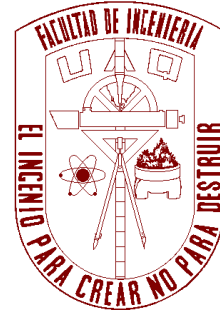




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO**

Facultad de Ingeniería

División de Estudios y Posgrado



**“ESTUDIO DEL MÉTODO DE SUSTITUCIÓN APLICADO EN ARCILLAS
EXPANSIVAS DE QUERÉTARO”**

TESIS:

**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
HENDRICK HERNÁNDEZ VILLARES**

**DIRIGIDO POR:
Dra. Teresa López Lara**

SANTIAGO DE QUERETARO, QRO. OCTUBRE DE 2009



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA EN CIENCIAS
CON LINEA TERMINAL EN CONSTRUCCIÓN**

ESTUDIO DEL MÉTODO DE SUSTITUCIÓN APLICADO EN ARCILLAS EXPANSIVAS DE QUERÉTARO

T E S I S

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Hendrick Hernández Villares

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

S I N O D A L E S

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Secretario

Firma

Dr. Jaime Horta Rangel

Vocal

Firma

Dr. Alfredo Pérez García

Suplente

Firma

M.C. Joaquín Noriega Montes

Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre de 2009
M e x i c o

RESUMEN

Este trabajo analiza la eficiencia del uso de materiales inertes como lo es la arena limosa (SM) conocido regionalmente como “Tepetate” y algunas mezclas del mismo con cal y cemento, utilizado frecuentemente en el método de sustitución en suelos expansivos; dicho método consiste en retirar el suelo expansivo y colocar un material con características inertes. Existen incertidumbres en cuanto a las condiciones de permeabilidad y resistencia en la aplicación de este método, por lo tanto es importante abundar en el estudio de estas bajo las características que presenta el tepetate. Por otro lado, también se analizarán otras mezclas de materiales tales como arcilla con cal y cemento con la finalidad de brindar más alternativas. Este estudio se avocará por lo tanto a evaluar las propiedades de permeabilidad y resistencia en las diferentes mezclas. De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que existe mayor resistencia a la compresión simple para las mezclas de tepetate-cemento en comparación con las mezclas de tepetate-cal, sin embargo, la permeabilidad aumentó de forma considerable para ambos casos. Las resistencias obtenidas en las mezclas suelo-cemento fueron mayores que las mezclas suelo-cal. En lo que respecta a la permeabilidad, la mezcla del suelo-cemento presentó una disminución notable en comparación con la mezcla suelo-cal. Por lo tanto, se concluye que la arena limosa (SM) conocido en la región como “tepetate”, en condiciones naturales presenta permeabilidad semejante al de una arena fina y mezclado con cal y cemento lo incrementa. Por lo tanto, este material en condiciones naturales y mezclado con cal y cemento no cumple el objetivo de ser un material eficiente que pueda ser utilizado en sustitución de la arcilla expansiva debido a su alta permeabilidad, aunque sea inerte.

Palabras clave: Tepetate, arcilla, cal, cemento, permeabilidad y resistencia.

ABSTRACT

This work analyzes the efficiency of the use of inert materials such as the slime sand (SM) known it regionally as "Tepetate" and some mixtures of same one with lime and cement used frequently in the substitution method to expansive soils, this method implies withdrawing the expansive soil and placing a material with inert characteristics. Uncertainties exist in the permeability and resistance conditions in the application of this method; therefore it is important to abound in the study in these with the characteristics that tepetate presents. On the other hand, also we will be analyzing other mixtures of materials as clay-lime and clay-cement whit the purpose of offering more alternatives. This study it will focus to evaluating the permeability and resistance properties in different mixtures. In agreement to the obtained results one we observed major resistance to the simple compression for the tepetate-cement mixtures in comparison with the mixtures of tepetate-lime, nevertheless, the permeability increased of considerable form for both cases. Regarding the permeability, the clay-cement mixtures presented a decrease in comparison with the clay-lime mixtures. Therefore the slime sand present permeability as the fine sand. In these conditions the slime sand in natural conditions and mixed with cement and lime does not a good alternative.

Key words: Tepetate, clay, lime, cement, permeability and resistance.

DEDICATORIA

Como resultado de un gran esfuerzo dedico este trabajo a mis padres, quienes han sido mis mejores maestros a lo largo de mi vida y me han dado lo mejor de ellos para ser día con día una mejor persona. Por tu amistad y por creer en mí, en que podía lograrlo, te lo dedico Papá. Por tu amor materno incomparable y por velar por mí...te amo Mamá.

A mi esposa Mónica, por apoyarme en todo momento y estar junto a mí en esta grandiosa etapa de mi vida, te amo mimosa. A mi hijo Pablito, porque ahora sé que es el motivo más grande que tengo a diario; contigo he comenzado a vivir lo que antes no comprendía de mis padres, eres muy especial para nosotros, te amamos como no te imaginas.

A mi hermana Zugeiri, porque sé que aun en tu silencio me dices lo mucho que me quieres. A mi Abuelita Lazarita, por que los consejos que me diste en la infancia los llevo bien grabados y han dado buenos frutos. A mi abuelito Alejandro, por que ha sido el mejor ejemplo que he tenido de una persona trabajadora, te admiro. A mi abuelita Cantalicia porque para todos tus nietos tienes tu mejor atención.

A mi familia en general, tíos, primos, sobrinos.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios por permitir que llegara este momento, porque se que todo lo que tengo ha sido por su voluntad, TE AMO DIOS.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro, en especial a la Dra. Teresa López Lara por confiar en mi y su enorme apoyo, por sus consejos tan oportunos. Al Dr. Juan Bosco Hernández, porque me animó en continuar la maestría cuando creí que se cerraban las puertas. Al M.C. Darío Hurtado Maldonado por su apoyo y confianza para formar parte del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad como alumno becario. Al Dr. Gilberto Herrera por su apoyo en todo momento a lo largo de mis estudios. Al M.C. Daniel Vázquez Borges, por ser el papá de los pitufos, gracias por todo. A mis profesores que dieron lo mejor de sí para transmitir sus conocimientos y su basta experiencia. A los laboratoristas, Javier Vega, José Moya, José Alejo, Alejandro Silva, porque con su ayuda logré muchas metas. A Irma por su apoyo a lo largo de mi estancia en el laboratorio.

A mi amigo y hermano Rubén Negrete, por su amistad y su ánimo que me ha brindado desde la carrera, gracias cachetón!!!. A mi amigo Omar Chávez, por enseñarme esto de laboratorio, gracias papirrín!!!. A Elizabeth Cabrera, por su apoyo y por cuidar de Pablito cuando ensayaba expansiones, gracias Eliza la de la gran sonrisa. A Pedro Pacheco, porque a pesar de tantas carencias que vivimos durante la maestría existía tu amistad y tus bromas para poder olvidar un momento, gracias viejo payasooo!!!. No podía faltar Gerardo Sanabria por apoyarme en varias ocasiones, gracias tamarindo!!!.

Un agradecimiento muy especial a mis jefes, al M.I. Ricardo Torres Velázquez por confiar en mí y apoyarme en la conclusión de este trabajo, porque me ha enseñado a ser mejor profesionalista día con día. Al Dr. Víctor Torres Verdín porque me ha dado todo su apoyo y porque he conocido a una gran persona. Los admiro como profesionistas y los admiro más como personas, mi más sincero agradecimiento.

INDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
INDICE.....	v
INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
I. INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes.	1
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivo.	6
1.4 Hipótesis.	6
II. SUELOS EXPANSIVOS	7
2.1 Definición.	7
2.2 Génesis de las arcillas	7
2.2.1 Intercambio catiónico.....	8
2.2.2 Superficie específica.....	9
2.2.3 Adsorción y Absorción.	9
2.2.4 Capacidad de expansión.	10
2.2.5 Plasticidad	12
2.2.6 Tixotropía.....	12
2.3 Zonas en donde se presentan suelos expansivos.....	13
2.4 Expansión, contracción y capilaridad.	14
2.5 Capa activa de los suelos expansivos.....	14
2.6 Mineralogía.	15
2.7 Identificación de suelos expansivos.	17
2.7.1 Absorción Atómica.....	17
2.7.2 Análisis Térmico Diferencial.....	19
2.7.3 Difracción de rayos X.....	20
2.7.4 Espectroscopia de fluorescencia.	21
2.7.5 Microscopía Electrónica de Barrido.	23
III. MEJORAMIENTO DE SUELOS.....	24
3.1 La cal.....	24
3.1.1 Definición.....	24
3.1.2 La cal en la historia de la construcción.	24

3.1.3 Estabilización suelo-cal.	25
3.2 Cemento.....	26
3.2.1 Definición.....	26
3.2.2 Historia del cemento en la construcción.	26
3.2.3 Estabilización suelo-cemento.	27
3.3 Estabilización con cloruro de calcio.....	28
3.4 Estabilización con cloruro de sodio.	29
3.4.1 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio.	30
3.5 Método de sustitución.	30
3.6 Inundación.....	31
3.7 Aislamiento.....	31
IV. METODOLOGÍA.....	32
4.1 Exploración y muestreo.....	32
4.1.1 Ubicación de la zona de estudio.	32
4.1.2 Pozos a cielo abierto.	32
4.1.3 Toma de muestra alterada e inalterada.	33
4.2 Límites de Atterberg.	37
4.2.1 Limite líquido.....	37
4.2.2 Limite plástico.	38
4.2.3 Limite de contracción.....	38
4.2.4 Estados de consistencia.	38
4.2.5 Determinación del límite líquido.....	39
4.2.6 Características de la Copa de Casagrande.	39
4.2.7 Preparación de la muestra.....	39
4.2.8 Preparación del material.	40
4.2.9 Procedimiento de prueba.....	40
4.2.10 Determinación del límite plástico.	42
4.2.11 Preparación del material.	42
4.2.12 Procedimiento de prueba.....	42
4.3 Prueba proctor estándar.....	43
4.3.1 Preparación de la muestra.....	44
4.3.2 Procedimiento de prueba.....	44
4.3.3 Determinación del contenido de agua o humedad del suelo.	45
4.4 Permeabilidad	48
4.4.1 Coeficiente de permeabilidad	48
4.4.2 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo.	49
4.4.3 Preparación de la muestra.....	50
4.4.4 Procedimiento de prueba.....	50
4.5 Determinación del pH.....	52
4.5.1 Preparación de la muestra.....	53
4.5.2 Procedimiento de prueba.....	54

