cada semicírculo y para tres columnas se dividió el área en tres partes, buscando el Centroides de cada zona (figura 34).

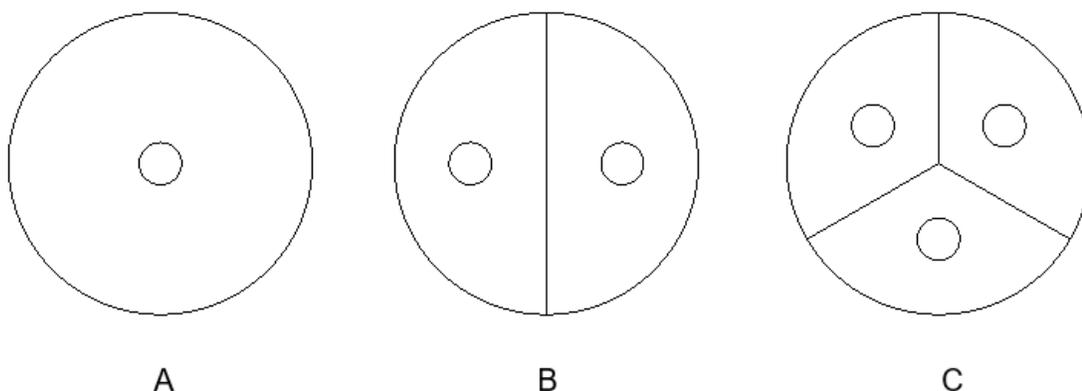


Figura 34. Ubicación de las perforaciones. A) 2%, B) 4% y C) 6%

7.3.2. Pruebas de expansión con columnas de cal

Para los especímenes con las columnas de cal se siguió el mismo procedimiento que marca la Norma ASTM D-4546 (método A) descrito en el punto 7.1.3.

7.3.3. Comportamiento Expansión-Volumen

Con base a los resultados del punto 7.3.2., se determinó el porcentaje expansión que se daba en cada muestra con las columnas de cal respecto al suelo sin inclusiones, y a su vez se pudo observar que el acomodo de columnas y porcentajes de cal si influía en la reducción de expansión.

7.3.4. Medición de Resistencia con columnas de cal

Para los especímenes con las columnas de cal se siguió el mismo procedimiento que marca la Norma ASTM D-3080 descrito en el punto 7.1.3.

8. RESULTADOS

8.1. Obtención de parámetros del suelo

8.1.1. Obtención de Muestras

La muestra se obtuvo en el municipio de El Refugio, al norte de la ciudad de Santiago de Querétaro. Las coordenadas del lugar donde se extrajo el suelo son 359033.00 m E, 2285470.00 m N (Figura 35).



Figura 35. Ubicación del Muestreo (Google Earth)

La muestra se extrajo a una profundidad de aproximadamente 50 centímetros por medio de un pozo a cielo abierto hecho manualmente, se obtuvieron muestras inalteradas y alteradas.

8.1.2. Caracterización Geotécnica

Posterior a la recolección de la muestra se hicieron pruebas de caracterización para poder clasificar el suelo y conocer sus propiedades.

Contenido de Agua

En cuanto el material llegó a laboratorio, se tomó una muestra representativa, se pesó y se metió al horno, de esta forma no perdería su humedad natural, la cual estaba un poco alta porque un día anterior hubo precipitaciones en esa zona.

Con base en el procedimiento que marca en la Norma ASTM D-2216 (2005) se calculó el porcentaje de contenido de agua que tenía el suelo, con la siguiente ecuación:

$$w\% = \frac{46.1-32.8}{32.8} \times 100 = 40.55\% \quad (6)$$

Límites de Consistencia (Atterberg)

Esta prueba fue hecha con la Copa de Casagrande para el Límite Líquido y un vidrio cuadrado aproximadamente de 30 cm por 30 cm para el Límite Plástico, el procedimiento fue con base en la Norma ASTM D-4318 (1993).

- Límite Líquido:** Este análisis se hace para encontrar el punto donde el suelo pasa de tener un estado plástico a tener un comportamiento más parecido a un fluido, este punto depende del contenido de agua que se le agregue. Para esta prueba es necesario utilizar la Copa de Casagrande la cual nos permite colocar el material, con el ranurador se marca una línea al centro y se empieza hacer un movimiento constante para que el suelo se vaya juntando en la parte del centro. El objetivo es encontrar el punto donde la unión sea a los 25 golpes aproximadamente.

Tabla 14. Resultado de Límite Líquido

QRO (LL)							
No	Wf	Wf + Wm		Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)
	CC (g)	CC	No. Golpes	CC	CC	CC	CC
prueba 1	129.7	167.2	26	149.8	37.5	20.1	86.57
prueba 2	117.6	145.3	25	132.5	27.7	14.9	85.91
prueba 3	119.2	148.3	26	135.1	29.1	15.9	83.02
							85.16



Figura 36. Obtención del Límite Líquido

- **Límite Plástico:** Para esta prueba se necesitan hacer rollitos del suelo, los cuales deben medir aproximadamente 10 cm de largo (esta longitud puede variar dependiendo el comportamiento del suelo) por 3 mm de espesor. El procedimiento es pasar cada rollito sobre el vidrio para que este vaya perdiendo humedad hasta que se empiecen a formar grietas posteriormente se les pesa y se deja secar por 24 horas en el horno, pasado ese tiempo se vuelven a pesar y se calcula al Límite Plástico.

Tabla 15. Resultado de Límite Plástico

QRO (LP)						
Prueba	Wf	Wf + Wm	Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)
1	124.2	131.6	129.7	7.4	5.5	34.55
2	126	132.7	131.1	6.7	5.1	31.37
3	123.8	133.7	131.2	9.9	7.4	33.78
						33.23



Figura 37. Obtención del Límite Plástico

- **Índice de Plasticidad:** Este parámetro se calcula mediante la resta del Límite Líquido menos el Límite Plástico (ecuación 7):

$$LP = LL - LP = 85.16\% - 33.26\% = 51.9\% \quad (7)$$

Tabla 16. Resultado de Índice de Plasticidad

QRO (IP)
52.02
54.53
49.24
51.93

- **Contracción Lineal:** Para obtener este parámetro es necesario tomar una muestra cuando esté en su Límite Líquido, la cual se coloca en un molde rectangular, se deja secar de manera lenta para evitar que se rompa y posteriormente se mide para comparar el cambio de volumen, al cual se le conoce como contracción lineal.

Tabla 17. Resultado de Contracción Lineal

Contracción Lineal (QRO)				
Prueba	Capsula	L. Molde	L. Muestra Seca	Contracción Lineal
1	Rectangular	91.63	79.57	13.16%



Figura 38. Obtención de Contracción Lineal

Posterior a estas pruebas se obtuvo la clasificación SUCS por medio de la gráfica de plasticidad (figura 39).

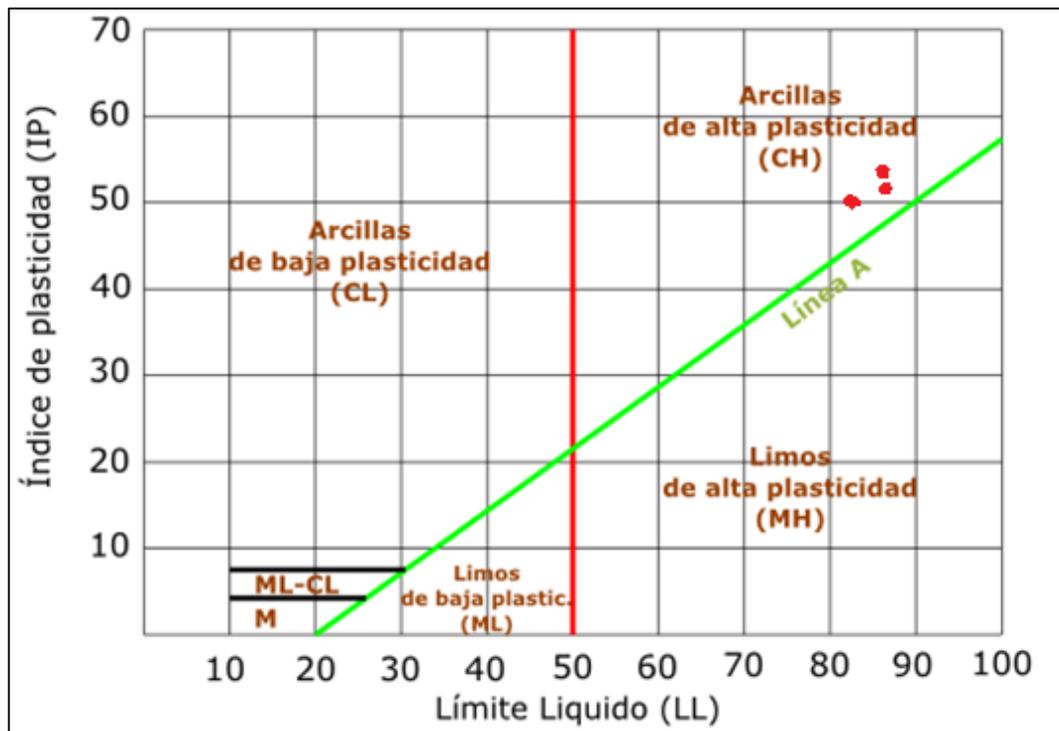


Figura 39. Clasificación del Suelo

Granulometría

Estas pruebas se hacen con base a la Norma ASTM D-422 (1990).

En este caso en particular no fue posible hacer el procedimiento por mallas, ya que el suelo al secarse se cementa y forma partículas más grandes, lo cual nos puede dar un resultado erróneo.

Se trató de hacer una granulometría por lavado, la cual se hace colocando el material en la malla #200 y se le va agregando agua para que las partículas finas del suelo vayan pasando y separar la parte de arenas, de igual forma en este material no se pudo hacer ya que era un procedimiento demasiado tardado.

Para finalizar y poder medir correctamente el tamaño de partículas se utilizó el Hidrómetro el cual nos ayuda a medir el diámetro de cada partícula del suelo.

Tabla 18. Resultado del Hidrómetro

Tiempo seg	Profundidad Z (mm)	Temperatura °	Gs	Constante K	D mm	% que pasa
15	87.57	23	2.76	0.01279	0.03090314	95.43
30	85.57	23	2.76	0.01279	0.02160084	93.26
60	83.57	23	2.76	0.01279	0.01509455	88.92
120	80.57	23	2.76	0.01279	0.01048013	84.59
300	76.57	23	2.76	0.01279	0.00646159	75.91
600	72.57	23	2.76	0.01279	0.00444809	69.40
900	70.57	23	2.76	0.01279	0.00358145	65.07
1800	66.57	23	2.76	0.01279	0.00245965	58.56
3600	63.57	23	2.76	0.01279	0.00169959	52.05
7200	60.57	23	2.76	0.01279	0.00117309	43.38
14400	58.57	23	2.76	0.01279	0.00081569	34.70
28800	57.57	23	2.76	0.01279	0.00057184	28.20
86400	56.57	23	2.76	0.01279	0.00032727	23.86
172800	55.57	23	2.76	0.01279	0.00022936	21.69

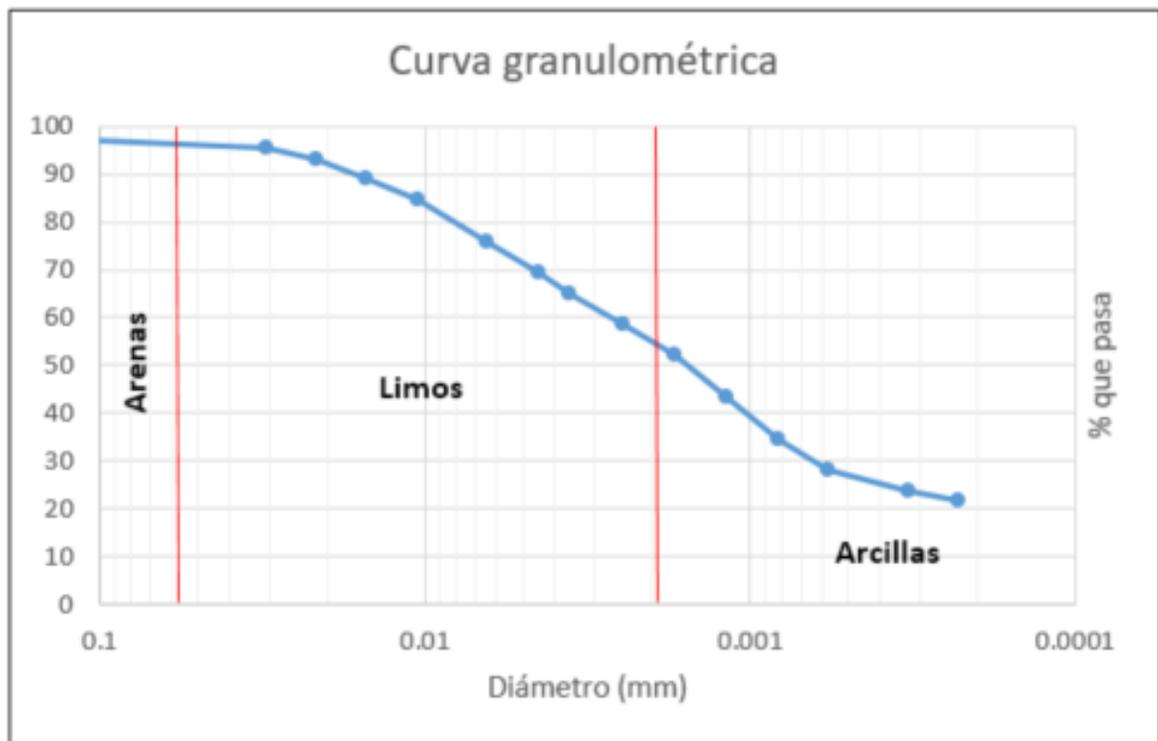


Figura 40. Curva granulométrica

Peso específico del suelo

Para esta prueba se utilizó la Norma ASTM D4531 (1992), se tomaron varias muestras de suelo inalterado para poder sacar el resultado más exacto.

Tabla 19. Resultado de Peso específico

Muestra	Peso natural g	c/cera g	Vp	Agua			Ym
				ml	a+p	ml (exacto)	
1	105.8	122.7	17.42	79	189.7	79.57	1.70
2	92.4	114.2	22.47	83	193.7	83.50	1.51
3	72.3	88.5	16.70	67	176.8	66.90	1.44
4	58.5	69.7	11.55	53	162.8	53.14	1.41
5	31.4	39.4	8.25	26	134.8	25.64	1.81
6	56.2	65.6	9.69	45	154.1	44.60	1.61
						Promedio	1.58

Superficie específica (Azul de metileno)

Esta prueba se hizo con base en la Norma M-MMP-4-04-014/09 de la SCT, el resultado de esta prueba fue de 11.6 ml/g a la cual se le hicieron los siguientes cálculos (tabla 20):

Tabla 20. Resultado de Azul de Metileno

Valor azul total	ml/g	11.6
Índice de Nocividad	ml/g	11.6
Coloides	ml/g	11.6
Valor azul coloides	ml/g	1160
No. De moles	mol ml/g ²	3.63
No. De moléculas	mol ml/g ²	2.18 x 10 ²⁴
Superficie específica	m ² /g	2,834,000
Superficie específica (corrección)	m ² /g	288.34*

*La corrección se hizo con base a la propuesta de Narsilio

Como se observa en la tabla 20 la superficie específica corregida nos marca que el mineral predominante en este suelo es la montmorillonita con base a los datos que se encuentran en la tabla 13.



Figura 41. Prueba de Azul de Metileno

Peso específico relativo de los sólidos

Esta prueba se hace con base a la Norma ASTM D-854 (1992), la cual primero se calibro el matraz y posteriormente se realizó la prueba dando los siguientes resultados (tabla 21):

Tabla 21. Resultado de Peso Específico relativo de los sólidos

Matraz N°	3
Temperatura °C	23
Peso matraz, agua y suelo (Wfws)	722.2
Peso matraz y agua aforado (Wfw)	690.3
Peso del Suelo seco (Ws)	50
Ss	2.76

Como se observa en la tabla 21 se puede corroborar que el mineral predominante de este suelo es la montmorillonita ya que la densidad de sólidos de este tipo de suelos suele estar entre 2.65 y 2.80 (Braja M. Das, 2012).

8.1.3. Prueba de expansión y resistencia sin inclusiones

Prueba de Expansión sin inclusiones

En esta prueba se utilizaron dos muestras, la primera fue inalterada y la segunda fue remoldeada igualando condiciones naturales. Se consideró una carga de 1.0 ton/m² (9.81 kPa) los resultados se muestran en la tabla 22 y figura 42.