4.6 Densidad de sólidos.....	55
4.6.1 Preparación de la muestra.....	55
4.6.2 Calibración del matraz.....	56
4.6.3 Determinación del peso específico relativo de los sólidos (S _s).....	57
4.7 Ensayo de compresión simple.....	58
4.7.1 Preparación de las muestras.....	59
4.7.2 Procedimiento de prueba.....	61
4.8 Expansión.....	64
4.8.1 Preparación de la muestra.....	65
4.8.2 Procedimiento de prueba.....	66
4.9 Succión.....	67
4.9.1 Preparación de la muestra.....	67
4.9.2 Procedimiento de prueba.....	67
V. RESULTADOS.....	72
5.1 Materiales utilizados.....	72
5.2 Caracterización de los materiales.....	72
5.3 Determinación del γ_d máx y humedad óptima.....	75
5.4 Propiedades índice de las mezclas.....	76
5.5 Compresión simple.....	81
5.6 Permeabilidad.....	82
5.7 Expansión.....	84
5.8 Succión.....	85
5.9 Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH.....	87
5.10 Comportamiento succión-permeabilidad.....	88
5.11 Comportamiento succión-expansión.....	89
5.12 Comportamiento de resistencia & permeabilidad.....	90
5.13 Análisis de costos.....	91
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍA.....	99
ANEXOS.....	105

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1.1	Propiedades ingenieriles de los componentes de un suelo (Ingles O. G.,Metcalf. 1972).	4
2.1	Intercambio catiónico de algunos minerales.	9
2.2	Superficie específica de algunos minerales.	9
2.3	Guía de estimación de cambio de volumen en suelos expansivos (Chen, 1975).	11
2.4	Clasificación de suelos expansivos según la HUD/FHA.	11
4.1	Profundidad de los sondeos, primera etapa.	33
4.2	Profundidad de los sondeos, segunda etapa	33
4.3	Selección de masa mínima de acuerdo al tamaño de partícula.	56
5.1	Características del tepetate	73
5.2	Características de la arcilla, PCA-01	73
5.3	Características de la arcilla, PCA-02	74
5.4	Características de la arcilla, PCA-03	74
5.5	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ y humedad óptima del tepetate	75
5.6	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ y humedad óptima de la arcilla.	75
5.7	Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH de la arcilla-cal	87
5.8	Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH de la arcilla-cemento.	88
5.9	Análisis de costo de cimentación por sustitución y compactación mecánica del tepetate.	92
5.10	Análisis de costo en las diferentes modalidades de estabilización por capas de 0.20 m.	93

INDICE DE FIGURAS.

Figura		Página
2.1	Lámina sílica.	15
2.2	Lámina alumínica.	16
3.1	Proceso de producción de la cal.	24
4.1	Croquis de localización.	32
4.2	Zona de estudio, primera etapa.	34
4.3	Capa activa.	35
4.4	Pozo a cielo abierto.	35
4.5	Zona de exploración, segunda etapa.	36
4.6	Exploración y muestreo.	36
4.7	Muestra inalterada, pozo a cielo abierto.	37
4.8	Determinación del límite líquido.	41
4.9	Determinación de la humedad en el límite líquido y plástico.	43
4.10	Cribado del tepetate por la malla No. 4.	46
4.11	Equipo proctor estándar.	47
4.12	Determinación de los puntos en la curva de compactación.	47
4.13	Determinación de la permeabilidad (carga variable).	52
4.14	Calibración del potenciómetro	53
4.15	Determinación del pH	54
4.16	Extracción de aire mediante la bomba de vacío.	58
4.17	Dimensiones de las probetas.	59
4.18	Muestra inalterada.	60
4.19	Aplicación de la carga estática.	61
4.20	Ensaye a compresión simple.	62
4.21	Labrado de muestra para determinar el porcentaje de expansión.	65
4.22	Ensaye de expansión.	66
4.23	Contenedor de vidrio.	68
5.1	Propiedades índice, arcilla-cal 2%	76
5.2	Propiedades índice, arcilla-cal 4%.	77
5.3	Propiedades índice, arcilla-cal 6%.	78
5.4	Propiedades índice arcilla-cemento 2%.	78
5.5	Propiedades índice, arcilla-cemento 4%.	79
5.6	Propiedades índice, arcilla-cemento 6%.	80
5.7	Resistencia a la compresión simple del tepetate.	81
5.8	Resistencia a la compresión simple de la arcilla.	82
5.9	Permeabilidad en las mezclas del tepetate.	83
5.10	Permeabilidad en las mezclas de arcilla.	83
5.11	Porcentajes de expansión en muesytas inalteradas, con cal y cemento al 2%.	84
5.12	Porcentajes de expansión con cal y cemento al 4% y 6%.	85
5.13	Succión de la mezcla arcilla-cal.	86
5.14	Succión de la mezcla arcilla-cemento.	86
5.15	Comportamiento de Succión & Permeabilidad.	89
5.16	Correlación Succión & Expansión.	90
5.17	Comportamiento resistencia & permeabilidad en el tepetate.	90
5.18	Relación Resistencia & Permeabilidad en la arcilla	91

I. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes.

Desde hace más de siete décadas el problema de los suelos expansivos empezó a tomar interés para el hombre debido al gran problema que estos representan en el ámbito de la construcción. En 1925, el Dr. Terzaghi publica su libro “Erdbaumechnik” (Mecánica de Suelos) en Viena; y es a partir de este momento cuando nace la mecánica de suelos como ciencia, llamando a su propulsor, “el padre de la mecánica de suelos”.

Los suelos expansivos llamaron la atención a los investigadores y en 1965 se realiza el primer congreso internacional que tuvo lugar en la Universidad A & M, EE.UU., en el cual se aborda el tema de los suelos expansivos. A esta le siguieron otras similares en 1969, 1973, 1980, 1948 y 1992 en diferentes ciudades del mundo.

La presencia de suelos expansivos ha representado un grave problema, pues tan solo en 1973 se reportan pérdidas de hasta 2,255 millones de dólares (estimación promedio anual) debido a la presencia de suelos expansivos (Jones y Holtz, 1973). En lo que se refiere a México, en 1999 se reportaron que las pérdidas causadas por la presencia de suelos expansivos es similar a los daños causados por agentes naturales y geológicos tales como: Huracanes, inundaciones, lluvias extremas, temblores entre otros (López et al 1999). El Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) reporta que en 1999 el gasto nacional por concepto de desastres naturales asciende a \$26,435,880 pesos.

Actualmente, los constructores no enfocan su atención a muchos fenómenos que se presentan en el suelo, como lo es el cambio de humedad, que produce la variación volumétrica, de la cual se han reportado presiones de expansión fuertes en varios países, y México no es la excepción. La permeabilidad del suelo es otro factor a considerar en el proceso de construcción, así como la capacidad de carga del suelo y en casos especiales, suelos susceptibles al colapso.

Si hablamos de los diferentes métodos que hay para abatir este problema podemos ver que en la mayoría de las construcciones predomina uno, el método de sustitución. Analizando los procedimientos constructivos que se utilizan en México podemos darnos cuenta que en la construcción de casas-habitación, carreteras, bordos, presas y en algunos casos edificios se realiza la excavación o cajón, tendido del terraplén o el movimiento de tierra sin verificar previamente las condiciones topográficas, hidráulicas y la geomorfología de la zona y solo se limitan en construir.

De acuerdo a muchos casos de estudio se ha observado que el primer daño es la fuente de humedad que proviene de obras exteriores como drenajes deficientes, jardines, patios de servicio y fugas hidráulicas, (Trejo, 1986). Se han desarrollado diferentes métodos para medir el coeficiente de permeabilidad en suelos, sin embargo, cada método tiene sus limitaciones y se debe seleccionar cuidadosamente el método a utilizar. Se ha buscado medir el coeficiente de permeabilidad para suelos no saturados con un permeámetro (Shangyan Huang, D.G. Fredlund, y S.L. Barbour, 1998). Existen evaluaciones de diferentes métodos para predecir la conductibilidad hidráulica en suelos saturados en arenas finas y gruesas (Robert P. Chapuis, 2004). Se han buscado diferentes alternativas de solución sobre una arcilla al ser mezclado con cloruro de sodio y geosintético (GCLs) con diferentes concentraciones, midiendo la conductividad hidráulica, volumen de poro y resistencia, con el objetivo de determinar las mejores condiciones que se pudiera presentar en un relleno (Robert J. Petrov y Ferry Rowe, 1997).

Se ha analizado la influencia del peso específico seco y peso específico de la masa con la resistencia, succión y compresibilidad concluyendo en un incremento en la dilatancia del suelo. De la misma forma que incrementa la succión incrementan los esfuerzos y un decremento en la compresibilidad del suelo (Alshihabi y Mieussens, 2002). Se ha investigado sobre la eficiencia del cemento Pórtland y cal en la estabilización de arcillas determinando la resistencia a la compresión a 7 y 28 días con diferentes porcentajes, analizando el efecto del curado en su resistencia y plasticidad, así como la compactación a diferentes edades (Prusinki y Bhattacharja, 1999).

Con la finalidad de aportar más opciones para solucionar el problema de los suelos expansivos se ha realizado un experimento en campo reproduciendo el método de sustitución utilizando arcilla expansiva con mezcla de 6-8% de cal y 4% de polímero respecto a su peso seco, encontrando variación de espesores aislando al suelo expansivo que va desde 0.60 a 1.00 m (López-Lara, 2002). En la tabla 1.1 se presentan diferentes tipos de suelos con sus respectivas características ingenieriles, en esta se puede observar la diversidad del comportamiento del suelo. Las propiedades índice juegan un papel realmente modesto en la predicción del comportamiento mecánico de los suelos expansivos (López, L.T. 2008).

El valor de la presión de expansión es aproximadamente la mitad del valor obtenido en especímenes inalterados (Hernández, Z. J.B. 2008). Se ha demostrado que existe una amplia variación en el contenido de agua en arcillas modificadas (López, L.T. 2006). Por otra parte se ha comprobado la fatiga del suelo arcilloso mediante aumentos de humedad y secado (Hernández, Z. J.B. et al 2006). Se ha estudiado la estabilización iónica y con polímeros en la caolinita, illita y montmorilonita del cual no presentan variaciones significativas en sus propiedades ingenieriles (Rauch et al. 2007). En un estudio sobre suelos expansivos se determinó la rapidez de de la estabilización química con cemento, cal, silicato de sodio y polímeros analizando su esfuerzo a la compresión no confinada (Rafalko et al. 2007).

Se han determinado los diferentes factores que influyen en el consumo de energía en mezclas haciendo una relación con el esfuerzo a la compresión simple (She et al. 2007). Respecto estudios en cuanto a la succión de suelo estabilizado se han realizado pruebas en suelos expansivos para validar la predicción química del suelo tratado mediante estas pruebas determinando sus propiedades químicas y físicas, antes y después de realizar la estabilización (Petry and Jiang, 2007).

Tabla 1.1 Propiedades ingenieriles de los componentes de un suelo
(Ingles O. G., Metcalf. 1972).

Componente Propiedades	ARENA	LIMO	MICA	CARBONATO	SULFATO	CAOLIN	ILITA	MONTMORI LONITA	CLORITA	ALOFANO	MATERIA ORGANICA
Permeabilidad:											
Seco	++	.	m	B	B	.	.	.	.	m	++
Húmedo	++	+	+	B	B	.	.	.	.	++	++
Estabilidad Volumétrica	++	++	++	++	++	+	.	--	.	m	+
Plasticidad Cohesión	+-	--	.	.	.	m	+	++	M	++	m
Resistencia:											
Seco		+	+	+	+	B	+	++	B	m	.
Húmedo		.	m	+	B	.	B	.	.	.	.
Compactación con la humedad óptima.	+	m	--	++	+	.	m	--	m	++	--
Estabilidad al intemperismo	++	+	--	++	.	+	B	+	m	.	--
Abrasividad	++	m	.	.	B	.	.	.	.	.	.
m = Moderado - = Bajo + = Alto -- = Muy bajo ++ = Muy alto	PROBLEMAS CUANDO EL MATERIAL ES UNIFORME		LA BIOTTA CAUSA MÁS PROBLEMAS QUE LA MUSCOVITA	SOLUBLE EN ACIDOS	ATACA A LOS CEMENTOS PORTLAND		TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD	TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD	TOMAR EN CUENTA LA SALINIDAD		

Con solo dar un vistazo al pasado nos podemos dar cuenta que la ciencia avanza con el propósito de dar una respuesta a los problemas que se presentan en la vida cotidiana. Sabemos la magnitud del problema que representa un suelo potencialmente inestable, los costos que estos representan y en algunos casos pérdidas humanas.

1.2 Justificación.

En el ámbito de la construcción es común encontrarse con problemas durante la etapa constructiva, en el cual el ingeniero civil, arquitecto o constructor debe resolver de la forma más rápida y económica, hablando desde cambios en el proyecto, materiales y factores climatológicos, entre otros; esto ha llevado a que no siempre la decisión tomada por parte del constructor ha sido la más segura y si el problema lo enfocamos desde un inicio en la etapa constructiva de la cimentación, el problema es aun más grave.

Las arcillas expansivas representan uno de estos problemas y desafortunadamente esto es con lo que comúnmente los especialistas en mecánica de suelos o geotecnia se

enfrentan, ya que al hablar de este tema no solo nos enfocamos a la construcción de edificios, puentes o casa-habitación sino que también se presenta a lo largo de la red carretera en México.

Uno de los mas grandes problemas que afecta una construcción es sin duda alguna el desplantar la cimentación o el cuerpo de terraplén sobre un suelo susceptible a deformaciones o cambios volumétricos. Las consecuencias en algunos casos es casi inmediata o en el transcurso del tiempo, conocidos como asentamientos inmediatos y diferidos, respectivamente y por el otro lado se pueden presentar expansiones o colapso, afectando la construcción a tal punto que la construcción se vuelve insegura y su rehabilitación muy costosa.

Existen diferentes métodos para resolver el problema mencionado anteriormente que se aplican según el problema particular, el factor costo-tiempo o según la zona de ubicación de la obra, la disposición de los materiales y maquinaria. Dentro de estos métodos se encuentra el método de sustitución del cual abundaremos y del mejoramiento del suelo. La finalidad de éste y los demás métodos aterrizan en modificar las condiciones naturales del lugar o del suelo y garantizar la seguridad de la cimentación.

Sin embargo, en el caso particular del método de sustitución, la contribución de nuevas alternativas no ha sido mucha, pues solo se limita en retirar el suelo que representa el problema por otro inerte, sin darle continuidad para saber que pasa después de este proceso con la humedad en épocas de estiaje y de lluvias, con su resistencia y si realmente el material sustituido garantiza que mejora las condiciones hidráulicas del sitio, o previamente asegurar que el material a utilizar cumple con el propósito inicial, el de evitar que el agua esté en contacto con la arcilla potencialmente expansiva.

De aquí surge el interés de dar respuesta, en lo posible, a varias dudas con que se enfrenta el constructor y el mismo especialista en geotecnia que recomienda soluciones a estos problemas, contribuir con una visión diferente para este método buscando variantes en la solución del problema, en particular sobre arcillas expansivas.

1.3 Objetivo.

Determinar si el material inerte (“Tepetate”) que se utiliza en el método de sustitución para suelos expansivos, cumple con propiedades indispensables como baja permeabilidad y resistencia aceptable. Así mismo, proponer y estudiar mezclas con cal y cemento y algunas otras como arcilla con cal y cemento, que puedan ser otra alternativa como material de sustitución.

1.4 Hipótesis.

- El material denominado regionalmente “tepetate” es la solución menos eficiente para resolver el problema mediante el método de sustitución en suelos expansivos debido a la alta permeabilidad que presenta.
- El mejoramiento del suelo, ya sea con cal o cemento disminuye la permeabilidad de este y mejora la resistencia a la compresión simple del suelo. Por lo tanto es una solución más eficiente como material de sustitución.

II. SUELOS EXPANSIVOS

2.1 Definición.

Todos los suelos que tiene la capacidad de sufrir cambios volumétricos en función de la humedad se le conoce como suelos expansivos, esto es, suelos arcillosos con mineral montmorilonita en un clima semiárido. Los asentamientos que sufren las estructuras debido a las deformaciones producto de los aumentos de carga sobre el suelo que los soporta fueron identificados como las causas de los daños en las estructuras, estas no solo pueden presentar daños por asentamientos sino también por expansión. En 1938, el U.S. Burea of Reclamation reconoce la expansión de los suelos como un problema cuando interviene en la cimentación de un sifón del proyecto Owyhee en Oregón (Zepeda, G. J. A., 1989).

Los suelos arcillosos presentan variación de volumen en función de su contenido de humedad, correlativas a las variaciones de presión de poro con los esfuerzos efectivos. Estas variaciones se vuelven importantes cuando es mayor la proporción de partículas, inferiores a 2μ y que sea mas la presencia del mineral montmorilonita.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas a todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a $2\mu\text{m}$. Por lo tanto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, fedelpastos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las $2\mu\text{m}$.

2.2 Génesis de las arcillas

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayoría, productos finales de la meteorización de los silicatos que formados a mayores presiones y temperaturas en el medio exógeno se hidrolizan. Se clasifican por su textura como clásticos; en ella se mantienen ciertos minerales antígenos

unidos por una matriz cementante. El contenido de arcilla en un suelo o roca tiene mucho que ver según los factores climáticos incidentes. La cantidad de arcilla aumenta en función de la humedad y la temperatura, pasando a escala logarítmica para condiciones tropicales y subtropicales (Barbeta, 2002).

2.2.1 Intercambio catiónico.

Dentro de las principales propiedades de las arcillas se encuentra la capacidad de intercambio de iones en el medio acuoso, absorbiendo el agua o cediendo cuando lo contiene en su composición. La mayoría de las arcillas tienden a liberar álcalis como el potasio y el sodio y este fenómeno se presenta con las montmorilonitas y versiculitas. La capacidad de intercambio catiónico se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos varían en función del pH y de la actividad iónica, corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina. En la tabla 2.1 se muestran algunos minerales con diferentes capacidades de intercambio catiónico.