Tabla 22. Resultado de Expansión libre

Tipo de suelo	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre
Remoldeado	1.98	2.2285	12.55%
Inalterada	1.97	2.1330	8.27%

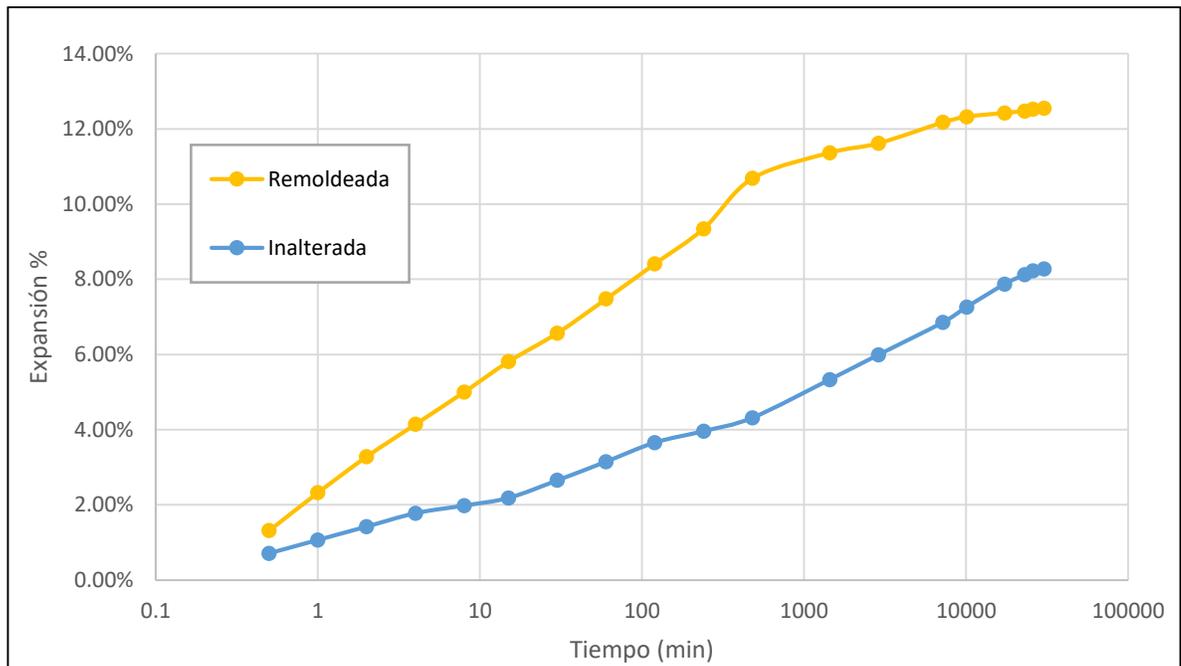


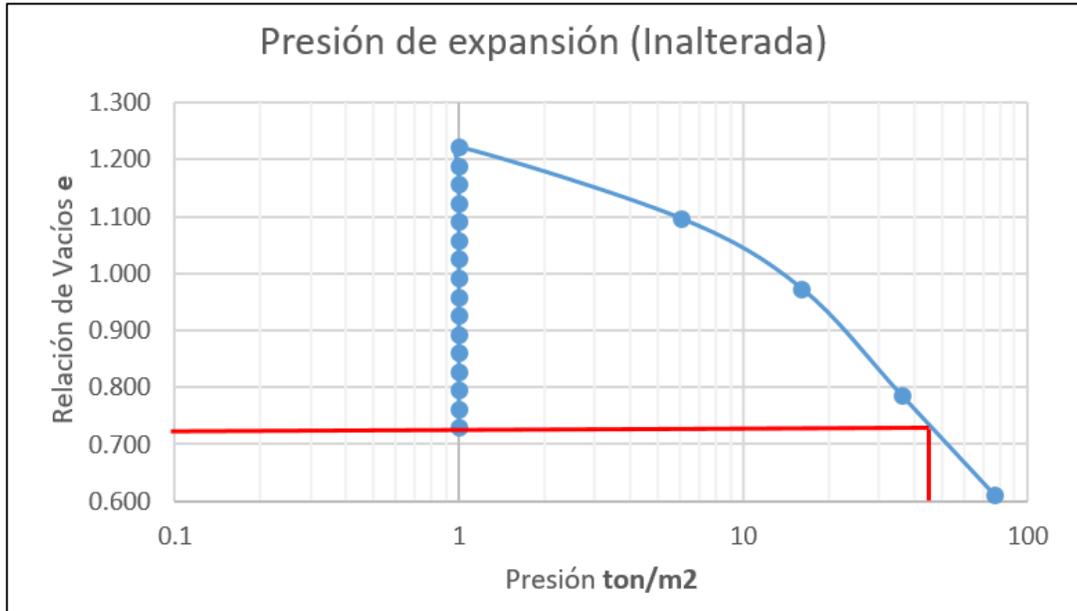
Figura 42. Expansión libre en muestras sin inclusiones

Se puede observar que en la muestra remoldeada la expansión es mayor, esto es provocado por el reacomodo de partículas (Rodríguez Morales, 2015).

- **Presión de expansión**

Esta prueba se hizo de dos formas:

- Inalterada



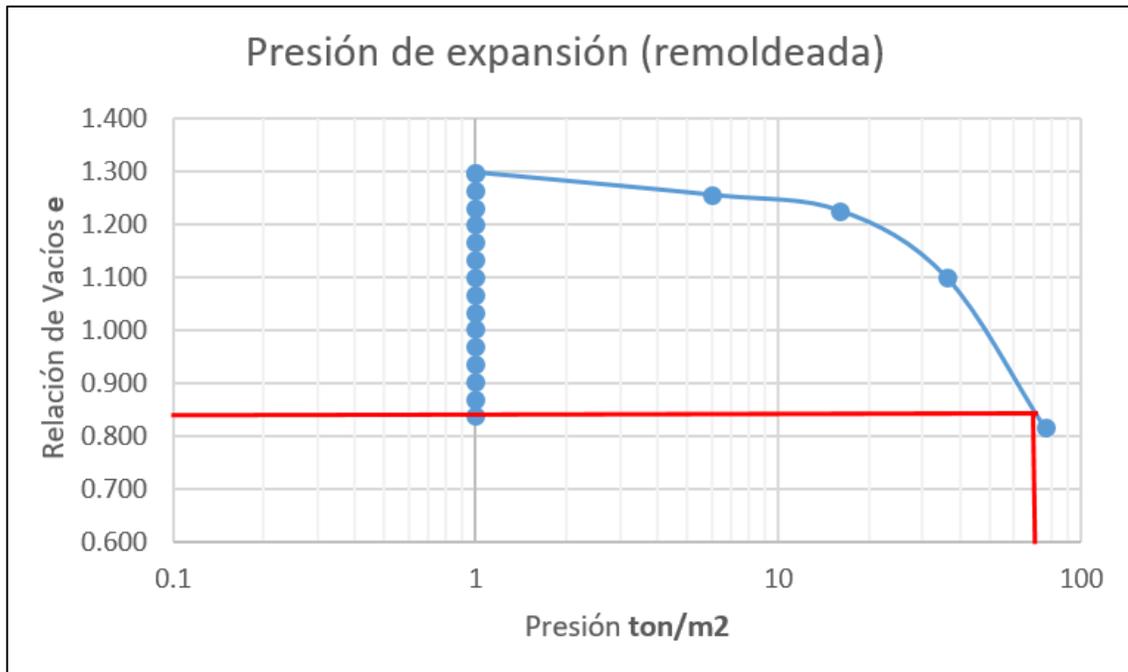


Figura 44. Presión de expansión en muestra Remoldeada

Para la muestra remoldeada la presión aumento considerablemente (figura 44) y nos dio como resultado una presión de expansión de 70 ton/m² (700 kPa).

Estos resultados comprueban la teoría que presenta López-Lara (2008) que las muestras remoldeadas presentan valores de aproximadamente de 50% mayor en la presión de expansión respecto a las pruebas inalteradas bajo las mismas condiciones.

Prueba de Resistencia sin inclusiones

Esta prueba se realizó el ensaye de corte directo con base en la norma ASTM D-3080 (2011), se realizó con tres cargas diferentes (1.0, 1.5 y 2.0 ton/m²) y de manera saturada (figuras 45 y 46), dándonos los valores de la figura 47.

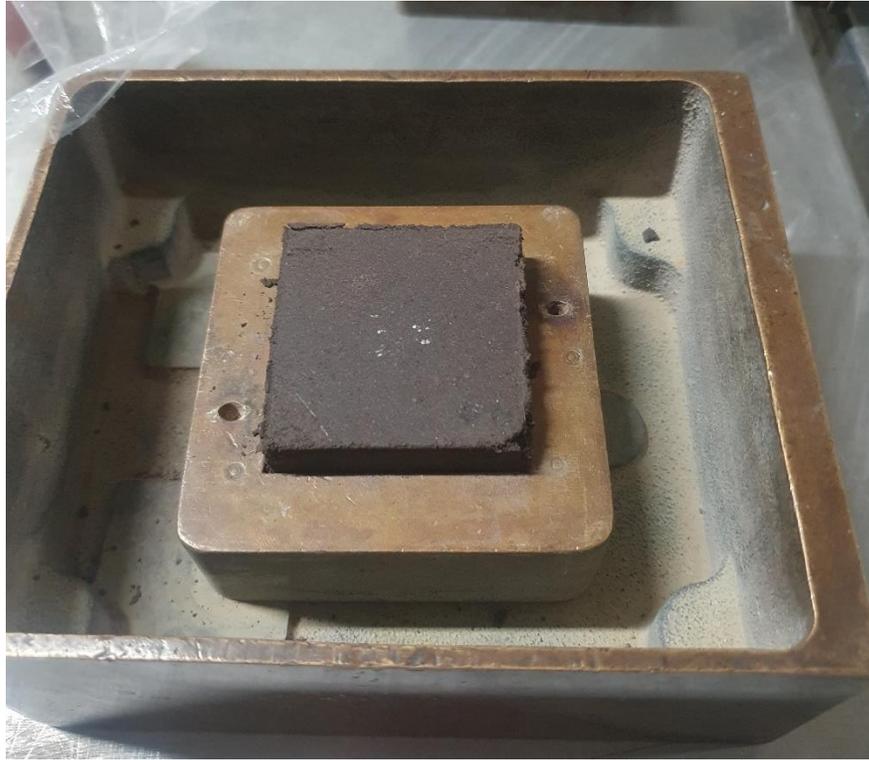


Figura 45. Muestra de suelo para prueba de corte directo



Figura 46. Prueba de corte directo

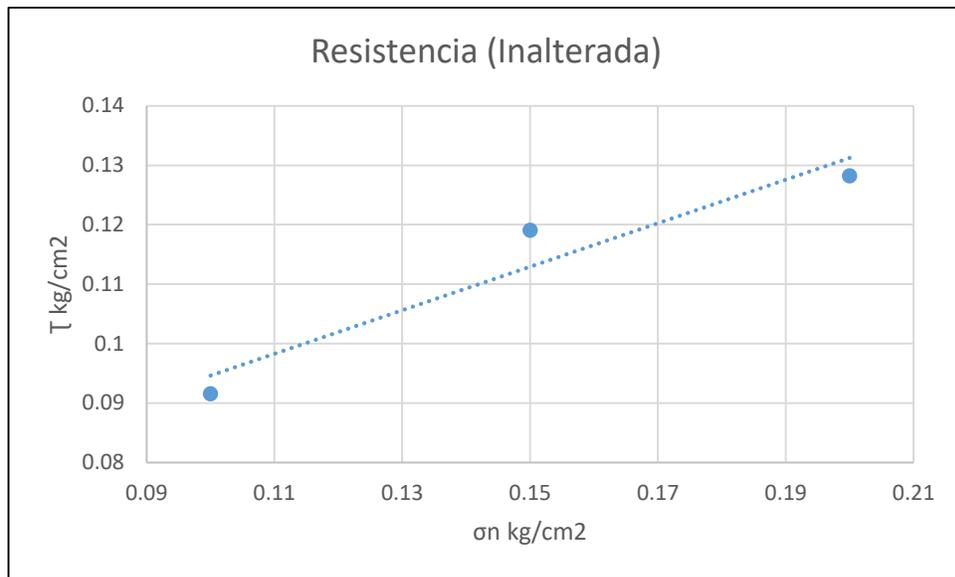


Figura 47. Resistencia sin inclusiones

8.1.4. Resumen de las propiedades medidas en el suelo

Con base a las pruebas realizadas se procedió a clasificar el material, lo cual los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Propiedades del suelo

Profundidad	m	0.0-0.5
Contenido de Agua	w	40.55%
Grava	G	0%
Arena	A	5%
Finos	F	95%
Limos	M	40%
Arcillas	C	55%
Límite Líquido	LL	85.16%
Límite Plástico	LP	33.23%
Índice de Plasticidad	IP	51.93%
Contracción Lineal	CL	13.16%
Peso específico relativo de los sólidos	Ss	2.76
Peso específico de la masa de suelo	γ_m (g/cm ³)	1.58
Relación de vacíos	e	1.47
Porosidad	η	59%
Grado de saturación	Gw	76.13%
Expansión libre (remoldeada)	-	12.55%
Expansión libre (inalterada)	-	8.27%
Presión de expansión (remoldeada)	ton/m ²	70.0
Presión de expansión (inalterada)	ton/m ²	44.6
Superficie específica	m ² /g	288.34*
Clasificación	SUCS	CH
Color	-	Negra
Descripción	Arcilla Inorgánica de alta compresibilidad	

*La corrección se hizo con base a la propuesta de Narsilio

8.2. Modelo del suelo con material

8.2.1. Propuesta y pruebas del material para colocar en cada columna

Para este proyecto se hizo un análisis con diferentes porcentajes de cal en el suelo, iban del 2% al 10% incrementando cada 2%, esta prueba se hizo con base en la contracción lineal teniendo el suelo con el límite líquido, los resultados se muestran en la tabla 24 y la figura 48.

Tabla 24. Contracción lineal

Contracción Lineal (QRO) suelo + cal					
Prueba	Capsula	L. Molde	Cal	L. Muestra Seca	Contracción Lineal
1	Rectangular	91.63	0%	79.57	13.16%
2	Rectangular	91.63	2%	81.35	11.22%
3	Rectangular	91.63	4%	82.80	9.64%
4	Rectangular	91.63	6%	84.70	7.56%
5	Rectangular	91.63	8%	83.65	8.71%
6	Rectangular	91.63	10%	83.78	8.57%

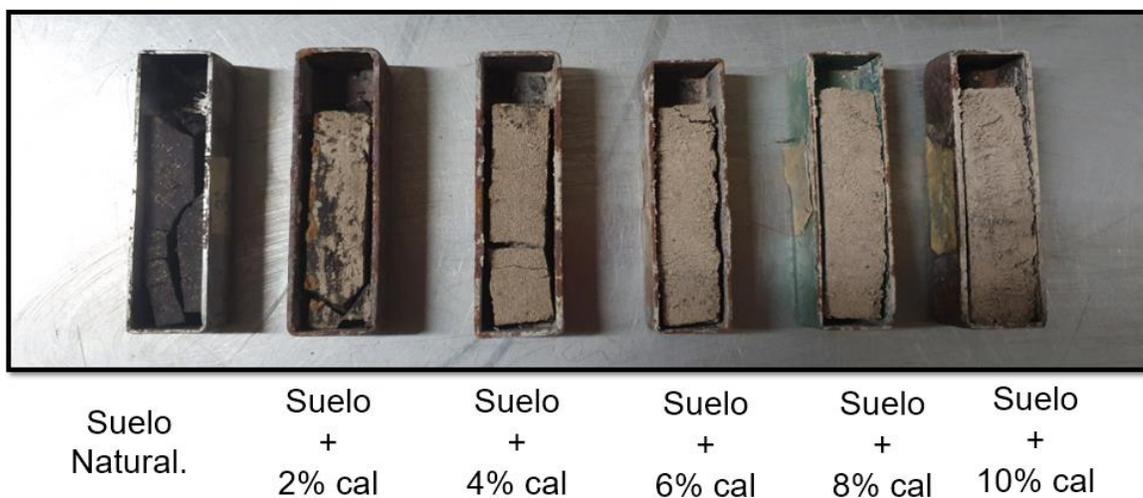


Figura 48. Expansión libre en muestras sin inclusiones

Con base a los resultados de la tabla 24 se optó por utilizar los porcentajes del 2% al 6%, ya que las diferencias que había entre el 6% al 10% era menores.

8.2.2. Propuesta de dimensión y número de columnas

Para esta investigación el principal factor es hacer este método lo más práctico posible, por lo cual se decidió perforar el menor número de columnas (1, 2 y 3), con los porcentajes de 2%, 4% y 6%. Las dimensiones de las columnas fueron calculadas respecto al volumen que se necesitaba retirar para colocar la cal.

Este cálculo se hizo con base al volumen de cada anillo (todos eran diferentes), el cual se analizó buscando el área que se necesitaba retirar en cada perforación, como se muestra en la tabla 25.

Tabla 25. Áreas de columnas

Con.	% retenido	Vol. Suelo	Vol. Cal	Área Cons.	Área retirada
1	2%	97.40	1.99	50.27	1.01
	4%	95.42	3.98		2.01
	6%	93.43	5.96		3.02
2	2%	89.94	1.84	46.49	0.93
	4%	88.10	3.67		1.86
	6%	86.26	5.51		2.79
4	2%	86.31	1.76	44.24	0.9
	4%	84.55	3.52		1.8
	6%	82.79	5.28		2.7
C1	2%	38.44	0.78	19.61	0.4
	4%	37.65	1.57		0.8
	6%	36.87	2.35		1.2
C2	2%	38.37	0.78	19.58	0.4
	4%	37.59	1.57		0.8
	6%	36.81	2.35		1.2

Cuando se obtuvo el área de cada perforación se buscaron los diámetros de las brocas que se tienen en el mercado, esto con el fin de poder hacer la perforación lo más limpia y rápido posible, este análisis nos dio los resultados de la tabla 26.