Tabla 2.1 Intercambio catiónico de algunos minerales.

Mineral	Intercambio en meg/100 g
Caolinita	3 a 5
Halloisita	10 a 40
Ilita	10 a 50
Clorita	10 a 50
Vermiculita	100 a 200
Montmorilonita	80 a 200
Sepiolita-paligorsk	20 a 35

2.2.2 Superficie específica.

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g . Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad. La tabla 2.2 muestra algunos ejemplos de diferentes minerales y sus respectivas superficies específicas.

Tabla 2.2 Superficie específica de algunos minerales.

Mineral	Superficie Específica
Caolinita de elevada cristalinidad	Hasta $15 m^2/g$
Caolinita de baja cristalinidad	Hasta $50 m^2/g$
Halloisita	Hasta $60 m^2/g$
Ilita	Hasta $50 m^2/g$
Montmorilonita	80 a $300 m^2/g$
Sepiolita	100 a $240 m^2/g$
Paligorskita	100 a $200 m^2/g$

2.2.3 Adsorción y Absorción.

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmeclitas) o en los canales estructurales -sepiolita y paligorskita-, (Grim, R.E., 1968).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso, (Grim, R.E., 1968).

2.2.4 Capacidad de expansión.

La hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio. El grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlamilar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlamilar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

En 1975 Chen publica una clasificación simplificada de las propiedades de expansión, de acuerdo a las propiedades índice, ver tabla 2.3.

Tabla 2.3 Guía de estimación de cambio de volumen en suelos expansivos (Chen, 1975).

Datos de campo y laboratorio			Expansión probable, % total del cambio de volumen	Presión de expansión, kg/cm ²	Grado de expansión
% Que pasa la malla No. 200	Límite líquido, %	Resistencia a la Penetración Estándar, golpes/m			
>35	>60	>98.4	>10	>9.8	Muy alto
60 - 95	40 - 60	65.6 - 98.4	3 a 10	2.45 - 9.8	Alto
30 - 60	30 - 40	32.8 - 65.6	1 a 5	1.47 - 2.45	Medio
<30	<30	<32.8	<1	0.49	Bajo

En función a los resultados que obtiene en campo y laboratorio, Chen propone zapatas aisladas para suelos cuyo grado de expansión sea medio. Para suelos da alto a muy alto grado de expansión se deben tomar algunas consideraciones especiales para seleccionar el tipo de cimentación (Chen, 1975).

La tabla 2.4 muestra como la HUD/FHA determina otra clasificación de suelos expansivos en relación a las propiedades índice (Meehan, 1994).

Tabla 2.4 Clasificación de suelos expansivos según la HUD/FHA.

Grupo de suelo	Índice plástico ¹	Límite líquido	Clasificación de la expansión	Contenido de arcilla	Índice de expansión ²	Porcentaje de expansión ³
A	0 a 6	0 a 25	No expansivo	<10	---	Ninguna
B	6 a 10	25 a 30	Marginal	<10	<50	2 a 4
C	10 a 25	30 a 50	Moderadamente expansivo	15 a 25	50 a 90	4 a 7
D	25 a 50	50+	Altamente expansivo	25 a 35	90 a 130	7 a 12
E ⁴	50+	70+	Piedras arcillosas expansivas	>35	>130	>12

¹ El índice plástico es una prueba estándar de la muestra de suelo y es uno de los métodos universales de pruebas confiables para suelos expansivos.

² Especificado por algunos códigos locales, especialmente en el sur de California.

³ Sobrecarga de 0.07056 kg/cm² (144 psf).

⁴ Valores típicos para arcillas altamente expansivas y también sirve como fuente de materiales para suelos aluviales y coluviales.

2.2.5 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al. 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

2.2.6 Tixotropía.

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido, si se las deja en reposo recuperan la cohesión así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico (Juárez y Rico, 1963).

2.3 Zonas en donde se presentan suelos expansivos.

Los suelos expansivos se presentan en regiones con depósitos de arcilla donde ocurren variaciones significativas de humedad: en zonas como las monzónicas, con estaciones muy diferentes, y en las zonas semidesérticas donde se presentan largas temporadas de estiaje con pocos periodos de precipitación. Las arcillas expansivas se encuentran principalmente en las zonas semiáridas de las regiones con clima templado y tropical.

A nivel mundial, en países como: Argentina, Brasil, Canadá, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Estados Unidos, México, Perú y Venezuela. En Sudáfrica, Angola, Australia, Argelia, Ghana, India, Irán, Irak, Israel, Kenia, Marruecos, Mozambique, Turquía, etc., tienen problemas de suelos expansivos.

En México, presentan formaciones de este suelo como los estados de Baja California Norte, Campeche, Chiapas, Guanajuato, Michoacán, Morelos, Querétaro, Sonora, Tamaulipas y Veracruz.

Según la clasificación del sistema FAO-UNESCO, se utilizan las características morfológicas, físicas y químicas para separar los suelos en unidades que proporcionen información referente a su aplicación práctica. De acuerdo a la Edafología, los vertisoles son el principal tipo de suelo expansivo. Por lo general, para estos tipos de suelos el contenido de arcilla es uniforme y mayor del 35% y en muchos casos supera el 80%, (Zepeda, 1989).

Los vertisoles son suelos de color oscuro que tienen textura uniforme, fina a muy fina y un contenido muy bajo de materia orgánica. Sus propiedades más importantes desde el punto de vista de la Mecánica de Suelos, es su característica expansiva a causa de la presencia dominante del mineral montmorilonita. Los cambios de volumen pueden ser de 25 a 50%.

2.4 Expansión, contracción y capilaridad.

En cualquier tipo de suelos, la expansión se presenta por un alivio de esfuerzos, por ejemplo en una excavación. El fenómeno capilar que se presenta en los suelos no saturados, es una causa de aumento de los esfuerzos efectivos. Cuando en un suelo como es el caso de las arcillas existe pérdida de humedad por evaporación, se presenta la tensión capilar que provocando la contracción del suelo. Una vez que el suelo ha disminuido su volumen por secado, podrá aumentar dicho volumen si se restituye el agua al suelo, lo cual reducirá el efecto de tensión capilar.

Un suelo en su estado saturado presenta una superficie brillante, que cambia a opaco al formarse por evaporación los meniscos cóncavos en cada poro. Conforme se evapora el agua disminuye el radio de curvatura de los meniscos y por tanto aumenta la presión capilar sobre las partículas sólidas, dando como resultado la compresión de estas. Este proceso seguirá presentándose durante la evaporación que sufra el suelo disminuyendo el radio de curvatura de los meniscos gradualmente y comprimiendo la estructura del suelo, hasta el punto en que la presión capilar sea incapaz de producir más deformaciones. En este punto inicia la retracción de los meniscos hacia el interior de la masa del suelo. Macrofísicamente se observa el cambio de tono del suelo de oscuro a claro (Juárez y Rico, 1963).

2.5 Capa activa de los suelos expansivos.

La capa activa es una característica que se presenta comúnmente donde predominan las arcillas y no es mas que la contracción de la capa vegetal por ausencia de agua. Hasta el día de hoy, no hay una profundidad gobernante o patrón de comportamiento respecto a esta profundidad ya que son varios los factores que influyen, como las condiciones climatológicas, el uso del suelo, la sobre explotación de mantos acuíferos y oscilación del nivel freático, las fugas en instalaciones hidráulicas y drenajes, las características de la arcilla o el mineral que predomine en su estructura química (López y Guerrero, 2002).

En la superficie se presenta el mayor cambio de humedad y conforme aumenta la profundidad disminuye la pérdida de agua en el suelo. En general no existe una regla universal aplicable para establecer la profundidad de la capa activa (Zepeda y Flores, 2002).

Con base a diversas experiencias se encontraron dos formas para estimar la zona activa:

1. En la determinación de los perfiles de succión versus profundidad, donde se encuentre un valor relativamente constante con la profundidad, la capa activa se identifica en la zona anterior al rango constante.
2. En perfiles de succión versus profundidad, en donde dicho perfil se determine de forma de S o Z con la profundidad, la capa activa se identifica antes del primer cambio importante de la succión del suelo.

2.6 Mineralogía.

Las arcillas son el producto de desintegración química de las rocas ígneas y metamórficas, estas están constituidas por silicatos de aluminio hidratados y en algunos casos silicatos de magnesio, hierro u otros metales. Estos minerales casi siempre están definidos por una estructura cristalina, en la cual los átomos se disponen en láminas (silícica y alumínica). La lámina silícica está formada por un átomo de silicio, rodeado de cuatro de oxígeno, esta estructura se encuentra en forma de tetraedro, en la figura 2.1 se muestra la estructura de una lámina sílica.

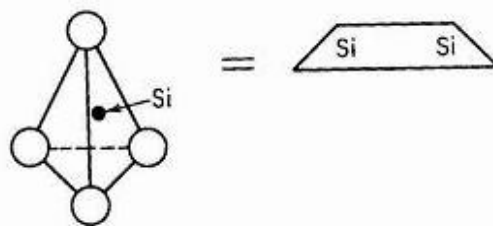


Figura 2.1 Lámina sílica.

Las alumínicas están formadas por retículas de octaedros ordenados con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor, en la figura 2.1 se muestra la estructura de una lámina alumínica.

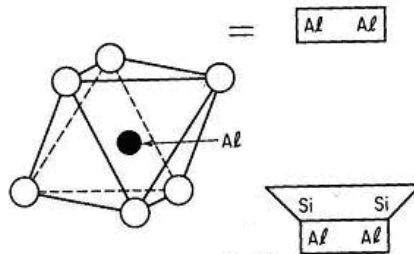


Figura 2.2 Lámina alumínica.

Los minerales de las arcillas se clasifican en cuanto a su estructura reticular como:

- Montmorilonitas.
- Caolinitas.
- Ialitas.

Las montmorilonitas están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas de mineral es débil y como consecuencia las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura. Debido a esto, se produce un incremento de volumen de los cristales, provocando macrofísicamente una expansión. (Juárez y Rico, 1963)

Las caolinitas tienen una estructura análoga a la montmorilonita, la diferencia entre esta es que tiende a formar grumos de materia, reduciendo el área expuesta al agua por unidad de volumen haciéndolas menos expansibles que las montmorilonitas. Las ilitas se comportan de forma más favorable en comparación con la montmorilonita e ilita.

2.7 Identificación de suelos expansivos.

Hoy en día existen varios métodos para identificar los minerales constituyentes de las arcillas, dentro de estas se encuentran las técnicas de caracterización mineralógica como son:

- Absorción atómica.
- Análisis térmico diferencial.
- Difracción de rayos x.
- Espectroscopia de fluorescencia.
- Microscopía electrónica de barrido.

Estos métodos son importantes para identificar los minerales del material en laboratorio, pero debido a los pocos equipos existentes y el alto costo de las pruebas resulta impráctico para los ingenieros de campo.

Los métodos indirectos, como lo son las propiedades índice y el método PVC (potencial de cambio volumétrico) y método de la actividad, son prácticos para evaluar las propiedades de expansión, (López, 1998).

2.7.1 Absorción Atómica.

Los instrumentos para determinar la espectrometría de absorción atómica consisten en una fuente de radiación, una zona de muestra, un selector de longitud de onda, un detector y un procesador de la señal y de la lectura de salida.

Los métodos analíticos basados en la absorción atómica son potencialmente muy específicos, ya que las líneas de absorción atómica son considerablemente estrechas (de 0.002 a 0.005 nm) y las energías de transición electrónica son únicas para cada elemento. La fuente más común para las medidas de absorbancia atómica es la lámpara de cátodo hueco.

En los métodos de absorción atómica se presentan dos tipos de interferencias:

Las interferencias espectrales.

Se producen cuando la absorción o emisión de una especie interferente se solapa o aparece muy próxima a la absorción o emisión del analito. Dado que las líneas de emisión de las fuentes de cátodo hueco son muy estrechas, es rara la interferencia debida a la superposición de las líneas. Para que exista esta interferencia, la separación entre las dos líneas tendría que ser menor de aproximadamente 0.1 \AA , (López, 1998).

Las interferencias espectrales también se producen debido a la presencia de productos de combustión, que poseen bandas de absorción anchas, o de productos en forma de partículas, que dispersan la radiación. Ambos disminuyen la potencia del haz transmitido y dan lugar a errores analíticos positivos. Otra interferencia se debe a la dispersión, que en algunos casos se presenta cuando la muestra contiene especies orgánicas o cuando se utilizan disolventes orgánicos para disolver la muestra.

Las interferencias químicas.

Se producen como consecuencias de diversos procesos químicos que ocurren durante la atomización y que alteran las características de absorción del analito. Las interferencias químicas son más comunes que las espectrales. Frecuentemente sus efectos pueden minimizarse escogiendo las condiciones de trabajo adecuadas. Los equilibrios de mayor interés son la formación de compuestos de baja volatilidad, las reacciones de disociación y las de ionización.

Una desventaja de los métodos espectroscópicos de llama es el requisito de que la muestra se ha de introducir en la fuente de excitación disuelta, por lo general en agua. Desafortunadamente, muchos materiales de interés, tales como suelos, tejidos animales, plantas, derivados del petróleo y minerales, no son directamente solubles en los disolventes habituales, y con frecuencia requieren un tratamiento previo laborioso.

La descomposición de materiales como los citados requiere por lo general tratamientos drásticos de la muestra a altas temperaturas con la consiguiente pérdida potencial de analito por volatización o en forma de aerosoles en el humo.

Aplicaciones.

Constituye un medio sensible para la determinación cuantitativa de más de 60 elementos metálicos o metaloides. Las líneas de resonancia de los elementos no metálicos se localizan por lo general por debajo de los 200nm, y solo es posible su determinación con espectrofotómetros que operan en vacío.

Exactitud.

El error relativo asociado con el análisis de absorción son llama es del orden de 1 al 12%. Cuando se toman precauciones especiales, esta cifra puede reducirse a unas pocas décimas. Por lo general, los errores que se obtienen con la atomización electromagnética son de 5 a 10 veces mayores que los de la atomización con llama.

2.7.2 Análisis Térmico Diferencial

El análisis térmico diferencial es una técnica en la que se mide la diferencia de temperatura entre una sustancia y un material de referencia en función de temperatura cuando la sustancia y el patrón se someten a un programa de temperatura controlado. Normalmente, el programa de temperatura implica el calentamiento de la muestra y del material de referencia de tal manera que la temperatura de la muestra T_s aumenta linealmente con el tiempo. La diferencia de temperatura ΔT entre la temperatura de la muestra y la temperatura de la sustancia de referencia T_r ($\Delta T = T_r - T_s$) se controla y se representa frente a la temperatura de la muestra para dar un termograma diferencial (López, 1998).

Aplicaciones.

El análisis térmico diferencial encuentra amplia utilización de la determinación del comportamiento térmico y de la composición de productos naturales y manufacturados

2.7.3 Difracción de rayos X.

Desde su descubrimiento en 1912 por von Laue, la difracción de rayos x ha proporcionado una gran cantidad importante de información a la ciencia y a la industria. Proporciona un medio adecuado y práctico para la identificación cualitativa de compuestos cristalinos.

Para los estudios analíticos de difracción, la muestra cristalina se muele hasta obtener un polvo fino homogéneo. De esta forma, los pequeños cristales están orientados en todas las direcciones posibles; y por lo tanto, cuando un haz de rayos X atraviesa el material, se puede esperar que un número significativo de partículas estén orientadas de tal manera que cumplan la condición de Bragg de la reflexión para todos los espacios interplanares posibles (López, 1998).

Difractómetros automáticos.

Los diagramas de difracción se obtienen, normalmente, con instrumentos automatizados. La fuente es un tubo de rayos X con filtros adecuados. Sin embargo, la muestra pulverizada reemplazada al monocristal en su soporte. En algunos casos, el soporte de la muestra puede girar con el objeto de aumentar la aleatoriedad en la orientación de los cristales. El diagrama de difracción se obtiene mediante un barrido automático, de la misma manera que se obtiene un espectro de emisión o de absorción. Los instrumentos de este tipo suelen ofrecer la ventaja de presentar una elevada precisión en las medidas de intensidad, reducción automatizada de los datos y generación del informe.

Registro fotográfico.

El método clásico de registro de los diagramas de difracción de polvo cristalino, que todavía se usan, en particular cuando la cantidad de muestra es pequeña, es fotográfico. El instrumento más común para esta finalidad es la cámara de polvo cristalino de Debye-Scherrer.

Interpretación.

Se basa en la posición de las líneas (en términos de θ o 2θ) y en sus intensidades relativas. El ángulo de difracción 2θ se determina por el espaciado entre un grupo particular de planos; con la ayuda de la ecuación de Bragg, esta distancia d se calcula a partir de una longitud de onda de la fuente conocida y del ángulo medido. Las intensidades de las líneas dependen del número y del tipo de centros atómicos de reflexión que existen en cada grupo de planos.

La identificación de los cristales es empírica. El Centro Internacional para Datos de Difracción, dispone de ficheros de difracción de polvo cristalino. En 1988, este fichero contenía diagramas de difracción de polvo cristalino de alrededor de 50,000 compuestos. Si la muestra contiene dos o más compuestos cristalinos, la identificación se hace más compleja. En este caso se utilizan varias combinaciones de las líneas más intensas hasta encontrar una coincidencia. También es posible hacer un análisis cuantitativo de mezclas cristalinas midiendo las intensidades de las líneas de difracción y comparándolas con patrones.

2.7.4 Espectroscopia de fluorescencia.

La fluorescencia se aplica en el medio ambiente, clínicas químicas, DNA y análisis genético por hidratación *in situ*, por mencionar algunas áreas de aplicación. Adicionalmente la fluorescencia se utiliza en la identificación de células, para determinar la

localización y movimiento de sustancias intercelulares por medio de la microscopia de fluorescencias.

Debido a la sensibilidad de la fluorescencia y a las dificultades de manejar sustancias radioactivas, hay un continuo desarrollo de pruebas basados en el fenómeno de la fluorescencia. Existe constante crecimiento sobre las aplicaciones de la fluorescencia probable, desarrollo de instrumentos y tecnología (López, 1998).

Fenómeno de fluorescencia.

La luminosidad es la emisión de luz de cualquier sustancia y ocurre de estados excitados electrónicamente. La luminosidad se divide en dos categorías: Fluorescencia y fosforescencia. Dependiendo de la naturaleza del estado excitado. El electrón es excitado en su órbita y se une otro electrón. Consecuentemente regresa a su estado inicial, este giro permite que ocurra una emisión de fotón. La emisión proporciona una fluorescencia típicamente de 10^8 s^{-1} , también un tiempo de vida cercano a 10ns ($10 \times 10^{-9} \text{ s}$).