Tabla 26. Dimensiones de brocas

D. broca	0.76	0.64	0.79	0.95	1.27	0.32	0.48	1.11	1.59	1.91	0.71	1.072
Broca	3/10	1/4	5/16	3/8	1/2	1/8	3/16	7/16	5/8	3/4	9/32	27/64
A. broca	0.46	0.32	0.49	0.71	1.27	0.08	0.18	0.97	1.98	2.85	0.40	0.90
	2.20	3.17	2.03	1.41	0.79	12.70	5.64	1.04	0.51	0.35		
	4.41	6.35	4.06	2.82	1.59	25.40	11.29	2.07	1.02	0.71		
	6.61	9.52	6.10	4.23	2.38	38.10	16.93	3.11	1.52	1.06		
	2.04	2.94	1.88	1.30	0.73	11.74	5.22	0.96	0.47	0.33		
	4.08	5.87	3.76	2.61	1.47	23.49	10.44	1.92	0.94	0.65		
	6.12	8.81	5.64	3.91	2.20	35.23	15.66	2.88	1.41	0.98		
	1.94	2.79	1.79	1.24	0.70	11.18	4.97	0.91	0.45	0.31		0.98
	3.88	5.59	3.58	2.48	1.40	22.35	9.93	1.82	0.89	0.62		1.96
	5.82	8.38	5.36	3.73	2.10	33.53	14.90	2.74	1.34	0.93		2.94
	0.86	1.24	0.79	0.55	0.31	4.95	2.20	0.40	0.20	0.14	0.98	
	1.72	2.48	1.59	1.10	0.62	9.91	4.40	0.81	0.40	0.28	1.96	
	2.58	3.72	2.38	1.65	0.93	14.86	6.61	1.21	0.59	0.41	2.94	
	0.86	1.24	0.79	0.55	0.31	4.95	2.20	0.40	0.20	0.14	0.98	
	1.72	2.47	1.58	1.10	0.62	9.89	4.40	0.81	0.40	0.27	1.96	
	2.58	3.71	2.37	1.65	0.93	14.84	6.59	1.21	0.59	0.41	2.93	

Lo que se observa en la tabla 26 es que las brocas no coincidían a un 100% con las dimensiones de perforaciones por lo cual se optó por seleccionar las que se acercaban más al área que se necesitaba, las cuales están marcadas con color amarillo.

8.2.3. Selección de dosificaciones y número de columnas

Con base en los resultados de dosificaciones de cal y número de columnas se optó por desarrollar los modelos que se muestran en las figuras 49 a la 52:

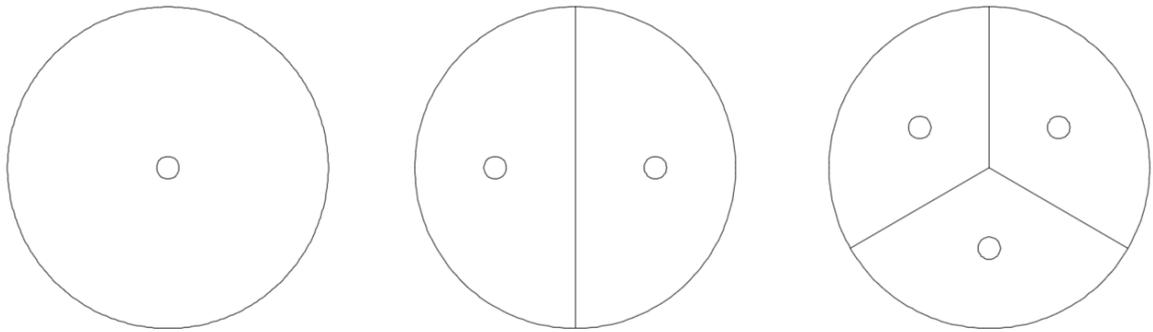


Figura 49. Ubicación de las perforaciones. A) 2%, B) 4% y C) 6% de cal

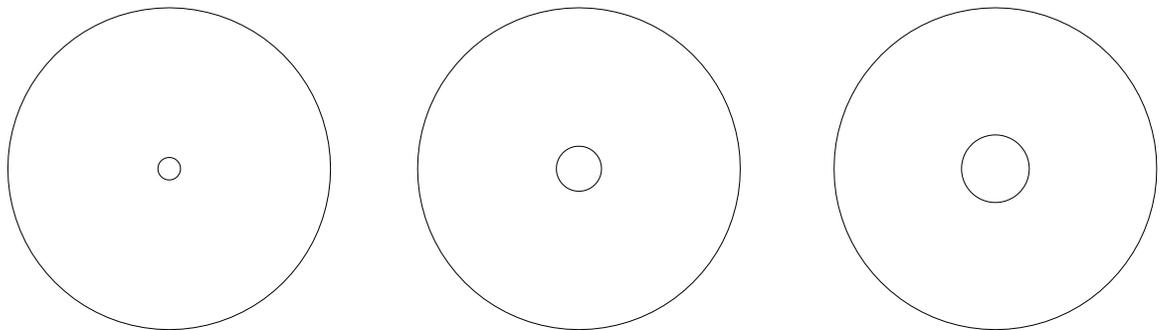


Figura 50. Ubicación de las perforaciones con 2%, 4% y 6% de cal para una columna

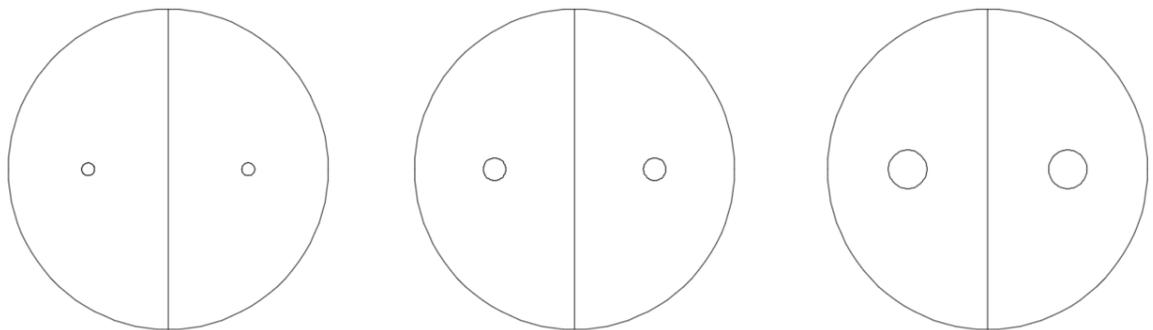


Figura 51. Ubicación de las perforaciones 2%, 4% y 6% de cal para dos columnas

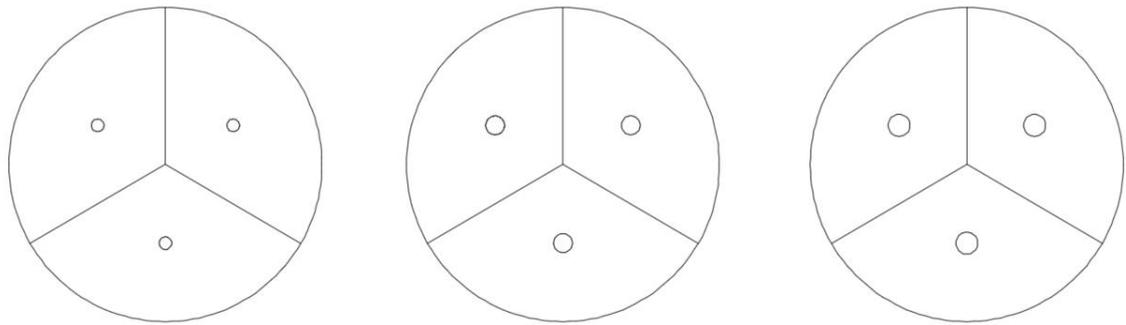


Figura 52. Ubicación de las perforaciones 2%, 4% y 6% de cal para tres columnas

Las dimensiones de las columnas variaban respecto a la cantidad de cal que se necesitaba colocar como se muestra en las tablas 25 y 26, ya que en la figura 49 solo se deseaba colocar una columna con los diferentes porcentajes de cal, lo cual no es lo mismo que en la figura 52, ya que en esta los porcentajes de cal (2%, 4% y 6%) se necesitan repartir en 3 columnas, por ende, la dimensión de la columna cambiaba.

Posterior a definir los modelos se procedió a preparar especímenes y hacer las pruebas.

8.3. Análisis experimental

8.3.1. Preparación de especímenes

Para poder preparar los especímenes, se tomaron los parámetros del suelo que se encuentran en la tabla 22, el suelo se depositó en los anillos y se compactó para que se pudiera igualar a las condiciones que se tenían in situ (figuras 53 y 54). A cada anillo se le colocó una cantidad de columnas (estas se calcularon dependiendo el porcentaje de cal que se necesitaba) para así proceder hacer la prueba y poder comparar los resultados con lo que nos dio en el suelo sin inclusiones.



Figura 53. Colocación de material para hacer la pastilla



Figura 54. Compactación del material para crear la pastilla

Para la colocación de la cal primero se hizo una perforación con una broca (figuras 55 y 56) quedando el hueco hasta el otro lado de la pastilla (figura 57).



Figura 55. Ubicación de la broca para hacer la columna



Figura 56. Perforación de pastilla



Figura 57. Hueco para colocar la cal

Posteriormente se acomoda la pastilla en el molde (figura 58) con su respectivo filtro en la parte de abajo, ha este se le colocó un pequeño embudo para así evitar que la cal se regará en la muestra (figura 59), el porcentaje que se le colocaría a cada columna se calculó con base en el material seco (arcillas) que contenía la pastilla, se pesó la cal y se colocó en cada columna (figura 60).



Figura 58. Preparación de especímenes



Figura 59. Colocación de Embudo



Figura 60. Columna de Cal

Al tener la columna ya lista, se le pone el papel filtro en la parte de arriba (figura 61), se le coloca la piedra porosa y se cubre todo el molde con una capa de plástico el cual evitó que el agua se evaporara cuando se estuvo haciendo la prueba (figura 62).



Figura 61. Colocación de papel filtro

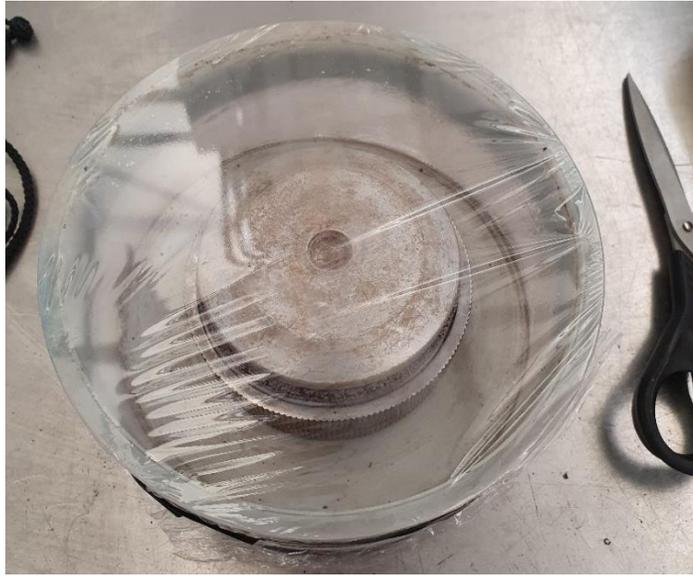


Figura 62. Colocación de papel filtro

Cuando ya se tiene el molde listo, este se coloca en el consolidómetro y se procede a ejecutar la prueba (figura 63).



Figura 63. Colocación de molde en consolidómetro

8.3.2. Pruebas de expansión con columnas de cal

Las pruebas de expansión se hicieron como se describe en el punto 7.1.3 bajo la Norma ASTM D-4546 (2008), la única diferencia que se tiene en ese punto es que en estas se les colocaron las columnas de cal como se describió en el punto anterior (figuras 64, 65 y 66). La figura 64 está mostrando la parte de abajo del anillo.



Figura 64. Prueba con 1 perforación (2% cal)



Figura 65. Prueba con 2 perforaciones (4% cal)



Figura 66. Prueba con 3 perforaciones (6% cal)

Como se puede observar en las imágenes la cal se mantuvo en las perforaciones ayudando a controlar la humedad que tenía el suelo en la colindancia de cada columna.

8.3.3. Comportamiento Expansión-Volumen

El comportamiento que tuvo el suelo con las columnas de cal fue bastante positivo, ya que en todas las pruebas tuvo una reducción mínima del 20%. Los resultados se pueden ver en la tabla 27 y la figura 67.

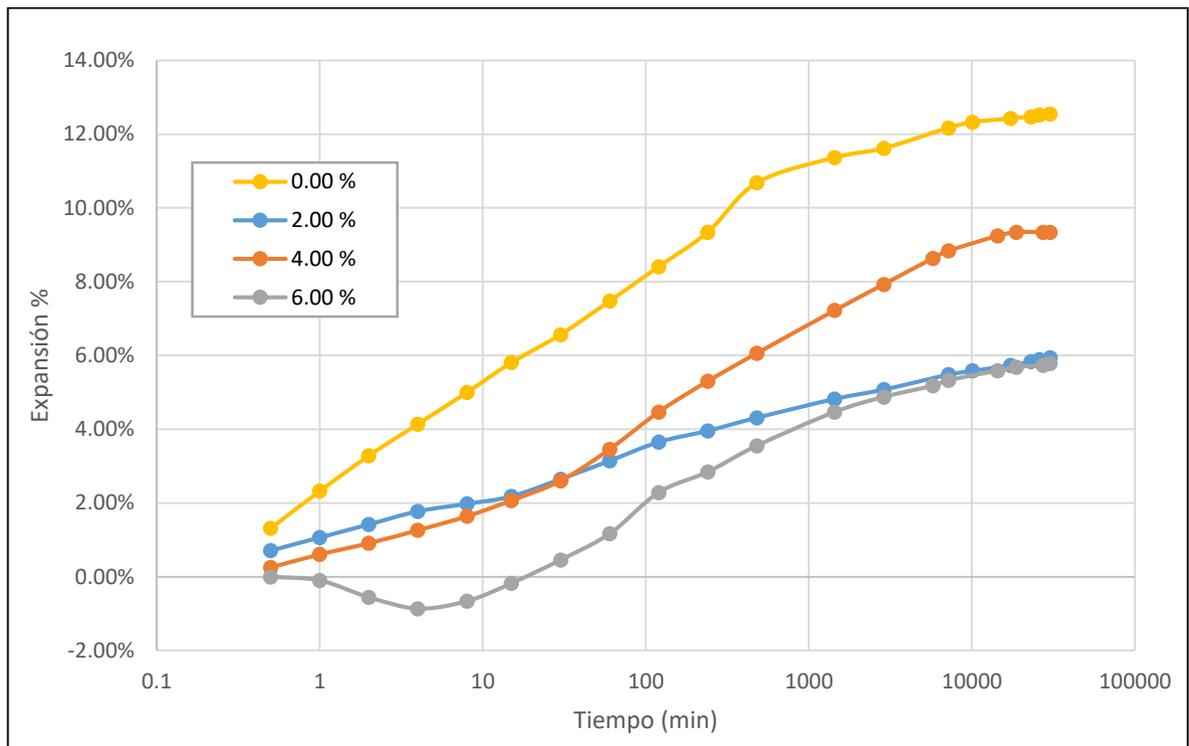


Figura 67. Resultados de expansión libre con muestra remoldeada sin inclusiones y muestras con columnas de cal

Tabla 27. Resultados de expansión libre con 1.0 ton/m²

Cal	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre	Exp. Reducida	%
0.00%	1.9800	2.2285	12.55%	-	-
2.00%	1.9700	2.0870	5.94%	6.61%	52.68
4.00%	1.9800	2.1650	9.34%	3.21%	25.55
6.00%	1.9700	2.0840	5.79%	6.76%	53.89

Estos resultados se midieron con el cambio de volumen de cada muestra y se calculó la expansión en cada lectura. Lo que pudimos detectar es que el suelo con el 6% de cal tuvo un pequeño colapso al principio de la prueba, esto es provocado por el reacomodo de partículas.

También se pudo observar que cuando al suelo se le hizo dos columnas (4% cal), la expansión fue mucho menor que las otras dos opciones, por lo cual se detectó que el acomodo de las columnas si podría influir en la reducción de expansión para estas pruebas (figura 68).

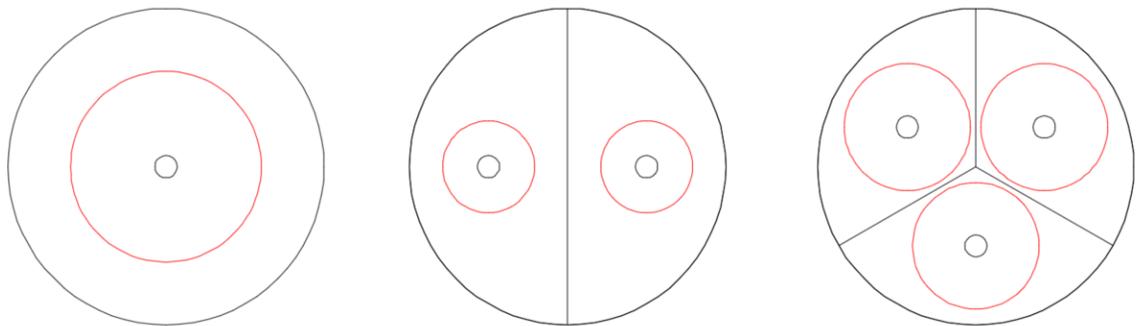


Figura 68. Área donde intervenía la cal

Por lo que en la figura 68 se puede observar las áreas de influencia que se tenían en cada una de las pruebas con base a los resultados de la tabla 27.

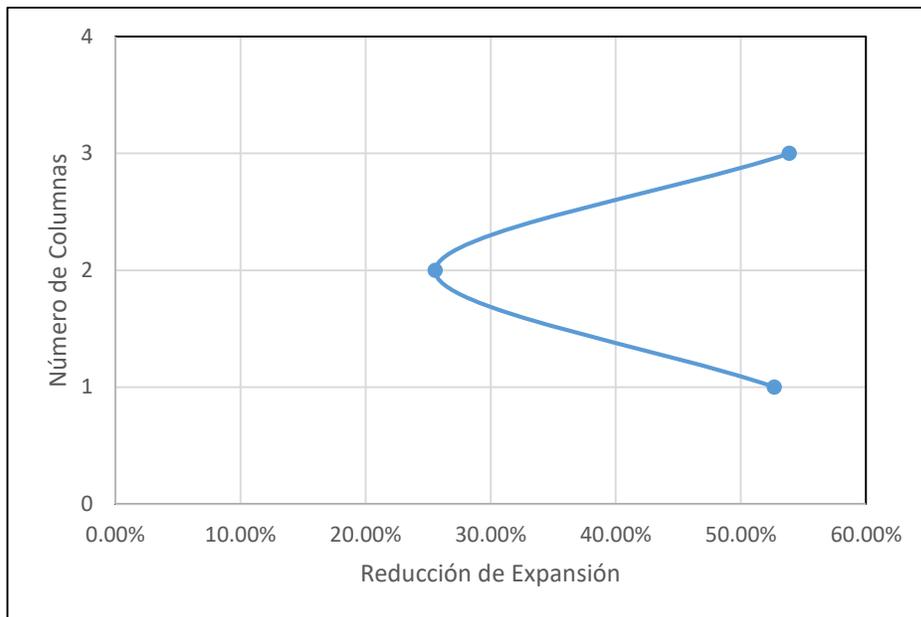


Figura 69. Porcentaje reducido dependiendo del número de columnas

Se observa en la figura 69 el porcentaje de expansión que se redujo en cada prueba y lo que se puede ver es que para 1 y 3 columnas se tuvo una reducción parecida (aproximadamente del 53%) y que en la prueba de 2 columnas solo se redujo un 25% de la expansión total del suelo en estudio, por lo cual para fines prácticos la mejor solución es solamente perforar una sola columna al centro de área.

Posteriormente se hicieron pruebas para saber si la reducción de expansión dependía del acomodo de las columnas como se muestra en la primera experimentación o si esto dependía del porcentaje de cal colocado al suelo.

Estas pruebas se presentan en las figuras 70, 71, 72 y 73, junto con las tablas 28 y 29.

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

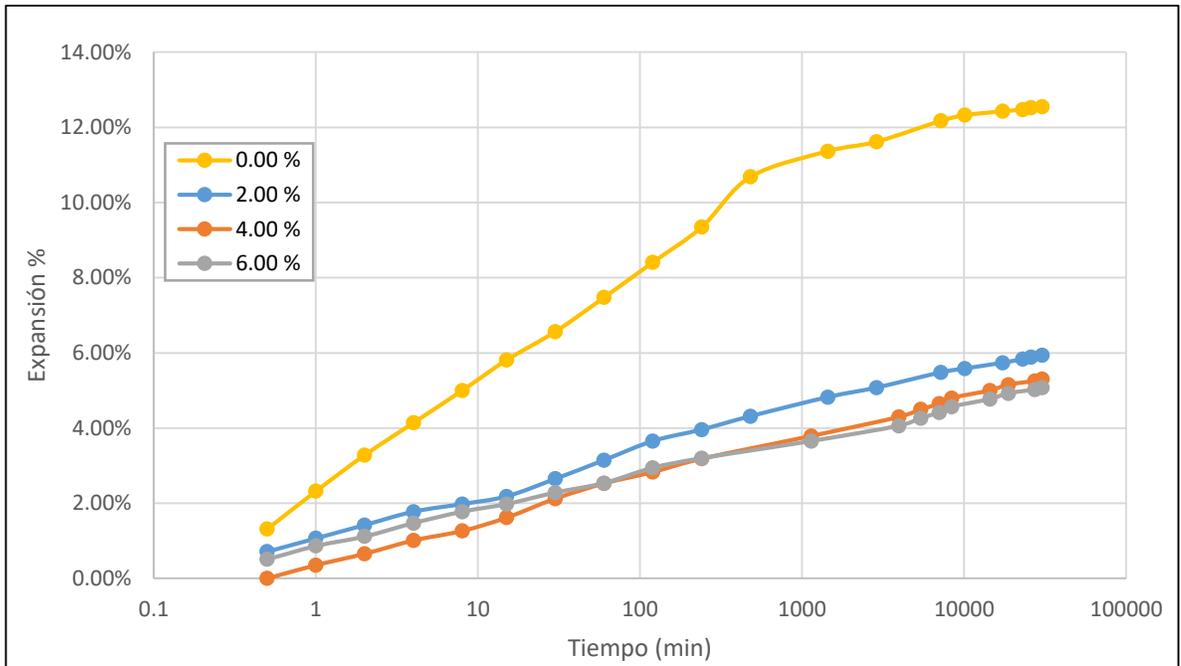


Figura 70. Porcentaje de expansión con 1 columna con porcentajes de cal del 2%, 4% y 6%

Tabla 28. Resultados de expansión libre con 1 columna

Cal	Altura Inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre	Exp. Reducida	%
0.00%	1.98	2.2285	12.55%	-	-
2.00%	1.97	2.0870	5.94%	6.61%	52.67
4.00%	1.98	2.0850	5.30%	7.25%	57.77
6.00%	1.97	2.0700	5.08%	7.47%	59.52

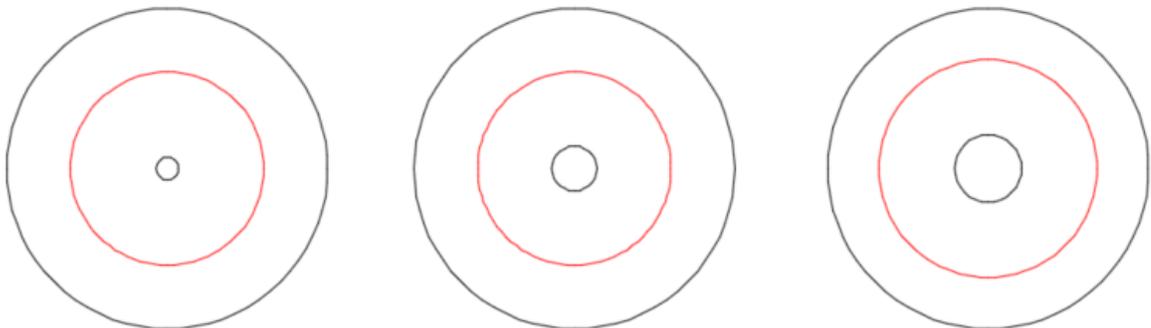


Figura 71. Área donde intervenía la cal

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

Los resultados de la expansión libre se muestran en la figura 65, el cual nos dice que para una columna con diferentes porcentajes de cal (2%, 4% y 6%) sigue teniendo una buena reducción de expansión de que va de un 50% a casi un 60% respecto a la expansión inicial (12.55%). Las columnas de van reduciendo dependiendo del porcentaje de cal que se le coloca al suelo (figura 68).

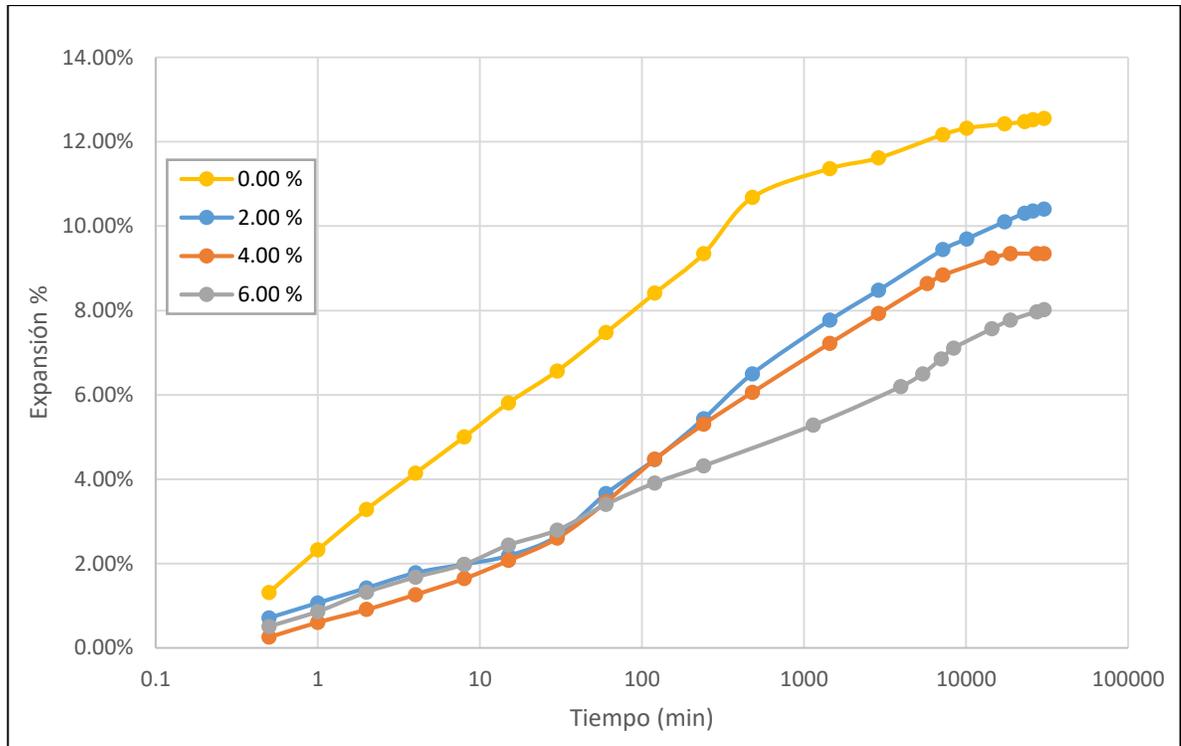


Figura 72. Porcentaje de expansión con 2 columnas con porcentajes de 2%, 4% y 6% de cal

Tabla 29. Resultados de expansión libre con 2 columnas

Cal	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre	Exp. Reducida	%
0.00%	1.98	2.2285	12.55%	-	-
2.00%	1.97	2.1750	10.41%	2.14%	17.05
4.00%	1.98	2.1650	9.34%	3.21%	25.58
6.00%	1.97	2.1280	8.02%	4.53%	36.10

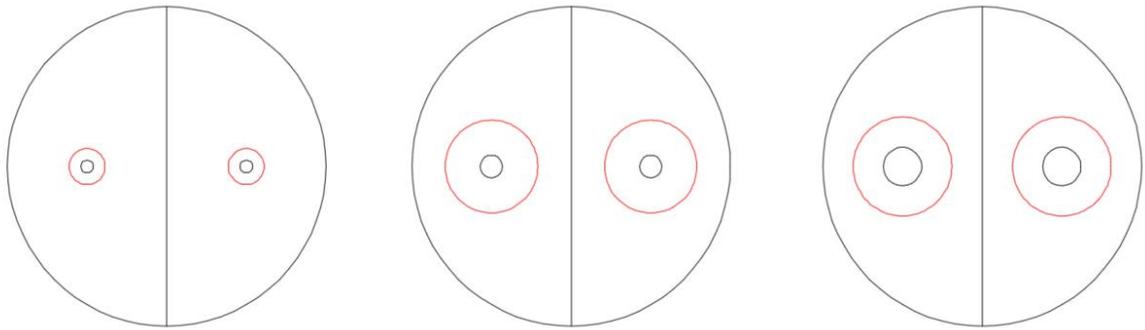


Figura 73. Área donde intervenía la cal

Los resultados de esta prueba (figura 72) en comparación con la de 1 columna indican que la posición de las columnas si influye en la reducción de expansión del suelo, ya que en estas pruebas se utilizaron los mismos porcentajes de cal, pero distribuidos en 2 columnas (figura 73). De igual forma que la prueba anterior la dimensión de la columna cambio dependiendo del porcentaje de cal que se utilizara.

En la figura 74 podemos ver la reducción de expansión con los dos arreglos (1 y 2 columnas).

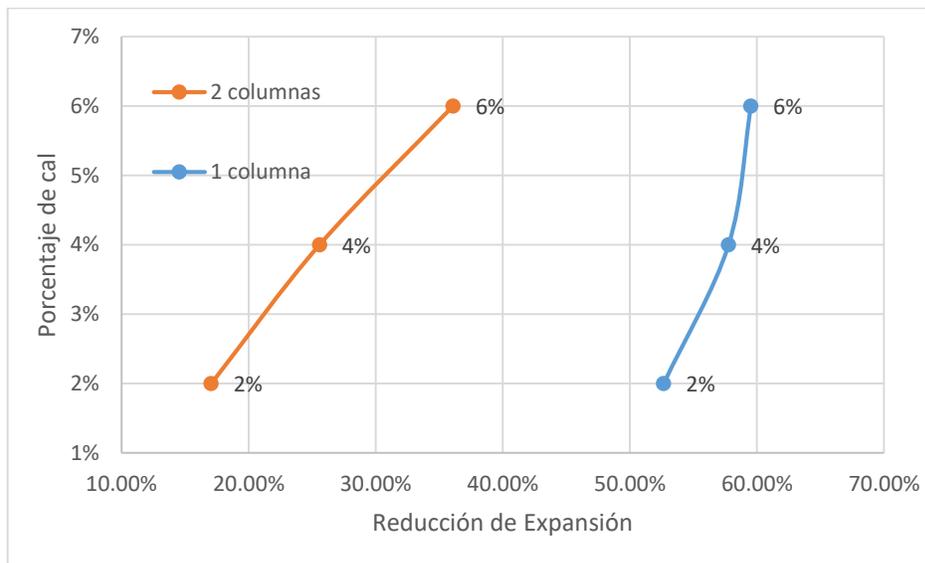


Figura 74. Porcentaje de expansión reducido dependiendo el número de columnas

También se puede observar al retirar la muestra con su expansión máxima libre, que la expansión máxima que se presenta en la muestra es en la zona más alejada

de la columna de cal (figura 75), lo cual nos indica que la cal está controlando la humedad en el perímetro y área más cercana a la columna.



Figura 75. Contorno donde la cal no controla la humedad

Para poder tener una mejor vista de si la cal interactuaba de alguna forma con el suelo, es decir, que se movieran partículas de cal en la muestra se decidió cortar una prueba (figura 76) y obtener humedades de la parte más lejana a la columna, al centro y la parte que estaba más cercana a la misma (tabla 30).



Figura 76. Interacción de la cal con el suelo

Tabla 30. Resultados de humedad

Contenido de Agua						
Wf	Wf +Wm	Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)	Muestra
125.9	130.4	128.5	4.5	2.55	76.47	A
124.3	130.2	127.6	5.9	3.26	80.98	B
126.8	132.5	129.9	5.7	3.1	83.87	C

El contenido de agua que tenía el suelo si disminuía conforme se iba acercando a la columna, por lo cual indica que la cal si estaba absorbiendo el agua y por ende estaba controlando la expansión del suelo.

8.3.4. Medición de Resistencia con columnas de cal

Esta prueba se realizó el ensaye de corte directo con base en la norma ASTM D-3080 (2011), se hizo con tres diferentes cargas (1.0, 1.5, 2.0 ton/m²), a las cuales se les colocó 3 columnas de cal (figura 77), se decidió usar la de 3 columnas ya que es donde se retira mayor parte del suelo y por ende puede reducir su resistencia considerablemente y se le coloca más cal (6%).