La fosforescencia es la emisión de luz de triple estado de excitación, el cual el electrón en la órbita excitada tiene el mismo giro de orientación. La proporción emitida es lenta ($10^3 - 10^0 \text{ s}^{-1}$), el tiempo de vida de la fosforescencia es de milisegundos a segundos. Por lo general la fosforescencia en fluidos no es visible en cuartos de temperatura. Debe notarse que la distinción entre la fluorescencia y fosforescencia no siempre es clara. La fluorescencia ocurre de moléculas aromáticas.

La fluorescencia espectral generalmente se presenta como emisión espectral. Un espectro de emisión fluorescente es el trazo de la intensidad de fluorescencia contra longitud de onda (nanómetro) o número de ondas (cm^{-1}). Algunos compuestos del espectro muestran estructuras significantes debido al nivel de energía de vibración individual del nivel de estado y estado excitado. Otros componentes, como la quinina, muestran espectros los cuales son de estructura de vibración.

Un importante rasgo de la fluorescencia es su alta sensibilidad de detección. La sensibilidad de la fluorescencia se utilizó en 1877 para demostrar que los ríos Danube y Rhine se conectan por arroyos subterráneos.

Diagrama de Jablonski.

Los procesos que ocurren entre la absorción y emisión de luz son ilustrado por el diagrama de Jablonski. Estos diagramas a menudo son utilizados como punto de partida para discutir la absorción y emisión de la luz. Existe una variedad de formas para ilustrar los procesos moleculares los cuales pueden ocurrir en estado excitado. Estos diagramas fueron nombrados por el profesor Alexander Jablonski, quien es considerado como el padre de la espectroscopia de fluorescencia, debido a sus muchos logros, incluyendo sus descripciones de concentración depolarizada y su definición del término “anisotropía” que describe la emisión polarizada de soluciones.

2.7.5 Microscopía Electrónica de Barrido.

La aplicación de la microscopía electrónica de barrido es para estudiar la superficie de los sólidos a gran escala. De esta forma se obtiene la topología, la morfología y el tamaño de la partícula entre otras características importantes de la muestra. Con la irradiación de electrones sobre la muestra y la incidencia de estos sobre una pantalla fluorescente se obtiene una imagen de la superficie de la muestra. Las señales emitidas por los electrones secundarios y los electrones retrodispersados juegan un papel importante en la resolución de la imagen, ya que el primero permite la obtención de imágenes con alta resolución así como la apariencia tridimensional y el sombreado que da los relieves a las imágenes creadas.

Se pueden formar diferentes imágenes en el MEB, pero estas dependen de la información que se pretenda encontrar de la muestra, en otras palabras, el proceso de interacción entre los electrones y la muestra al que llegan estos determinan diferentes modos de análisis y por consecuencia diferentes instrumentos detectores. La forma de determinar un haz de electrones es prácticamente la misma para todos los microscópios y la diferencia entre estos estriba en el sistema de formación de imagen (López Lara, 2002).

III. MEJORAMIENTO DE SUELOS.

3.1 La cal.

3.1.1 Definición.

Es el producto de la manufacturación hecha por la calcinación de piedras calizas en hornos a una temperatura cerca de $1,315^{\circ}\text{C}$ ($2,400^{\circ}\text{F}$). El producto resultante se le llama cal viva (sin apagar, óxido de calcio, CaO), la cual es usada como material de mezcla. En la figura 3.1 se muestra el proceso de producción de la cal. Para la obtención de la cal hidratada (hidróxido de calcio, $\text{Ca}[\text{OH}]_2$) se somete a un proceso de hidratación el cual desintegra los terrones, guijarros y nódulos de la cal viva hasta obtener un polvo blanco fino, este proceso de hidratación es mediante la adición de agua controlada, suficiente para satisfacer la afinidad química. Los métodos de prueba para análisis químico de la caliza, cal viva y cal hidratada se basan en la norma ASTM C25-06 y las especificaciones de la cal hidratada para propósitos de construcción se basan en la norma ASTM C207-06.

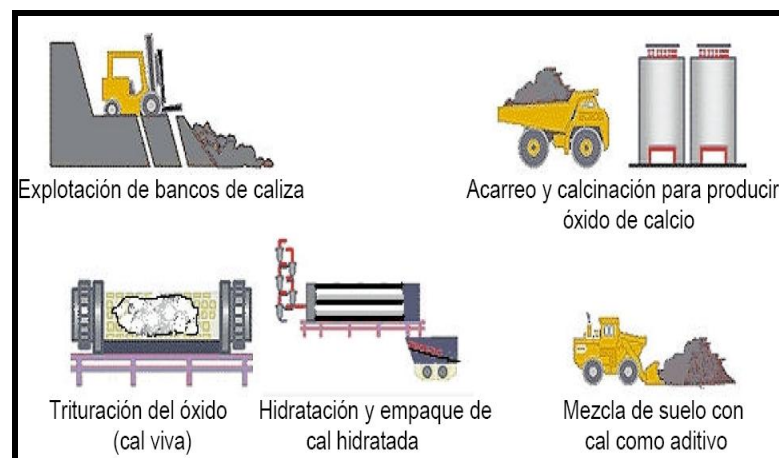


Figura 3.1. Proceso de producción de la cal.

3.1.2 La cal en la historia de la construcción.

El uso de cal como parte fundamental de las obras construidas por civilizaciones de la antigüedad, permite ver que la arquitectura e ingeniería han evolucionado a la par de acuerdo a las necesidades que se han ido presentando en el transcurso del tiempo. Los egipcios obtenían la cal de la calcinación de las calizas y de rocas fosilíferas, incluso

aprendieron que calcinando las calizas con fango del Nilo, que tiene un alto contenido de óxido de aluminio, podían obtener una cal de calidad superior, casi de tipo hidráulico. También usaban como aditivo arenas con minerales de arsénico que extraían de las minas de la península del Sinaí (Santoyo, 1998).

Los griegos aprendieron a usar la cal mezclada con arenas que reaccionaban químicamente, en la que se denomina efecto puzolánico, proporcionando la capacidad de cementar ladrillos y piedras. Las construcciones de Teotihuacan están recubiertas con delgadas capas de mortero de cal con arena de tezontle negro y rojo, estas han estado expuestas al ambiente por casi 2000 años. Los morteros fueron utilizados en el templo mayor. Los romanos adoptaron los morteros de cal y perfeccionaron la técnica utilizando primeramente arenas de Pozzuoli, que daba como resultado un mortero de alta resistencia que se ha identificado como concreto romano. Las pruebas de resistencia a la compresión simple a las que se han sometido dichos morteros han alcanzado valores de 100 a 400 kg/cm². Estos morteros lo aplicaron en sus construcciones de mamposterías, arcos, acueductos y caminos.

3.1.3 Estabilización suelo-cal.

La cal es una alternativa para el tratamiento o estabilización de suelos en diferentes proporciones o cantidades según sea el objetivo, es decir, en algunos casos una cantidad mínima logra secar el suelo para un acceso o tránsito temporal. Por otro lado, una mayor cantidad de cal –según resultados de laboratorio y necesidades del proyecto- produce la estabilidad estructural permanente del suelo. Sin duda alguna, la estabilización del suelo cambia las características naturales del mismo produciendo así una mayor resistencia y estabilidad a largo plazo de forma permanente. Cuando se realiza la mezcla suelo-cal y la adición de agua, el calor que genera esta reacción química contribuye al secado del suelo, consecuentemente acondiciona el suelo haciéndolo mas trabajable, ayuda a la compactación y mejora la capacidad de soporte (Garnica, 2002).

En la combinación o mezcla de suelo-cal, hablando de arcillas expansivas, ocurren dos fases de estabilización. La primera involucra reacciones prácticamente inmediatas de

intercambio catiónico y floculación-aglomeración. Como consecuencia a los cambios causados por estas reacciones se ha determinado que se incrementa la resistencia y la estabilidad de la humedad. La cal debe reunir los requisitos que indica la Norma ASTM C 977-02, que son las especificaciones estándar de la cal viva y cal hidratada para estabilización de suelo. Las partículas de la arcilla tienden a ajustarse y formar partículas mayores reaccionando de la siguiente manera:

- Disminuir el límite líquido.
- Incrementar el límite plástico.
- Disminuir el índice de plasticidad.
- Incrementar el límite de contracción.
- Incrementar la manejabilidad.
- Mejorar las propiedades de resistencia y deformación del suelo.

Las montmorilonitas con la cal forman aluminatos cristalizadas alterando las características geotécnicas del suelo. La caolinita es poco sensible a la cal y el mineral illita reacciona difícilmente con la esta.

3.2 Cemento.

3.2.1 Definición.

Aglutinante o conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica, capaz de fraguar y endurecer al contacto con el agua.

3.2.2 Historia del cemento en la construcción.

Al igual que la cal, las primeras civilizaciones utilizaban mezclas de puzolana para producir morteros aunque a decir de los Romanos no sabían por qué el mortero de puzolana era superior al de cal. En el año de 1824, Joseph Aspdin registró una patente para la manufactura del cemento llamándolo cemento “Portland” debido al parecido de las

pedras de la Isla Portland. Para 1850 se comenzó a fabricar en forma el cemento portland en Europa, siendo el primer uso extensivo en la construcción del sistema de alcantarillado de Londres, entre 1859 y 1867, aumentando la popularidad de este. En 1870 se inicia la fabricación del cemento Portland en Estados Unidos.

Bastó la primera aplicación del cemento en la construcción para que este iniciara su uso en muchas otras construcciones, como cimentaciones, lozas, muros, presas, edificios, puentes, túneles, obras hidráulicas, pavimentos entre muchos otros. El éxito de este, lo ha llevado a trascender en la historia del hombre, ha extenderse por todo sitio que se instale el ser humano.

3.2.3 Estabilización suelo-cemento.

La mezcla suelo-cemento es utilizado en su mayoría para mejorar las condiciones mecánicas del suelo. Por una parte actúa como conglomerante de gravas, arenas y limos desempeñando el mismo papel que en el concreto. Por otra parte el hidrato de calcio, que se forma al contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio que por su gran afinidad con el agua roban algunas de las moléculas de ésta, interpuestas entre cada dos laminillas de arcilla. El resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y de la plasticidad así como un aumento en la resistencia y en la durabilidad.

Al mejorar un material con cemento portland se piensa principalmente en aumentar su resistencia, pero además de esto, también se disminuye la plasticidad. Casi todos los tipos de suelo que encontramos pueden estabilizarse con cemento con excepción de los que contienen altos porcentajes de materia orgánica. Por otra parte, los suelos de arcilla o limo requerirán un mayor porcentaje de cemento para lograr los resultados esperados (Fernández, L.C. 1982).

Interesa también para la economía de la obra limitar el porcentaje de cemento necesario y prever el comportamiento de las arcillas. En este orden hay que tomar en cuenta las aptitudes intrínsecas del suelo para la estabilización como son la Granulometría, lo que implica que los suelos a mejorarse no deben contener piedras de

tamaño superior a 60mm (es decir, que el porcentaje que pasa por el tamiz #200 sea menor del 50%); y la Plasticidad, lo que determinará la calidad de las arcillas, estableciendo un Límite Líquido menor de 50% (<40%) y un Índice de Plasticidad menor de 25% (<18%).

El éxito de la estabilización con cemento depende de tres factores:

- Contenido apropiado de cemento
- Contenido apropiado de humedad
- Adecuada compactación

Por estos las mezclas deben ser sometidas a diversos ensayos como son el de compactación, durabilidad y compresión que aparte de su objeto específico servirán para dosificar el cemento que se empleará en la mezcla.

3.3 Estabilización con cloruro de calcio.

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en algunos procesos industriales siendo la más común el de la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

Algunos autores afirman que disminuye las fuerzas de repulsión entre las arcillas debido a que incrementa la tensión superficial y disminuye la pérdida de agua gravitacional por evaporación, por ende genera el incremento de la cohesión. Como en el intercambio catiónico se sustituye un ión Ca^{++} por 2 iones Na^+ , la doble capa se ve reducida en su espesor lo que hace que se reduzca el potencial eléctrico y en consecuencia se reduzcan las fuerzas de repulsión entre las partículas, (Garnica, 2002).

Debido a lo anterior el cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo, reduce la evaporación y es capaz de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose

mantener dicha humedad en sus dos terceras partes durante un día de calor seco, sin embargo sus limitantes son:

- Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.
- Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.
- Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

3.4 Estabilización con cloruro de sodio.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza.

Se ha logrado mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. Algunos investigadores mencionan que la adición de sal en una arcilla produce un decremento en la contracción volumétrica o lineal, cambios físicos, la formación de costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas, (Garnica, 2002).

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo, son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en plantas con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar.

- Escarificación.
- Disgregación.
- Adición de cloruro de sodio.
- Adición del agua.
- Mezclado con motoconformadora.
- Tendido y compactación.

Aparentemente no hay controversia en cuanto a la modificación en la adición de sal al suelo, pero si existe en lo referente a los mecanismos internos de estabilización. Al igual que el cloruro de calcio, el cloruro de sodio ayuda a reducir cambios de humedad del suelo. Cuando el suelo mezclado con cloruro de sodio se encuentra en la superficie y pierde agua por evaporación, el cloruro de calcio se cristaliza formando una barrera que impedirá posteriores evaporaciones. Si esta barrera se vuelve a saturar y sufre procesos de humedecimiento y secado después de lluvias constantes necesitará remociones constante o bien otro tipo de tratamiento.

3.4.1 Comportamiento de suelos estabilizados con cloruro de sodio.

El peso volumétrico seco y la resistencia a la compresión se incrementan al adicionar cloruro de sodio hasta en un 3%. El límite líquido y el índice plástico se reducen al adicionar cloruro de sodio (Ogawa et al,1963). La cohesión y el ángulo de fricción interna parecen disminuir al adicionar cloruro de sodio y en especímenes en los que no se permita la pérdida de humedad. Parece que si se permite el secado antes de ensayar los especímenes tanto la cohesión como el ángulo de fricción aumentan de manera importante (Ogura y Uto, 1963).

Las partículas de roca caliza parecen ser solubles a soluciones de cloruro de sodio (Wood,1969). La capacidad de retención de humedad aumenta en los suelos tratados con cloruro de sodio (Marks et al 1970). En su trabajo doctoral El-Sekelly, 1987, estudio tres mezclas de suelo. En todos ellos observó mejoras de los valores de resistencia a la compresión, a la tensión, de valor relativo de soporte e incluso en los valores de módulo de resiliencia. Cabe mencionar, sin embargo, que en varios casos agregó un 2% de cal además del cloruro de sodio.

3.5 Método de sustitución.

El método de sustitución es una de los más empleados en el ámbito de la construcción y consiste en retirar cierto espesor del suelo expansivo y sustituirlo por otro de características inertes. La profundidad de la excavación o volumen a sustituir está en

función de la capa activa, la magnitud permisible de la expansión y la estratigrafía del lugar. Este método en algunos casos es seguro pero para fines de costos de obra muchas veces no es lo más adecuado.

El proceso de construcción con este método por lo general se realiza en capas de 20 cm, agregando agua y compactando. El equipo de compactación depende de lo que se desea construir, ya que tiene mucho que ver la energía específica y el grado de compactación. Se debe tener mucho cuidado al compactar las primeras capas sobre la arcilla expansiva, utilizando un método de compactación adecuado, de tal forma que se produzca una estructura no floculada.

3.6 Inundación.

El prehumedecimiento del suelo es una técnica que consiste en saturar el material sin excederse del porcentaje requerido, es decir, aumentar el contenido de agua hasta el valor representativo de la condición de equilibrio, se ha llegado a utilizar con el propósito de minimizar el cambio volumétrico de suelo. Durante el proceso constructivo se debe evitar que el suelo tenga cambios de humedad considerables, ya que la eficacia de este método no se logra si el suelo está sujeto a la pérdida de agua. Es recomendable monitorear el grado de saturación para prevenir asentamientos y por consiguiente una disminución del esfuerzo cortante (Malagón, 1986).

3.7 Aislamiento.

Como su nombre lo dice consiste en aislar el terreno de pérdidas o aumentos de humedad por medio de banquetas, pavimentos, drenaje y barreras. La utilización de membranas es otra opción, sin embargo se ha observado que su aplicación solo evita la expansión en el centro de su área pero en la periferia de esta no. Otra solución es la pavimentación y el uso de cunetas o alcantarillas, aunque en algunos casos puede ser demasiado costoso (Trejo, 1986).

IV. METODOLOGÍA

4.1 Exploración y muestreo.

4.1.1 Ubicación de la zona de estudio.

La zona de estudio de los suelos expansivos se localiza en el fraccionamiento de Tejada, en el municipio de Corregidora, Querétaro, México. Con latitud de 20° 32' 59.47" N y longitud 100° 25' 24.25" O, (Figura 4.1) El “tepetate” ensayado es una arena limosa (SM) que comúnmente se utiliza como material regional de sustitución de suelos expansivos. Dicho material se obtuvo del banco denominado “Conin” Querétaro, Qro. México.



Figura 4.1 Croquis de localización.

4.1.2 Pozos a cielo abierto.

Un pozo a cielo abierto es una excavación “superficial” en el cual generalmente se realiza a pico y pala o con medios mecánicos (NMX-C-430-ONNCCE-2002). Para el propósito de la investigación se realizó en dos etapas: la primera exploración fue

excavando con medio mecánico tres pozos a cielo abierto con las profundidades mostradas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Profundidad de los sondeos, primera etapa.

Pozo	Profundidad (m).
1	3.75
2	3.7
3	3

En la segunda etapa de exploración se realizaron tres pozos a cielo abierto con medio mecánico y con las siguientes profundidades mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Profundidad de los sondeos, segunda etapa

Pozo	Profundidad (m).
1	2.95
2	3.1
3	3

Equipo:

- Pico y pala.
- Cucharón.
- Bolsas y etiquetas.
- Flexómetro.
- Barras y cuchillos.
- Brea y parafina.
- Marcador de tinta.

4.1.3 Toma de muestra alterada e inalterada.

a) Muestra inalterada de suelo.

La muestra representativa e integral de suelo se obtuvo de las paredes del corte y del fondo del pozo a cielo abierto. Se excavó una bóveda alrededor de la muestra con el objetivo de facilitar el labrado de las caras del cubo. Las dimensiones fueron de 30 cm por

lado aproximadamente. Una vez labrada la muestra se cubrió de sus caras y se realizó cortes horizontales en la parte inferior de la muestra para su extracción. Retirada la muestra del sitio se identificó con el número de PCA y profundidad, así como la ubicación del cielo abierto indicado con una flecha.

b) Muestra alterada de suelo.

Las muestras alteradas de suelo se tomaron con el fin de reproducir el perfil estratigráfico del lugar. Las muestras fueron tomadas según el estrato y se almacenaban en bolsas de plástico para evitar en lo posible la pérdida de humedad. Con etiquetas se identificó cada muestra que contenía el número de PCA, profundidad y color (NMX-C-431-ONNCCE-2002). La primer etapa se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.2. Zona de estudio, primera etapa.

En la figura 4.3 se muestra la capa activa de la zona.