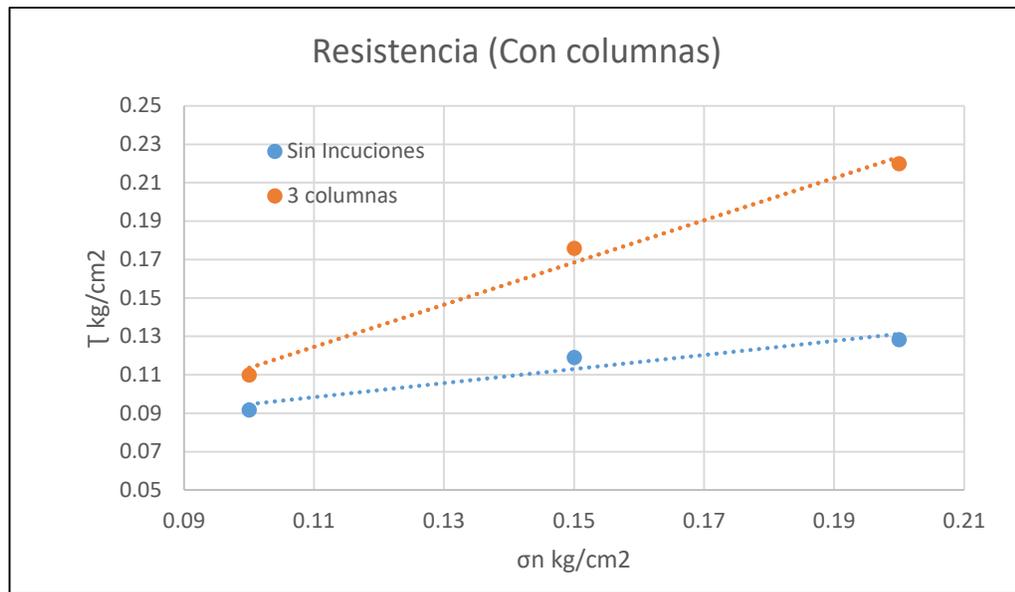


Figura 77. Resistencia con columnas de cal

Esta prueba nos dio como resultado que al colocar las columnas de cal en el suelo estas ayudan a aumentar la resistencia, lo cual se puede observar en la figura 77 ya que el ángulo de fricción aumenta. Este ángulo se presenta ya que el suelo estudiado tiene un alto contenido de limos (40%).

8.4. Análisis post-investigación

8.4.1. Resultados de expansión con 8% de cal

Para comprobar si los porcentajes de cal que se estaban utilizando eran los más adecuados se hizo un análisis con 8% de cal en 4 columnas (figura 78), el cual nos dio como resultado lo que se presenta en la figura 79 y la tabla 31.

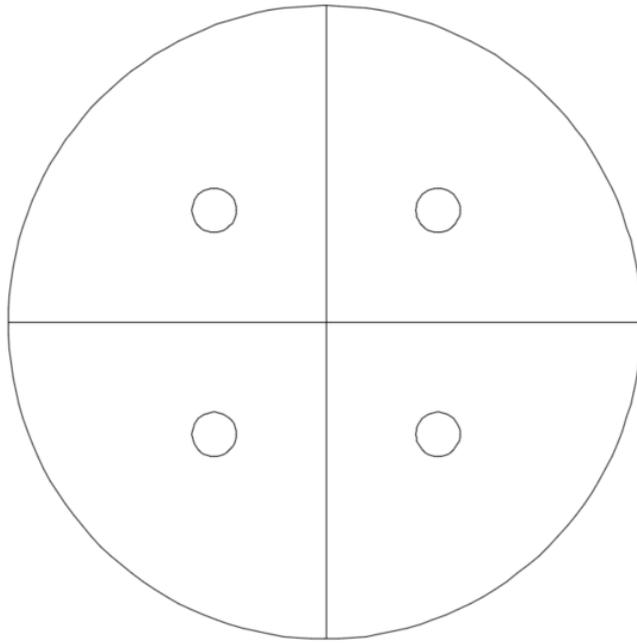


Figura 78. Arreglo de 4 columnas (8% de cal)

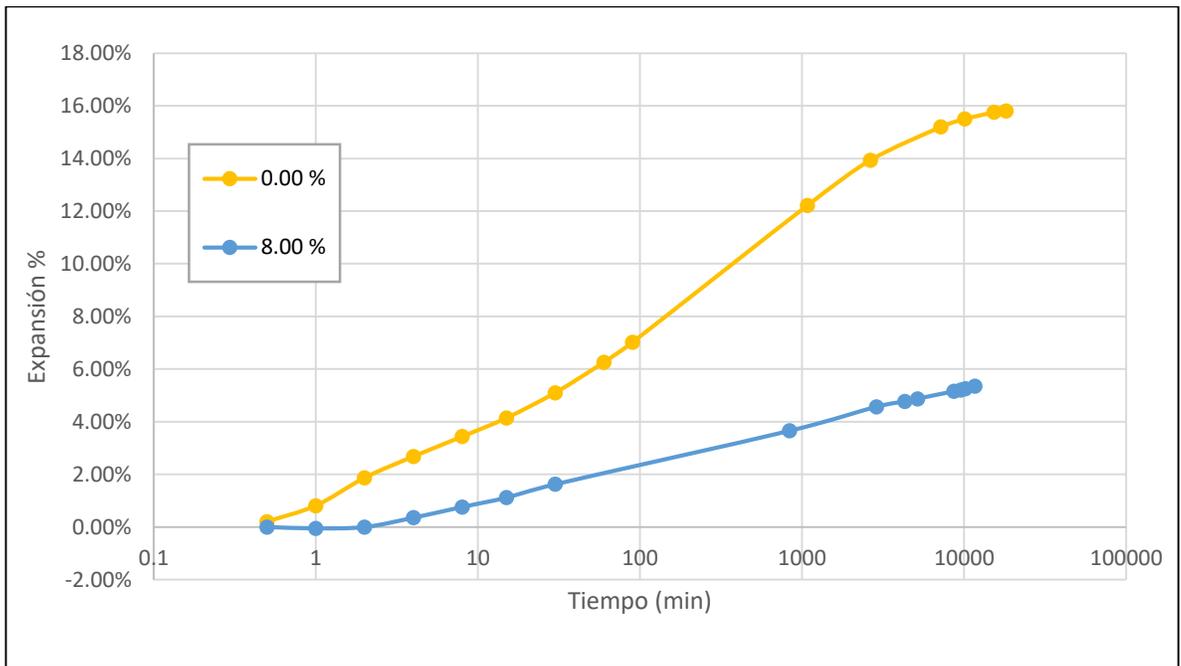


Figura 79. Resultado de la expansión del suelo natural vs con la muestra con 8 columnas (8% cal)

Tabla 31. Resultados de expansión libre con 4 columnas (8% cal)

Cal	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre	Exp. Reducida	%
0.00%	1.98	2.2930	15.81%	-	-
8.00%	1.97	2.0755	5.36%	10.45%	66.10

Esto nos indica que al aumentar el número de columnas y el porcentaje de cal la reducción de expansión se sigue reduciendo, pero si se compara con el resultado de 1 columna con el 6% de cal, solo tiene una diferencia del 6.6% en la reducción, lo cual nos dice que, aunque se haya aumentado el número de columnas no es necesario hacer una mayor cantidad de perforaciones para tener un buen resultado.

8.4.2. Extrapolación a campo

Para tener un mayor alcance en el proyecto se hizo un análisis con los resultados de laboratorio para una extrapolación a campo.

Se consideró un terreno de 10.0 m de ancho x 20.0 m de largo con una profundidad de mejoramiento de 2.0 m (para poder compararlo con un método de sustitución), estas medidas se propusieron ya que son aproximadamente las dimensiones de un terreno para casa-habitación.

Para poder hacer este análisis se tuvo que tomar en cuenta el área de influencia que provocaba una columna de cal en el área del anillo, esta se calculó con base al volumen del anillo, ya que sabemos que la cal no afecta en las zonas más alejadas de la columna, esta área de influencia se calculó con base a los resultados de las pruebas en laboratorio, las cuales dicen que la columna afecta solo el 52.68% del volumen de la pastilla (tabla 32):

Tabla 32. Factores de extrapolación

Datos	Cantidad	Unidad
Volumen de la pastilla	99.39	cm ²
Altura de la pastilla	1.98	cm
Área de la pastilla	50.19	cm ²
Columna 2% cal	1.00	cm ²
Porcentaje que afecta la columna de cal	52.68	%
Área que afectaba la columna de cal	26.44	cm ²

Usando los datos de la tabla 32 se calculó el número de perforaciones que se necesitaban y el área de influencia tomando en cuenta las dimensiones de brocas que existen en el mercado para la perforación de anclajes o micropilotes que es de aproximadamente de 20.0 cm de diámetro, esto con el fin de poder buscar el mejor diseño, dándonos los resultados de la tabla 33.

Tabla 33. Resultados de extrapolación

Extrapolación en campo		
Columna 2% cal	1.00	cm ²
Área que afectaba la columna de cal	26.44	cm ²
Diámetro de broca/perforación	20.00	cm
Área de la perforación	314.16	cm ²
Área de influencia de cada perforación	8168.14	cm ²
Área de influencia de cada perforación	0.82	m ²
Radio de influencia	0.51	cm
Largo terreno	10.00	m
Ancho terreno	20.00	m
Área terreno	200.00	m ²
Profundidad	2.00	m
Volumen	400.00	m ³
Cal	2.00	%
	8,960.00	kg
	8.96	ton
Columnas	219	

*Radio que afecta la columna de cal

Con los resultados que se presentan en la tabla 33 se prosiguió a dibujarlo para ver cómo se tendría el acomodo de columnas en el terreno (figura 80).

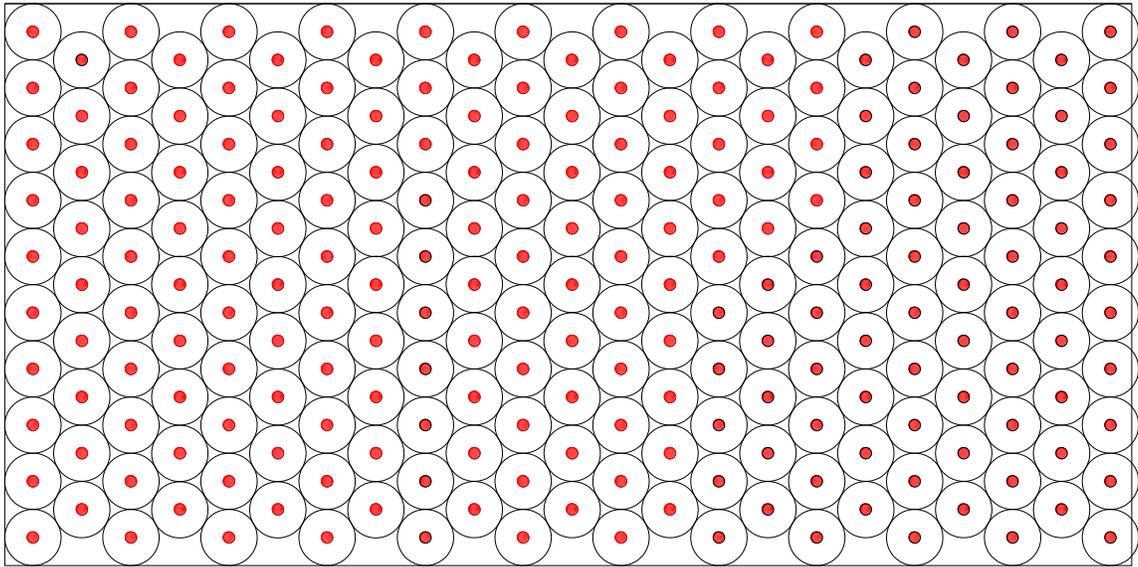


Figura 80. Arreglo de columnas de cal en el terreno

Este arreglo se basó en resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio en condiciones saturadas, pero estas pruebas limitan o impiden la expansión horizontal que pudiera tener el suelo dentro del anillo y que no se igualan a las condiciones que se presentan en campo, por lo tanto, se hizo otro análisis basándonos en la investigación que presentó Meza Tapia (2018) en el cual se basó en el análisis que tenía de Rodríguez Morales (2015) con pruebas de laboratorio, ella hizo un análisis colocando en el suelo estructuras tubulares huecas de diferentes materiales con el fin de que la expansión que tenía el suelo se pudiera absorber en los espacios vacíos dentro de cada estructura tubular. Meza Tapia (2018), replicó este experimento, pero ya a nivel de campo, en el cual hizo una reconstrucción del suelo haciendo una excavación de 2.0 m x 2.0 m y 1.2 m de profundidad, colocando el suelo expansivo con las mismas condiciones que se tenían in situ, en este terreno se colocaron 8 tubos perforados de PVC y se procedió a saturar el suelo para medir la expansión, este experimento comprobó que no era necesario retirar un mayor porcentaje de material, ya que comparado con el análisis de Rodríguez Morales (2015) se necesitaba retirar un volumen de 3 a 4 veces menor que la investigación que se presentaba en laboratorio (tabla 34).

Tabla 34. Tabla comparativa de resultados obtenidos en campo vs laboratorio (Meza Tapia 2018)

Autor	Diámetro de perforaciones (cm)	Cantidad de perforaciones	Volumen extraído (%)	Expansión muestra inalterada (%)	Expansión muestra remoldeada (%)	Expansión presentada con perforaciones (%)	Expansión abatida (%)	Expansión abatida respecto a expansión remoldeada (%)	Expansión abatida respecto a expansión natural (%)
Meza Tapia (2018)	10.00	8.00	1.57	-	14.00	2.99	11.01	78.64	83.48
Rodríguez Morales (2015)	0.10	6.00	5.37	18.80	28.10	10.60	17.50	62.27	93.08

Con los resultados obtenidos de estas investigaciones se optó por hacer un nuevo diseño de extrapolación en campo, esto con el fin de buscar un método más económico y rápido de instalar, y se procedió a obtener una regla de tres basándonos en el sistema que usó Meza Tapia (2018) pero con perforaciones de 20.0 cm, el cual nos dio los resultados que se muestran en la figura 81 y las tablas 35 y 36.

Tabla 35. Resultados de la investigación de Meza Tapia (2018)

Zona a mejorar		
Largo	2	m
Ancho	2	m
Altura	1.2	m
Volumen	4.8	m ³
Perforación		
Diámetro	0.1	m
área	0.0079	m ²
Largo	1.2	m
Volumen x perforación	0.0094	m ³
Perforaciones	8	-
Volumen extraído	0.075	m ³
% extraído	1.57	%
% expansión en prueba remoldeada	14	%
% reducido de expansión	78.64	%

Tabla 36. Resultados de extrapolación basados en la investigación de Meza Tapia (2018)

Zona a mejorar		
Volumen	400	m ³
Volumen que se requiere extraer	6.28	m ³
Perforación		
Diámetro	0.2	m
Área	0.0314	m ²
Largo	2	m
Volumen x perforación	0.0628	m ³
Perforaciones necesarias	104	-
Cal		
Peso de cal x m ³	450	Kg/m ³
Cal para rellenar las perforaciones	2826	kg
Cal para rellenar las perforaciones	2.826	ton

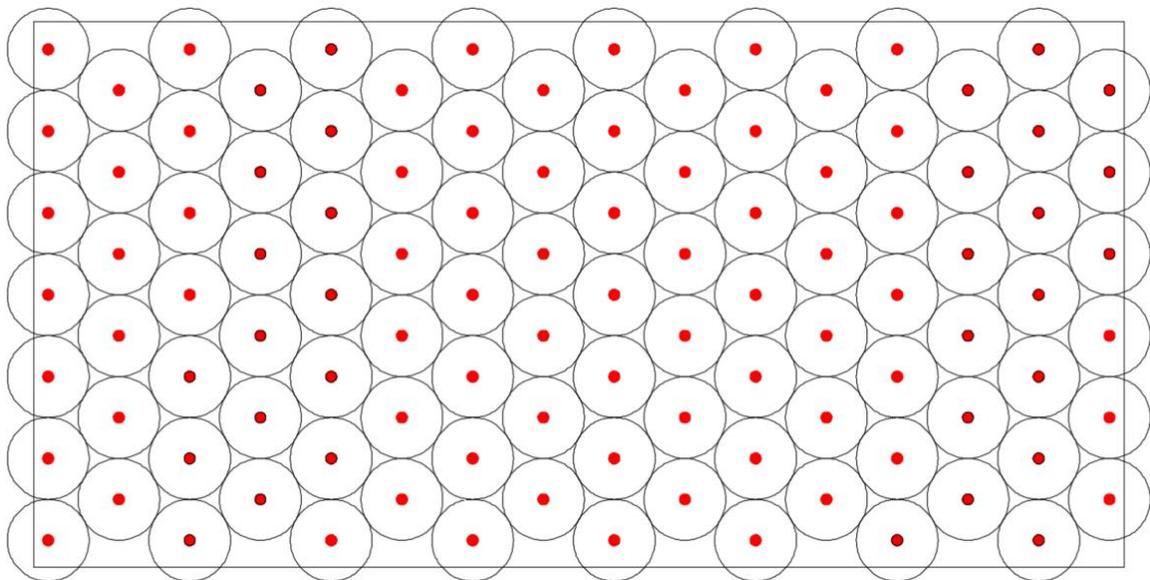


Figura 81. Arreglo de columnas de cal en el terreno con base al análisis de Meza Tapia (2018)

Este arreglo nos ayudó a optimizar tanto en el número de columnas como en la cantidad de cal que se requería, de igual forma se tiene que hacer un estudio de suelos en el área que se pretende utilizar este sistema ya que este arreglo podría variar.

8.4.3. Comparativa de precios con otros sistemas

Para poder ver si el sistema era lo suficientemente óptimo se hizo un análisis de precios comparándolo con otros sistemas de mejoramientos (tablas de la 37 a la 43):

Tabla 37. Sustitución con excavadora 320

Sustitución 1	
Maquinaria	
Excavadora 320	\$ 20,000.00
Vibrocompactador	\$ 22,500.00
Motoconformadora	\$ 42,500.00
Material	
Vol. m3	400
Tepetate m3	\$ 300.00
	\$ 120,000.00
Retiro m3	400
camión 14 m3	\$ 1,000.00
viajes	29
	\$ 29,000.00
Total	\$ 234,000.00
Tiempo	4 semanas

Tabla 38. Sustitución con retroexcavadora

Sustitución 2	
Maquinaria	
Retroexcavadora	\$ 26,000.00
Vibrocompactador	\$ 22,500.00
Motoconformadora	\$ 42,500.00
Material	
Vol. m3	400
Tepetate m3	\$ 300.00
	\$ 120,000.00
Retiro m3	400
camión 14 m3	\$ 1,000.00
viajes	29
	\$ 29,000.00
Total	\$ 240,000.00
Tiempo	4 semanas

Tabla 39. *Mejoramiento con cal*

Mejoramiento con Cal	
Maquinaria	
Excavadora 320	\$ 40,000.00
Vibrocompactador	\$ 22,500.00
Motoconformadora	\$ 42,500.00
Material	
Vol. m3	400
Cal 2% kg	8960
	\$ 33,331.20
Total	\$ 138,331.20
Tiempo	4 semanas

Tabla 40. *Mejoramiento con columnas de cal con retroexcavadora (opción 1)*

Mejoramiento con Columnas de Cal 1 (arreglo 1)	
Maquinaria	
Retroexcavadora	\$ 26,000.00
Brazo	\$ 20,000.00
Material	
Vol. m3	400
Cal 2% kg	8960
	\$ 33,331.20
Retiro m3	13.76
camión 14 m3	\$ 1,000.00
viajes	1
	\$ 1,000.00
Total	\$ 80,331.20
Tiempo	4 semanas

Tabla 41. Mejoramiento con columnas de cal con mini excavadora (opción 1)

Mejoramiento con Columnas de Cal 2 (arreglo 1)	
Maquinaria	
Mini excavadora	\$ 20,000.00
Brazo	\$ 20,000.00
Material	
Vol. m3	400
Cal 2% kg	8960
	\$ 33,331.20
Retiro m3	13.76
camión 14 m3	\$ 1,000.00
viajes	1
	\$ 1,000.00
Total	\$ 74,331.20
Tiempo	4 semanas

Tabla 42. Mejoramiento con columnas de cal con retroexcavadora (opción 2)

Mejoramiento con Columnas de Cal 1 (arreglo 2)	
Maquinaria	
Retroexcavadora	\$ 26,000.00
Brazo	\$ 20,000.00
Material	
Vol. m3	400
Cal kg	2826
	\$ 10,512.72
Retiro m3	6.28
camión 7 m3	\$ 850.00
viajes	1
	\$ 850.00
Total	\$ 57,362.72
Tiempo	3 semanas

Tabla 43. *Mejoramiento con columnas de cal con mini excavadora (opción 2)*

Mejoramiento con Columnas de Cal 2 (arreglo 2)	
Maquinaria	
Mini excavadora	\$ 20,000.00
Brazo	\$ 20,000.00
Material	
Vol. m3	400
Cal kg	2826
	\$ 10,512.72
Retiro m3	5.72
camión 7 m3	\$ 850.00
viajes	1
	\$ 850.00
Total	\$ 51,362.72
Tiempo	3 semanas

Estos precios pueden variar dependiendo de donde se encuentre la obra, precio de maquinaria y precio de materiales.

En este análisis (tabla 44) se demuestra que es más económico colocar columnas de cal que cualquiera de los otros dos métodos ya que se requiere menos movimiento de material y menor uso de maquinaria ahorrándonos hasta un 79% del presupuesto comparado con otro método de mejoramiento.

Tabla 44. Resumen de costos en diferentes métodos

Método	Tiempo (semanas)	Costo	% de ahorro	Comparado con
Sustitución 1	4	\$ 234,000.00	-	
Sustitución 2	4	\$ 240,000.00	-	
Mejoramiento con cal	4	\$ 138,331.20	-	
Mejoramiento con columnas de cal 1 (arreglo 1)	4	\$ 80,331.20	66%	Sustitución 1
			67%	Sustitución 2
			42%	Mejoramiento con cal
Mejoramiento con columnas de cal 2 (arreglo 1)	4	\$ 74,331.20	68%	Sustitución 1
			69%	Sustitución 2
			46%	Mejoramiento con cal
Mejoramiento con columnas de cal 1 (arreglo 2)	3	\$ 57,362.72	75%	Sustitución 1
			76%	Sustitución 2
			59%	Mejoramiento con cal
Mejoramiento con columnas de cal 2 (arreglo 2)	3	\$ 51,362.72	78%	Sustitución 1
			79%	Sustitución 2
			63%	Mejoramiento con cal

8.4.4. Reducción de expansión por secado de muestras

Para tener un análisis más adecuado de que podría pasar con la cal al secarse se procedió a secar una muestra con columnas de cal en el horno a una temperatura no mayor a 60°C, esto con el fin de ver cuál era el comportamiento de la cal cuando se tuviera un periodo de sequía (cuando no hay lluvias), este resultado se muestra en la figura 82.



Figura 82. Comportamiento de la cal al secarse

Lo que podemos ver en la imagen es que la cal al momento de secarse se vuelve a convertir en polvo (como se compra normalmente), lo cual nos indica que la cal tiene una reacción a endurecerse cuando está saturada, pero al secarse esta vuelve a su condición original.

De igual forma por petición del Dr. Rojas se propuso hacer una prueba con una muestra que tuviera columnas de cal, esta prueba se basa en el comportamiento de la expansión que tiene el suelo al momento del secado posterior a que la muestra alcanzará su máxima expansión.

Para hacer esta prueba se hizo el mismo procedimiento que se había hecho en las pruebas anteriores para medir expansión, la única diferencia fue que cuando la muestra con columnas de cal tenía su expansión máxima, esta se retiraba del consolidómetro y se colocaba en el horno a una temperatura no mayor a 60°C por 24 horas, posterior a estas 24 horas el anillo se volvía a colocar en el consolidómetro y se repetía la prueba para medir expansión.

Con el fin de medir mejor los resultados se hizo una comparativa con una prueba de expansión (remoldeada) la cual no fue secada de la misma manera que las otras dos muestras, las cuales nos arrojaron los resultados que se muestran en las figuras 83 y 84, así como en la tabla 45.

Tabla 45. Resultados de la expansión posteriores al secado

Secado 24 hrs	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Expansión libre	Exp. Reducida	%
Sin secado (sin columnas)	1.98	2.1885	10.53%	-	-
Sin secado (sin columnas)	1.97	2.1980	11.57%	-	-
Sin secado (con columnas)	1.98	2.0870	5.94%	4.59%	43.59
Secado 1	1.98	2.0740	4.75%	5.78%	54.92
Secado 1	1.97	2.0360	3.35%	8.22%	71.05
Secado 2	1.98	2.0770	4.90%	5.63%	53.48
Secado 2	1.97	2.0565	4.39%	7.18%	62.06



Figura 83. Muestra posterior al secado

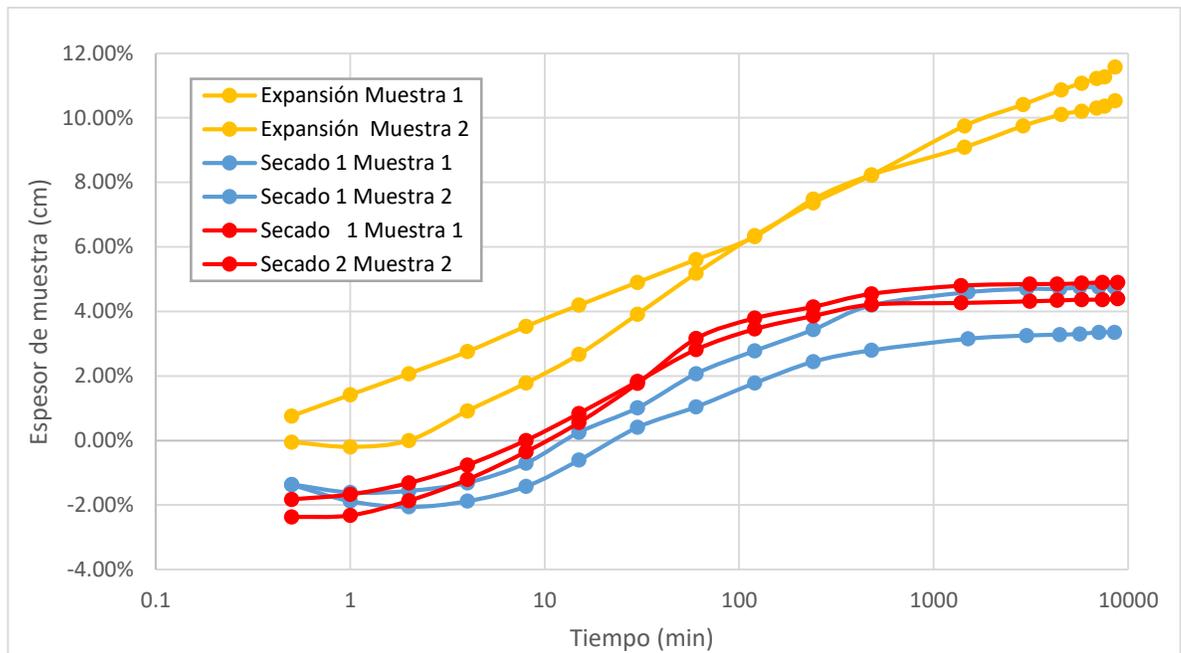


Figura 84. Resultados de expansión posterior al secado

Con los resultados de la figura 84 y la tabla 45 podemos ver que, si la muestra se seca y después se vuelve a saturar, la expansión no será la misma esta se reduce hasta un 71.05% más comparada con la que no tiene columnas de cal y un 27.46% comparada con la prueba que si tiene inclusiones de cal pero no se le hizo el procedimiento de secado, lo que comprueba el fenómeno de fatiga que tiene el suelo expansivo (García 2018), el cual indica que si sometes una muestra de suelo expansivo a un secado y posterior se vuelve a saturar la expansión no será la misma, esta se irá reduciendo conforme se vayan haciendo más ciclos.

9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con base en las pruebas se puede determinar que el suelo es arcilloso (55%) con un alto contenido de limo (40%), por lo cual se pudo obtener las propiedades de plasticidad.

Este suelo se pudo clasificar mediante la carta de Plasticidad (SUCS) con un $LL=85.16\%$ y $IP=51.93\%$, el cual nos dio como resultado que se trataba de una arcilla de alta plasticidad/compresibilidad (CH). Si se toma en cuenta que, su IP es alto con

base a los autores Holtz y Gibbs, Seed Woodward y Lundgren, y Chen se puede determinar que el suelo tiene un potencial de expansividad alto, con un grado de saturación de $G_w = 76.13\%$ in situ, este parámetro tan alto se debía a que el suelo fue recolectado en temporada de lluvias y una noche antes hubo precipitaciones en la zona por lo cual el material tenía un contenido de agua más alto ($w\% = 40.55$).

Con las pruebas de expansión se pudo observar que el suelo al natural tenía un 8.27% de expansión y cuando se remoldeaba aumentaba hasta un 12.55%, este cambio es con base a que cuando el suelo se remoldea su estructura cambia y esto hace que la expansividad sea mucho mayor, de igual manera se vio la diferencia en la presión de expansión, ya que en la muestra inalterada se obtuvo una presión de 44.6 ton/m^2 y para la muestra remoldeada se obtuvo una presión de 70 ton/m^2 . Estos resultados comprueban la teoría que presenta López-Lara (2008) que las muestras remoldeadas presentan valores de aproximadamente de 50% mayor en la presión de expansión respecto a las pruebas inalteradas bajo las mismas condiciones.

Se pudo observar que en al retiró de las pruebas donde se tenía el mayor cambio de volumen era en el área más alejada de la columna, lo cual nos indica que la cal cumplía la función de absorber el agua que estaba en el perímetro de esta y por consiguiente se tendía a reducir el contenido de agua.

Se observó que no solo era un sistema más rápido, sino que también la manera en que trabajaba la cal tenía un efecto bastante favorable evitando la expansión del suelo sin importar que esta no estuviera mezclada con el mismo, de igual forma al hacer el análisis de precios también se puede observar que los costos bajaban considerablemente (hasta 79% menos) comprado con otros métodos.

10. CONCLUSIONES

Con base a las pruebas hechas en este proyecto se puede validar la hipótesis ya que se demuestra que las columnas de cal pueden reducir hasta un 60% de expansión comparado con un suelo natural remoldeado sin inclusiones.

Para las pruebas de 1 columna se pudo reducir la expansión de un 12.55% a un 5.08% (6% de cal), lo cual nos indica que tuvo una disminución de volumen de 59.5%. El comportamiento que se tuvo para el acomodo de 2 columnas fue mucho menor, pero de igual manera se redujo la expansión de un 12.55% a 8.02%, con una reducción de volumen del 36.10%. El resultado que tuvo el suelo con 3 columnas y 6% de cal fue una reducción del 12.55% al 6.76%, esto da una reducción del 53.86% de expansión.

Todas las pruebas que se realizaron tuvieron un resultado favorable ya que en todos los casos se pudo reducir mínimo un 17% de expansión comparado con el suelo natural. Se puede demostrar que el acomodo de las columnas si infliere en el resultado, ya que en el arreglo de 2 columnas la expansión disminuía hasta un 67% menos comparada con los resultados de las pruebas de 1 y 3 columnas.

El tamaño de la columna cambiaba dependiendo el porcentaje de cal que se le aplicara a la muestra, el cual también nos ayudó a corroborar que el acomodo de las columnas si influía en la reducción de expansión.

Se comprobó que la reducción de expansión está asociada con el área de influencia (área donde la cal controla la humedad) y que para extrapolación o un mejor resultado se puede hacer un arreglo solo usando esta área sin tocarse para disminuir la expansión en un porcentaje mayor.

La expansión que se media en los micrómetros se debía al suelo que no entraba en el área de influencia, es decir, donde la cal ya no alcanzaba a absorber el agua.

Se demostró que el suelo tiene una expansión horizontal mayor ya que el suelo inalterado tuvo una menor expansión en comparación a la muestra remoldeada, lo cual indica que en condiciones in situ el suelo tiende a expandirse menos que en condiciones de laboratorio.

Con los resultados más favorables de reducción de expansión de hasta casi un 60% (6% de cal) para una columna comparado con una muestra remoldeada sin inclusiones se puede demostrar que no se necesita una cantidad tan grande de

columnas colocadas al suelo para reducir la expansión, ya que se obtuvo un resultado muy parecido cuando se trataba del mismo porcentaje de cal pero con 3 columnas, con base en esto se puede trasladar este diseño a campo, obteniendo buenos rendimientos tanto económicos como de reducción de tiempos comparado con otros procedimientos.

Estos resultados se basaron en un comportamiento cuando el suelo se saturaba teniendo un $G_w=100\%$, un parámetro que no suele replicarse en campo ya que normalmente el suelo donde se coloca la vivienda es recubierto por esta misma, evitando así que el agua entre y es muy probable que este método pueda reducir la expansión entre un 80% y 100%.

Con el análisis de precios comparado con otros dos métodos, se pudo observar que el colocar columnas de cal es mucho más económico (79% menos costo), ya que no requiere menor maquinaria y la colocación es mucho más sencilla.

En las pruebas de secado se observó que la cal al momento de secarse volvía a su estado original, lo cual nos indica que, aunque la muestra vuelva a saturarse esta seguirá controlando la humedad evitando la expansión del suelo. De igual forma con el análisis de las últimas pruebas podemos corroborar que el suelo puede fatigarse (reducir la expansión) con el proceso de saturación y secado, dándonos un resultado bastante positivo para así evitar que el suelo cambie su volumen dañando a la estructura que se encuentre sobre este.

11. REFERENCIAS

1. ANCADE – Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España, 2015, <https://www.cymper.com/blog/tipos-de-cal-utilizadas-en-la-construccion/>.
2. ASTM-D2487. 1993. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 206-216. ASTM International, Philadelphia, EUA.

3. ASTM-D420. 1993. Standard Guide to Side Characterization for Engineering, Design and Construction Purpose. Annual book of ASTM standards. ASTM International, Philadelphia, EUA.
4. ASTM-D4531. 1992. Standard Test Method for Bulk Density of Peat and Peat Products. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 676-677. ASTM International, Philadelphia, EUA.
5. ASTM D 3080 (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, PA, USA.
6. ASTM D2216-05, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, 1-7, West Conshohocken, Pennsylvania, USA (2005).
7. ASTM-D4318. 1993. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 551-561. ASTM International, Philadelphia, EUA.
8. ASTM, D. 2435. 2011. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. Annual book of ASTM standards. Philadelphia.
9. ASTM-D4546. 2008. Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils. ASTM International, Philadelphia, EUA.
10. ASTM-D422. 1990. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 10-16. ASTM International, Philadelphia, EUA.
11. ASTM-D854. 1992. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils. Annual Book of ASTM Standards: Soil and Rock. p. 80-83. ASTM International, Philadelphia, EUA.
12. Asuri, S., & Keshavamurthy, P. (2016). Expansive soil characterisation: an appraisal. INAE Letters, 1, 29-33.
13. Bahia, L., & Ramdane, B. (2012). Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils. International Journal of Geosciences, 2012.

14. Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989). Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1-21.
15. Bowles, J. E. 1987. *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. Editorial McGraw Hill Latinoamericana, EUA.
16. Braja, M. D. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson y Learning, 580.
17. Cabrera-Ramírez, J., and Delgado-Hernández. 2010. *Métodos de remediación de viviendas dañadas sobre suelos expansivos*, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
18. Chen, F. H., & Huang, D. (1987, December). Lateral expansion pressure on basement walls. In *Proceedings of the 6th International Conference Expansive Soils*, New Delhi (Vol. 1, pp. 55-59).
19. Chen, F. H. (2012). *Foundations on expansive soils* (Vol. 12). Elsevier.
20. Das, B. M. (1999). *Principios de ingeniería de Cimentaciones*. Braja M. Das. Editorial Thomson. México, 855.
21. Braja, M. D. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson y Learning, 580.
22. Das, B. M., & León, J. C. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
23. Das, B. M., & González, S. R. C. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
24. Fontalvo Abuchar, O. D., Medrano Barajas, B., & Nadad Campo, F. (2006). *Estabilización con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base*.
25. GARCIA, J. D. J. T. (2018). *Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos*.
26. Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.

27. Jimenez Salas, J. A. C. (1980). Geotecnia y cimientos III: Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia.
28. Jones, D. E., & Jones, K. A. (1987). Treating expansive soils. *Civil Engineering—ASCE*, 57(8), 62-65.
29. Jones, L. D., & Jefferson, I. (2012). Expansive soils.
30. Juárez, E., & Rico, A. 2005. “Mecánica de suelos Tomo 1”, (3ª ed.). México, México: Limusa.
31. Kalantari, B. (2012). Foundations on expansive soils: a review. *Research journal of applied sciences, engineering and technology*, 4(18), 3231-3237.
32. Komine, H., & Ogata, N. (1994). Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian geotechnical journal*, 31(4), 478-490.
33. Lambe, T. W. (1960). A mechanistic picture of shear strength in clay. In *Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, 1960* (Vol. 437).
34. López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J. B., Horta-Rangel, J., Coronado-Márquez, A., & Castaño-Meneses, V. M. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 11(3), 159-168.
35. López-Lara, T., and J. Romero-Zepeda. 2006. Métodos de prevención para viviendas sobre suelos expansivos. In: *XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Chiapas, México. p. 629-942.
36. LOPEZ-LARA, T., HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, J. B., HORTA-RANGEL, J., RODRIGUEZ-MORALES, N. P., & BIMBELA-OSUNA, C. A. (2014). Análisis de estructuras huecas invertidas colocadas sobre suelos expansivos. Recuperado de <http://www.smig.org>.
37. López-Lara, T., A. Zepeda-Garrido, J. Horta-Rangel, J. Hernández-Zaragoza, and J. Salazar-Vallejo. 2008. Evaluación de la presión por el método B de la norma ASTM D-4546 para muestras remoldeadas.

- XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, México.
38. Marcial, D., & Landaeta, R. (2008). Diseño de un dispositivo para la medición de la presión de expansión en suelos arcillosos. *Boletín Técnico*, 46(1), 35-48.
39. Méndez, A., & Pineda, V. (2011). Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos. Recuperado de [http://www. ptolomeo. unam. mx](http://www.ptolomeo.unam.mx), 8080.
40. MORALES, N. P. R. (2019). USO DE ESTRUCTURAS POROSAS PARA ABATIR LA EXPANSION DE ARCILLAS.
41. Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. CRC press.
42. Nazir, A. K., & Azzam, W. R. (2010). Improving the bearing capacity of footing on soft clay with sand pile with/without skirts. *Alexandria Engineering Journal*, 49(4), 371-377.
43. Oswaldo, E. M. (2006). Caracterización de arcillas expansivas en el sector Salapa. Loja - Ecuador.
44. Parra-Gómez, M. G. (2018). Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante.
45. Patrone, J., & Prefumo, J. E. (2005). La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (4), 51-74.
46. Pérez-Rea, M. L., and J. Horta-Rangel. 2004. Cimentaciones sobre suelos expansivos y modelación de cimentaciones. In: A. Zepeda-Garrido (ed.) *Mecánica de suelos no saturados* No. 1. P 189-221. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Universidad Autónoma de Querétaro, México.
47. Quintero-Lemus, L. J., & Gallardo-Amaya, R. J. (2015). Caracterización mineralógica de arcillas expansivas con fines de estabilización. *Revista Ingenio*, 8(1), 83-92.

48. Salinas Suárez, J. E., & Villao Carvajal, R. A. (2019). Estudio comparativo de estabilización de suelos de subrasante suelos expansivos, utilizando cal, sal y geoceldas, para implementación en una nueva vía en la comuna Bajadita de Colonche de la parroquia Colonche (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2019.).
49. Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L., & García, B. (2011). Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science*, 51(3), 348-352.
50. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2009). M-MMP-4-04-014/09. Azul de metileno de materiales pétreos para mezclas asfálticas.
51. Seed, H. B., Woodward Jr, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 88(3), 53-87.
52. Semarnat. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental.
53. Sowers, G. (1994). *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México D.F.
54. Sridharan, A., & Gurtug, Y. (2004). Swelling behaviour of compacted fine-grained soils. *Engineering geology*, 72(1-2), 9-18.
55. Sridharan, A., & Prakash, K. (2000). Classification procedures for expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 143(4), 235-240.
56. TAPIA, G. E. M. (2018). Perforaciones en campo: alternativa para disminuir la expansión de suelos.
57. URIBE, J. C. R. (2019). ABATIMIENTO DE LA EXPANSIÓN MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DE SUELOS Y APLICACIÓN DE CARGA.

58. Villar, M. (2001). Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de cabo de gata Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
59. Wubshet, M., & Tadesse, S. (2014). Stabilization of expansive soil using bagasse ash & lime. Zede Journal, 32, 21-26.

12. ANEXOS

12.1. Caracterización geotécnica

Tabla 46. Humedad natural

Contenido de Agua					
Wf	Wf + Wm	Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)
125.9	172	158.7	46.1	32.8	40.55

Tabla 47. Pruebas de caracterización 1

Muestra	Natural	c/cera	Vp	Agua		
				ml	a+p	ml (exacto)
1	105.8	122.7	17.42	79	189.7	79.57
2	92.4	114.2	22.47	83	193.7	83.50
3	72.3	88.5	16.70	67	176.8	66.90
4	58.5	69.7	11.55	53	162.8	53.14
5	31.4	39.4	8.25	26	134.8	25.64
6	56.2	65.6	9.69	45	154.1	44.60

Tabla 48. Pruebas de caracterización

	Ym	w	Yd	Ss	n	e
	1.70	0.41	1.21	2.76	0.56	1.28
	1.51	0.41	1.08	2.76	0.61	1.56
	1.44	0.41	1.02	2.76	0.63	1.69
	1.41	0.41	1.00	2.76	0.64	1.76
	1.81	0.41	1.28	2.76	0.53	1.15
	1.61	0.41	1.15	2.76	0.58	1.41
Promedio	1.58	0.41	1.12	2.76	0.59	1.47

Tabla 49. Límite Líquido

QRO (LL)							
	Wf	Wf + Wm		Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)
No	CC (g)	CC	No. Golpes	CC	CC	CC	CC
matraz 3	129.7	167.2	26	149.8	37.5	20.1	86.57
matraz 3	117.6	145.3	25	132.5	27.7	14.9	85.91
matraz 3	119.2	148.3	26	135.1	29.1	15.9	83.02
							85.16

Tabla 50. Límite Plástico

QRO (LP)						
Prueba	Wf	Wf + Wm	Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)
matraz 3	124.2	131.6	129.7	7.4	5.5	34.55
matraz 3	126	132.7	131.1	6.7	5.1	31.37
matraz 3	123.8	133.7	131.2	9.9	7.4	33.78
						33.23

Tabla 51. Índice de plasticidad

QRO (IP)
52.02
54.53
49.24
51.93

Tabla 52. Contracción Lineal

Contracción Lineal (QRO)				
Prueba	Capsula	L. Molde	L. Muestra Seca	Contracción Lineal
1	Rectangular	91.63	79.57	13.16%

Tabla 53. Contracción Volumétrica

Contracción Volumétrica (QRO)								
Prueba	Capsula	Diámetro Molde	Alto Molde	D. Muestra seca	Alto Muestra Seca	Volumen inicial (mm ³)	Volumen Final (mm ³)	Contracción Volumétrica
1	Circular	56.35	12.74	43.61	9.4	31772.19	14040.74	44.19%

Tabla 54. Peso específico relativo de los sólidos

MATRAZ N°	3
TEMPERATURA °C	23
Peso matraz, agua y suelo (Wfws)	722.2
Peso matraz y agua aforado (Wfw)	690.3
Peso del Suelo seco (Ws)	50
Ss	2.76

Tabla 55. Prueba del Hidrómetro

Tiempo seg	Profundidad Z (mm)	Temperatura °	Gs	Constante K	D mm	% que pasa
15	87.57	23	2.76	0.01279	0.03090314	95.43
30	85.57	23	2.76	0.01279	0.02160084	93.26
60	83.57	23	2.76	0.01279	0.01509455	88.92
120	80.57	23	2.76	0.01279	0.01048013	84.59
300	76.57	23	2.76	0.01279	0.00646159	75.91
600	72.57	23	2.76	0.01279	0.00444809	69.40
900	70.57	23	2.76	0.01279	0.00358145	65.07
1800	66.57	23	2.76	0.01279	0.00245965	58.56
3600	63.57	23	2.76	0.01279	0.00169959	52.05
7200	60.57	23	2.76	0.01279	0.00117309	43.38
14400	58.57	23	2.76	0.01279	0.00081569	34.70
28800	57.57	23	2.76	0.01279	0.00057184	28.20
86400	56.57	23	2.76	0.01279	0.00032727	23.86
172800	55.57	23	2.76	0.01279	0.00022936	21.69

Tabla 56. Prueba de Azul de metileno

Valor azul total	ml/g	11.6
Índice de Nocividad	ml/g	11.6
Coloides	ml/g	11.6
Valor azul coloides	ml/g	1160
No. De moles	mol ml/g ²	3.63
No. De moléculas	mol ml/g ²	2.18 x 10 ²⁴
Superficie específica	m ² /g	2,834,000
Superficie específica (corrección)	m ² /g	288.34

Tabla 57. Prueba de contracción Lineal con diferentes porcentajes de cal

Contracción Lineal (QRO) suelo + cal					
Prueba	Capsula	L. Molde	Cal	L. Muestra Seca	Contracción Lineal
1	Rectangular	91.63	0%	79.57	13.16%
2	Rectangular	91.63	2%	81.35	11.22%
3	Rectangular	91.63	4%	82.80	9.64%
4	Rectangular	91.63	6%	84.70	7.56%
5	Rectangular	91.63	8%	83.65	8.71%
6	Rectangular	91.63	10%	83.78	8.57%

12.2. Pruebas sin inclusiones

Tabla 58. Expansión Natural remoldeada

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/03/2023	0	seg	0	0.1000	-0.1000	1.9900	100.0373	0.51%
"	30	seg	0.5	0.2600	-0.2600	2.0060	100.8416	1.31%
"	1	min	1	0.4600	-0.4600	2.0260	101.8470	2.32%
"	2	min	2	0.6500	-0.6500	2.0450	102.8022	3.28%
"	4	min	4	0.8200	-0.8200	2.0620	103.6567	4.14%
"	8	min	8	0.9900	-0.9900	2.0790	104.5113	5.00%
"	15	min	15	1.1500	-1.1500	2.0950	105.3157	5.81%
"	30	min	30	1.3000	-1.3000	2.1100	106.0697	6.57%
"	1	hr	60	1.4800	-1.4800	2.1280	106.9746	7.47%
"	2	hr	120	1.6650	-1.6650	2.1465	107.9046	8.41%
"	4	hr	240	1.8500	-1.8500	2.1650	108.8346	9.34%
"	8	hr	480	2.1150	-2.1150	2.1915	110.1667	10.68%
19/03/2023	24	hr	1440	2.2500	-2.2500	2.2050	110.8454	11.36%
20/03/2023	48	hr	2880	2.3000	-2.3000	2.2100	111.0967	11.62%
23/03/2023	120	hr	7200	2.4100	-2.4100	2.2210	111.6497	12.17%
25/03/2023	168	hr	10080	2.4400	-2.4400	2.2240	111.8005	12.32%
30/03/2023	288	hr	17280	2.4600	-2.4600	2.2260	111.9010	12.42%
03/04/2023	384	hr	23040	2.4700	-2.4700	2.2270	111.9513	12.47%
05/03/2023	432	hr	25920	2.4800	-2.4800	2.2280	112.0016	12.53%
08/03/2023	504	hr	30240	2.4850	-2.4850	2.2285	112.0267	12.55%

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

Tabla 59. Expansión Natural inalterada

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/03/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.1400	-0.1400	1.9840	92.2362	0.71%
"	1	min	1	0.2100	-0.2100	1.9910	92.5616	1.07%
"	2	min	2	0.2800	-0.2800	1.9980	92.8870	1.42%
"	4	min	4	0.3500	-0.3500	2.0050	93.2125	1.78%
"	8	min	8	0.3900	-0.3900	2.0090	93.3984	1.98%
"	15	min	15	0.4300	-0.4300	2.0130	93.5844	2.18%
"	30	min	30	0.5220	-0.5220	2.0222	94.0121	2.65%
"	1	hr	60	0.6200	-0.6200	2.0320	94.4677	3.15%
"	2	hr	120	0.7200	-0.7200	2.0420	94.9326	3.65%
"	4	hr	240	0.7800	-0.7800	2.0480	95.2115	3.96%
"	8	hr	480	0.8500	-0.8500	2.0550	95.5370	4.31%
19/03/2023	24	hr	1440	1.0500	-1.0500	2.0750	96.4668	5.33%
20/03/2023	48	hr	2880	1.1800	-1.1800	2.0880	97.0711	5.99%
23/03/2023	120	hr	7200	1.3500	-1.3500	2.1050	97.8615	6.85%
25/03/2023	168	hr	10080	1.4300	-1.4300	2.1130	98.2334	7.26%
30/03/2023	288	hr	17280	1.5500	-1.5500	2.1250	98.7913	7.87%
03/04/2023	384	hr	23040	1.6000	-1.6000	2.1300	99.0237	8.12%
05/03/2023	432	hr	25920	1.6200	-1.6200	2.1320	99.1167	8.22%
08/03/2023	504	hr	30240	1.6300	-1.6300	2.1330	99.1632	8.27%

Tabla 60. Presión de expansión remoldeada

Remoldeada		
Altura (cm)	e	ton/m2
1.980	0.837	1
1.984	0.870	1
1.996	0.903	1
2.017	0.935	1
2.033	0.968	1
2.048	1.001	1
2.062	1.034	1
2.081	1.067	1
2.104	1.099	1
2.119	1.132	1
2.222	1.165	1
2.256	1.198	1
2.281	1.231	1
2.287	1.263	1
2.292	1.296	1
2.293	1.296	1
2.284	1.254	6
2.257	1.224	16
	1.098	36
	0.815	76

Tabla 61. Presión de expansión inalterada

Inalterada		
Altura (cm)	e	ton/m2
1.970	0.730	1
1.984	0.763	1
1.991	0.796	1
1.998	0.828	1
2.005	0.861	1
2.009	0.894	1
2.013	0.927	1
2.022	0.960	1
2.032	0.992	1
2.042	1.025	1
2.048	1.058	1
2.055	1.091	1
2.075	1.124	1
2.088	1.156	1
2.105	1.189	1
2.113	1.222	1
2.087	1.097	6
2.643	0.974	16
2.012	0.786	36
1.952	0.612	76

12.3. Pruebas con inclusiones

Tabla 62. Expansión con una columna (2% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/03/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.1400	-0.1400	1.9840	92.2362	0.71%
"	1	min	1	0.2100	-0.2100	1.9910	92.5616	1.07%
"	2	min	2	0.2800	-0.2800	1.9980	92.8870	1.42%
"	4	min	4	0.3500	-0.3500	2.0050	93.2125	1.78%
"	8	min	8	0.3900	-0.3900	2.0090	93.3984	1.98%
"	15	min	15	0.4300	-0.4300	2.0130	93.5844	2.18%
"	30	min	30	0.5220	-0.5220	2.0222	94.0121	2.65%
"	1	hr	60	0.6200	-0.6200	2.0320	94.4677	3.15%
"	2	hr	120	0.7200	-0.7200	2.0420	94.9326	3.65%
"	4	hr	240	0.7800	-0.7800	2.0480	95.2115	3.96%
"	8	hr	480	0.8500	-0.8500	2.0550	95.5370	4.31%
19/03/2023	24	hr	1440	0.9500	-0.9500	2.0650	96.0019	4.82%
20/03/2023	48	hr	2880	1.0000	-1.0000	2.0700	96.2343	5.08%
23/03/2023	120	hr	7200	1.0800	-1.0800	2.0780	96.6062	5.48%
25/03/2023	168	hr	10080	1.1000	-1.1000	2.0800	96.6992	5.58%
30/03/2023	288	hr	17280	1.1300	-1.1300	2.0830	96.8387	5.74%
03/04/2023	384	hr	23040	1.1500	-1.1500	2.0850	96.9317	5.84%
05/03/2023	432	hr	25920	1.1600	-1.1600	2.0860	96.9781	5.89%
08/03/2023	504	hr	30240	1.1700	-1.1700	2.0870	97.0246	5.94%

"Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas"

Tabla 63. Expansión con dos columnas (4% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/20/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9800	99.5346	0.00%
"	30	seg	0.5	0.0500	-0.0500	1.9850	99.7860	0.25%
"	1	min	1	0.1200	-0.1200	1.9920	100.1378	0.61%
"	2	min	2	0.1800	-0.1800	1.9980	100.4395	0.91%
"	4	min	4	0.2500	-0.2500	2.0050	100.7914	1.26%
"	8	min	8	0.3250	-0.3250	2.0125	101.1684	1.64%
"	15	min	15	0.4100	-0.4100	2.0210	101.5957	2.07%
"	30	min	30	0.5150	-0.5150	2.0315	102.1235	2.60%
"	1	hr	60	0.6850	-0.6850	2.0485	102.9781	3.46%
"	2	hr	120	0.8850	-0.8850	2.0685	103.9835	4.47%
"	4	hr	240	1.0500	-1.0500	2.0850	104.8130	5.30%
"	8	hr	480	1.2000	-1.2000	2.1000	105.5670	6.06%
19/02/2023	24	hr	1440	1.4300	-1.4300	2.1230	106.7232	7.22%
20/02/2023	48	hr	2880	1.5700	-1.5700	2.1370	107.4270	7.93%
22/02/2023	96	hr	5760	1.7100	-1.7100	2.1510	108.1308	8.64%
23/02/2023	120	hr	7200	1.7500	-1.7500	2.1550	108.3319	8.84%
28/02/2023	240	hr	14400	1.8300	-1.8300	2.1630	108.7340	9.24%
02/03/2023	312	hr	18720	1.8500	-1.8500	2.1650	108.8346	9.34%
08/03/2023	456	hr	27360	1.8500	-1.8500	2.1650	108.8346	9.34%
10/03/2023	504	hr	30240	1.8500	-1.8500	2.1650	108.8346	9.34%

"Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas"

Tabla 64. Expansión con tres columnas (6% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/20/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	1	min	1	-0.0200	0.0200	1.9680	91.4923	-0.10%
"	2	min	2	-0.1100	0.1100	1.9590	91.0739	-0.56%
"	4	min	4	-0.1700	0.1700	1.9530	90.7950	-0.86%
"	8	min	8	-0.1300	0.1300	1.9570	90.9809	-0.66%
"	15	min	15	-0.0350	0.0350	1.9665	91.4226	-0.18%
"	30	min	30	0.0900	-0.0900	1.9790	92.0037	0.46%
"	1	hr	60	0.2300	-0.2300	1.9930	92.6546	1.17%
"	2	hr	120	0.4500	-0.4500	2.0150	93.6774	2.28%
"	4	hr	240	0.5600	-0.5600	2.0260	94.1887	2.84%
"	8	hr	480	0.7000	-0.7000	2.0400	94.8396	3.55%
19/02/2023	24	hr	1440	0.8800	-0.8800	2.0580	95.6764	4.47%
20/02/2023	48	hr	2880	0.9600	-0.9600	2.0660	96.0483	4.87%
22/02/2023	96	hr	5760	1.0200	-1.0200	2.0720	96.3273	5.18%
23/02/2023	120	hr	7200	1.0500	-1.0500	2.0750	96.4668	5.33%
28/02/2023	240	hr	14400	1.1000	-1.1000	2.0800	96.6992	5.58%
02/03/2023	312	hr	18720	1.1200	-1.1200	2.0820	96.7922	5.69%
08/03/2023	456	hr	27360	1.1300	-1.1300	2.0830	96.8387	5.74%
10/03/2023	504	hr	30240	1.1400	-1.1400	2.0840	96.8852	5.79%

Tabla 65. Humedad del suelo con columnas de cal

Contenido de Agua						
Wf	Wf + Wm	Wf + Ws	Wm	Ws	w(%)	Columna
125.9	130.4	128.5	4.5	2.55	76.47	A
124.3	130.2	127.6	5.9	3.26	80.98	B
126.8	132.5	129.9	5.7	3.1	83.87	C

"Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas"

Tabla 66. Expansión con una columna (4% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/04/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9800	99.5346	0.00%
"	30	seg	0.5	0.0000	0.0000	1.9800	99.5346	0.00%
"	1	min	1	0.0700	-0.0700	1.9870	99.8865	0.35%
"	2	min	2	0.1300	-0.1300	1.9930	100.1881	0.66%
"	4	min	4	0.2000	-0.2000	2.0000	100.5400	1.01%
"	8	min	8	0.2500	-0.2500	2.0050	100.7914	1.26%
"	15	min	15	0.3200	-0.3200	2.0120	101.1432	1.62%
"	30	min	30	0.4200	-0.4200	2.0220	101.6459	2.12%
"	1	hr	60	0.5000	-0.5000	2.0300	102.0481	2.53%
"	2	hr	120	0.5600	-0.5600	2.0360	102.3497	2.83%
"	4	hr	240	0.6300	-0.6300	2.0430	102.7016	3.18%
"	19	hr	1140	0.7500	-0.7500	2.0550	103.3049	3.79%
19/04/2023	66	hr	3960	0.8500	-0.8500	2.0650	103.8076	4.29%
20/04/2023	90	hr	5400	0.8900	-0.8900	2.0690	104.0086	4.49%
22/04/2023	117	hr	7020	0.9200	-0.9200	2.0720	104.1594	4.65%
23/04/2023	140	hr	8400	0.9500	-0.9500	2.0750	104.3103	4.80%
28/04/2023	240	hr	14400	0.9900	-0.9900	2.0790	104.5113	5.00%
02/05/2023	312	hr	18720	1.0200	-1.0200	2.0820	104.6621	5.15%
08/05/2023	456	hr	27360	1.0400	-1.0400	2.0840	104.7627	5.25%
10/05/2023	504	hr	30240	1.0500	-1.0500	2.0850	104.8130	5.30%

"Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas"

Tabla 67. Expansión con una columna (6% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/04/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.1000	-0.1000	1.9800	92.0502	0.51%
"	1	min	1	0.1700	-0.1700	1.9870	92.3756	0.86%
"	2	min	2	0.2200	-0.2200	1.9920	92.6081	1.12%
"	4	min	4	0.2900	-0.2900	1.9990	92.9335	1.47%
"	8	min	8	0.3500	-0.3500	2.0050	93.2125	1.78%
"	15	min	15	0.3900	-0.3900	2.0090	93.3984	1.98%
"	30	min	30	0.4500	-0.4500	2.0150	93.6774	2.28%
"	1	hr	60	0.5000	-0.5000	2.0200	93.9098	2.54%
"	2	hr	120	0.5800	-0.5800	2.0280	94.2817	2.94%
"	4	hr	240	0.6300	-0.6300	2.0330	94.5142	3.20%
"	19	hr	1140	0.7200	-0.7200	2.0420	94.9326	3.65%
19/04/2023	66	hr	3960	0.8000	-0.8000	2.0500	95.3045	4.06%
20/04/2023	90	hr	5400	0.8400	-0.8400	2.0540	95.4905	4.26%
22/04/2023	117	hr	7020	0.8700	-0.8700	2.0570	95.6299	4.42%
23/04/2023	140	hr	8400	0.9000	-0.9000	2.0600	95.7694	4.57%
28/04/2023	240	hr	14400	0.9400	-0.9400	2.0640	95.9554	4.77%
02/05/2023	312	hr	18720	0.9700	-0.9700	2.0670	96.0948	4.92%
08/05/2023	456	hr	27360	0.9900	-0.9900	2.0690	96.1878	5.03%
10/05/2023	504	hr	30240	1.0000	-1.0000	2.0700	96.2343	5.08%

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

Tabla 68. Expansión con dos columnas (2% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
18/04/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.1400	-0.1400	1.9840	92.2362	0.71%
"	1	min	1	0.2100	-0.2100	1.9910	92.5616	1.07%
"	2	min	2	0.2800	-0.2800	1.9980	92.8870	1.42%
"	4	min	4	0.3500	-0.3500	2.0050	93.2125	1.78%
"	8	min	8	0.3900	-0.3900	2.0090	93.3984	1.98%
"	15	min	15	0.4300	-0.4300	2.0130	93.5844	2.18%
"	30	min	30	0.5220	-0.5220	2.0222	94.0121	2.65%
"	1	hr	60	0.7200	-0.7200	2.0420	94.9326	3.65%
"	2	hr	120	0.8800	-0.8800	2.0580	95.6764	4.47%
"	4	hr	240	1.0700	-1.0700	2.0770	96.5597	5.43%
"	8	hr	480	1.2800	-1.2800	2.0980	97.5360	6.50%
19/04/2023	24	hr	1440	1.5300	-1.5300	2.1230	98.6983	7.77%
20/04/2023	48	hr	2880	1.6700	-1.6700	2.1370	99.3491	8.48%
22/04/2023	120	hr	7200	1.8600	-1.8600	2.1560	100.2324	9.44%
23/04/2023	168	hr	10080	1.9100	-1.9100	2.1610	100.4649	9.70%
28/04/2023	288	hr	17280	1.9900	-1.9900	2.1690	100.8368	10.10%
02/05/2023	384	hr	23040	2.0300	-2.0300	2.1730	101.0228	10.30%
08/05/2023	432	hr	25920	2.0400	-2.0400	2.1740	101.0693	10.36%
10/05/2023	504	hr	30240	2.0500	-2.0500	2.1750	101.1158	10.41%

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

Tabla 69. Expansión con dos columnas (6% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm3)	Expansión %
18/04/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.1000	-0.1000	1.9800	92.0502	0.51%
"	1	min	1	0.1700	-0.1700	1.9870	92.3756	0.86%
"	2	min	2	0.2600	-0.2600	1.9960	92.7940	1.32%
"	4	min	4	0.3300	-0.3300	2.0030	93.1195	1.68%
"	8	min	8	0.3900	-0.3900	2.0090	93.3984	1.98%
"	15	min	15	0.4800	-0.4800	2.0180	93.8168	2.44%
"	30	min	30	0.5500	-0.5500	2.0250	94.1423	2.79%
"	1	hr	60	0.6700	-0.6700	2.0370	94.7001	3.40%
"	2	hr	120	0.7700	-0.7700	2.0470	95.1650	3.91%
"	4	hr	240	0.8500	-0.8500	2.0550	95.5370	4.31%
"	19	hr	1140	1.0400	-1.0400	2.0740	96.4203	5.28%
19/04/2023	66	hr	3960	1.2200	-1.2200	2.0920	97.2571	6.19%
20/04/2023	90	hr	5400	1.2800	-1.2800	2.0980	97.5360	6.50%
22/04/2023	117	hr	7020	1.3500	-1.3500	2.1050	97.8615	6.85%
23/04/2023	140	hr	8400	1.4000	-1.4000	2.1100	98.0939	7.11%
28/04/2023	240	hr	14400	1.4900	-1.4900	2.1190	98.5123	7.56%
02/05/2023	312	hr	18720	1.5300	-1.5300	2.1230	98.6983	7.77%
08/05/2023	456	hr	27360	1.5700	-1.5700	2.1270	98.8842	7.97%
10/05/2023	504	hr	30240	1.5800	-1.5800	2.1280	98.9307	8.02%

“Columnas de cal para reducir la expansión en arcillas”

Tabla 70. Expansión con cuatro columnas (8% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
29/05/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	30	seg	0.5	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	1	min	1	-0.0100	0.0100	1.9690	91.5388	-0.05%
"	2	min	2	0.0000	0.0000	1.9700	91.5853	0.00%
"	4	min	4	0.0700	-0.0700	1.9770	91.9107	0.36%
"	8	min	8	0.1500	-0.1500	1.9850	92.2827	0.76%
"	15	min	15	0.2200	-0.2200	1.9920	92.6081	1.12%
"	30	min	30	0.3200	-0.3200	2.0020	93.0730	1.62%
"	14	hr	840	0.7200	-0.7200	2.0420	94.9326	3.65%
31/05/2023	48	hr	2880	0.9000	-0.9000	2.0600	95.7694	4.57%
01/06/2023	72	hr	4320	0.9400	-0.9400	2.0640	95.9554	4.77%
02/06/2023	86	hr	5160	0.9600	-0.9600	2.0660	96.0483	4.87%
04/06/2023	144	hr	8640	1.0150	-1.0150	2.0715	96.3040	5.15%
05/06/2023	159	hr	9540	1.0250	-1.0250	2.0725	96.3505	5.20%
05/06/2023	170	hr	10200	1.0350	-1.0350	2.0735	96.3970	5.25%
06/06/2023	194	hr	11640	1.0550	-1.0550	2.0755	96.4900	5.36%

Tabla 71. Expansión después de secado 1 con una columna (2% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
02/07/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9800	99.5346	0.00%
"	30	seg	0.5	-0.2700	0.2700	1.9530	98.1773	-1.36%
"	1	min	1	-0.3200	0.3200	1.9480	97.9260	-1.62%
"	2	min	2	-0.3100	0.3100	1.9490	97.9762	-1.57%
"	4	min	4	-0.2600	0.2600	1.9540	98.2276	-1.31%
"	8	min	8	-0.1400	0.1400	1.9660	98.8308	-0.71%
"	15	min	15	0.0500	-0.0500	1.9850	99.7860	0.25%
"	30	min	30	0.2000	-0.2000	2.0000	100.5400	1.01%
"	1	hr	60	0.4100	-0.4100	2.0210	101.5957	2.07%
"	2	hr	120	0.5500	-0.5500	2.0350	102.2995	2.78%
"	4	hr	240	0.6800	-0.6800	2.0480	102.9530	3.43%
"	8	hr	480	0.8300	-0.8300	2.0630	103.7070	4.19%
03/07/2023	25	hr	1500	0.9100	-0.9100	2.0710	104.1092	4.60%
04/07/2023	50	hr	3000	0.9300	-0.9300	2.0730	104.2097	4.70%
05/07/2023	74	hr	4440	0.9300	-0.9300	2.0730	104.2097	4.70%
06/07/2023	94	hr	5640	0.9400	-0.9400	2.0740	104.2600	4.75%
07/07/2023	118	hr	7080	0.9400	-0.9400	2.0740	104.2600	4.75%
08/07/2023	142	hr	8520	0.9400	-0.9400	2.0740	104.2600	4.75%

Tabla 72. Expansión después de secado 2 con una columna (2% cal)

Fecha	Tiempo		T (min)	Lectura (mm)	Deformación (mm)	Altura de espécimen (cm)	Volumen total (cm ³)	Expansión %
09/07/2023	0	seg	0	0.0000	0.0000	1.9800	99.5346	0.00%
"	30	seg	0.5	-0.4700	0.4700	1.9330	97.1719	-2.37%
"	1	min	1	-0.4600	0.4600	1.9340	97.2222	-2.32%
"	2	min	2	-0.3700	0.3700	1.9430	97.6746	-1.87%
"	4	min	4	-0.2400	0.2400	1.9560	98.3281	-1.21%
"	8	min	8	-0.0700	0.0700	1.9730	99.1827	-0.35%
"	15	min	15	0.1100	-0.1100	1.9910	100.0876	0.56%
"	30	min	30	0.3500	-0.3500	2.0150	101.2941	1.77%
"	1	hr	60	0.6250	-0.6250	2.0425	102.6765	3.16%
"	2	hr	120	0.7500	-0.7500	2.0550	103.3049	3.79%
"	4	hr	240	0.8200	-0.8200	2.0620	103.6567	4.14%
"	8	hr	480	0.9000	-0.9000	2.0700	104.0589	4.55%
10/07/2023	23	hr	1380	0.9500	-0.9500	2.0750	104.3103	4.80%
11/07/2023	52	hr	3120	0.9600	-0.9600	2.0760	104.3605	4.85%
12/07/2023	72	hr	4320	0.9600	-0.9600	2.0760	104.3605	4.85%
13/07/2023	96	hr	5760	0.9650	-0.9650	2.0765	104.3857	4.87%
14/07/2023	123	hr	7380	0.9700	-0.9700	2.0770	104.4108	4.90%
15/07/2023	147	hr	8820	0.9700	-0.9700	2.0770	104.4108	4.90%