Figura 4.3. Capa activa.

La toma de muestra inalterada de suelo se tomó de las paredes del pozo como se muestra en la figura 4.4.



Figura 4.4. Pozo a cielo abierto.

La segunda etapa de exploración se muestra en la figura 4.5



Figura 4.5. Zona de exploración, segunda etapa.

La exploración se realizó por medios mecánicos como se muestra en la figura 4.6.



Figura 4.6. Exploración y muestreo.

En la figura 4.7 se muestra claramente el momento de muestreo, labrando la muestra cúbica.



Figura 4.7. Muestra inalterada, pozo a cielo abierto.

4.2 Límites de Atterberg.

A. Atterberg marcó las fronteras de los cuatro estados en que pueden presentarse los materiales muy finos; para ello estableció los límites siguientes: líquido, plástico y de contracción. El primero es la frontera entre el estado líquido y el plástico; el segundo entre el plástico y el semisólido del sólido. A estos límites se les llama de consistencia.

4.2.1 Limite líquido.

El límite líquido (LL) es el contenido de agua (expresado como porcentaje del peso seco) que debe tener un suelo remoldeado para que una muestra en que se haya practicado una ranura de dimensiones normalizadas se cierre, sin resbalar en su apoyo, al someterla a un impacto de 25 golpes bien definidos.

4.2.2 Limite plástico.

El límite plástico (LP) es el contenido de agua con el que se rompe en fragmentos de tamaño definido un rollo de 3.2mm de diámetro formado con el suelo al rodarlo, con la palma de la mano, sobre una superficie plana.

4.2.3 Limite de contracción.

El límite de contracción (LC) es el contenido de agua que saturaría a un suelo contraído por secado. La diferencia entre el límite líquido y el plástico se llama índice de plasticidad, y mide el intervalo de contenido de agua en el cual el suelo es plástico. El índice de contracción se define como la diferencia entre límite plástico y de contracción (Manual SAHOP, 1981).

4.2.4 Estados de consistencia.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

1. Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
2. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
3. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
4. Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
5. Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios escritos para distinguir sus fronteras.

4.2.5 Determinación del límite líquido.

Equipo:

- Dispositivo para determinar el límite líquido (copa de Casagrande).
- Ranurador plano triangular.
- Malla No. 40 (0.420 mm).
- Espátula.
- Cápsula.
- Piseta.
- Mortero con pistilo.
- Balanza con aproximación de 0.01g y capacidad mínima de 100g.
- Horno a temperatura constante de 110°C

4.2.6 Características de la Copa de Casagrande.

- Es un recipiente de bronce o de latón con un tacón del mismo material.
- La altura de caída es por especificación de 1 cm, medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer hasta la base misma.
- La copa es esférica con radio interior de 54 mm, espesor de 2mm y peso de 200 ± 20 g incluyendo el tacón.
- Dimensiones del ranurador: Punta (2 ± 0.1 mm) y ancho de la parte superior de la ranura (11 ± 0.2 mm), ASTM D 4318.

4.2.7 Preparación de la muestra.

Es preferible que para preparar la muestra, el suelo se encuentre con su contenido de agua natural ya que su secado puede alterar sensiblemente los valores de los límites. Durante la preparación del material y su ensaye se evitó en lo posible que el contenido de agua del suelo bajara más allá del límite plástico o de su contenido natural. Solo se empleó la fracción de suelo que pasa por la malla No. 40 (ASTM D 4318). Para el caso de suelo-cal y suelo-cemento, se determinó el límite líquido a diferentes porcentajes como

fueron 2, 4 y 6% respecto a su peso al peso seco del suelo. Las pruebas se realizaron a 7, 14 y 28 días y de igual forma se determinó después de realizar las permeabilidades a las mismas edades. La figura 4.8 muestra como se realiza la prueba del límite líquido.

4.2.8 Preparación del material.

1. Del material que pasa la malla No.4, se desmenuzan 150g en un mortero, cuidando de no romper los granos.
2. Se pasa el material a través de la malla No.40.
3. Se pone en una cápsula el material que ha pasado por dicha malla.
4. Se agrega agua y con una espátula de cuchillo, se mezcla perfectamente hasta obtener una pasta suave y espesa, con una consistencia correspondiente, aproximadamente a 10 golpes en la prueba del límite líquido.
5. Se guarda la muestra humedecida en un frasco de vidrio hermético durante 24 h por lo menos, para que la humedad se distribuya uniformemente en el suelo.
6. Se repiten los pasos anteriores reduciendo la cantidad de agua agregada, para obtener una segunda muestra con contenido de agua ligeramente superior al límite plástico.

4.2.9 Procedimiento de prueba.

1. Se mezcla la muestra en una cápsula de porcelana hasta hacerla homogénea.
2. Con una espátula, se colocan en la copa entre 50g y 75g de la muestra y se enrasa la superficie. La cantidad de material debe ser suficiente para que pueda labrarse la ranura completa en una longitud de 4 cm aproximadamente.
3. Se hace una ranura en el centro de la muestra, inclinado el ranurador de manera que permanezca perpendicular a la superficie interior de la copa. La figura 4.8 muestra como se realiza la prueba del límite líquido.
4. Se da vuelta uniformemente a la manija a razón de dos golpes por segundo hasta que la ranura se cierre en una longitud de 1.3 cm.
5. Con la espátula, se vuelve a mezclar y se repiten las operaciones indicadas en los puntos 2, 3 y 4.

6. En un vidrio de reloj, se ponen 10g, aproximadamente de la porción de la muestra que está próxima a la ranura.
7. Se pesan los vidrios de reloj con aproximación de 0.001g. anotando el valor en la columna con encabezado Tara + Muestra Húmeda.
8. Se repiten los pasos 1 a 8. con material más seco hasta obtener cuatro determinaciones comprendidas entre 10 y 35 golpes.
9. Los vidrios de reloj con las muestras se introducen en el horno durante 18 hrs. Al sacarlos, se dejan enfriar en un desecador y se pesan. Tara + Muestra Seca.
10. Se determinan los contenidos de agua correspondientes a los distintos números de golpes y se traza la curva que mejor se ajuste en el rayado semilogarítmico. De esta manera se obtiene la curva de fluidez.
11. La ordenada de la curva, corresponde a una abscisa de 25 golpes, es el límite líquido, (ASTM D 4318).



Figura 4.8. Determinación del límite líquido.

4.2.10 Determinación del límite plástico.

Equipo:

- Placa de vidrio.
- Alambre de 3.2 mm (1/8 pulg)
- Cápsula.

4.2.11 Preparación del material.

El procedimiento para preparar el material es el mismo del límite líquido (ASTM D 4318).

4.2.12 Procedimiento de prueba.

1. Se toma un centímetro cúbico de la muestra, aproximadamente.
2. Se rueda la pequeña muestra sobre una placa de vidrio ligeramente bajo la palma de la mano, hasta formar un cilindro de 3.2 mm de diámetro y de 13cm de largo, el diámetro se comprueba con el alambre de 3.2 mm como se muestra en la figura 4.9.
3. Se pliega el cilindro del suelo, se amasa para que tome una forma elipsoidal y se vuelve a rodar. Se repite la operación tantas veces sea necesario para que al perder agua por evaporación y llegar al diámetro se agriete y se rompa en segmentos de 1cm de largo o en tres partes.
4. Se pesa en la balanza y se registra este valor en la columna Tara + Muestra Húmeda.
5. Se repiten los pasos 1 a 4 con otra porción de la muestra.
6. Las muestras se introducen en el horno durante 18 h, después se dejan enfriar y se pesan anotando los valores en la columna Tara + Muestra Seca.
7. Con los datos anteriores se calculan los contenidos de agua. Si la diferencia de los resultados no es mayor de 2%, se considera que el Límite Plástico es igual al promedio redondeado, (ASTM D 4318)

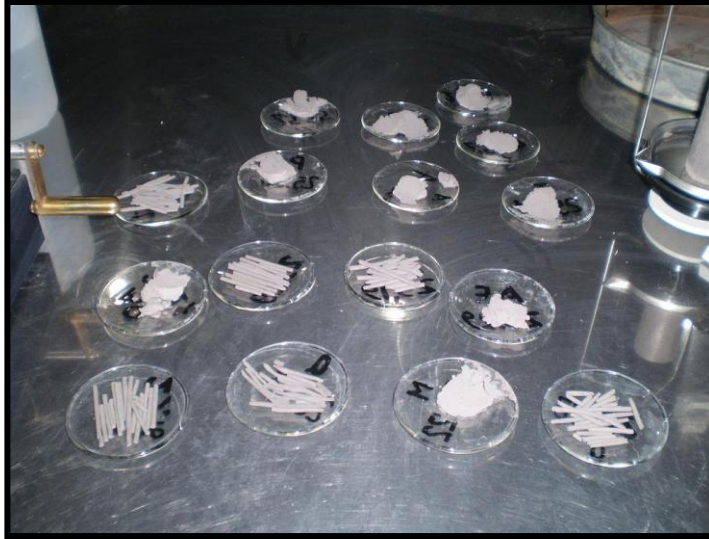


Figura 4.9. Determinación de la humedad en el límite líquido y plástico.

4.3 Prueba proctor estándar.

R. R. Proctor fue el primero en desarrollar el método para reproducir en laboratorio las condiciones de compactación en campo, dicho método es conocido hoy en día como Prueba Proctor Estándar.

Esta prueba consiste en compactar el suelo en un molde rígido metálico con dimensiones y forma especificadas. El número de capas son de tres sucesivamente con veinticinco golpes uniformemente distribuidos en cada capa. El pisón deberá corresponder al peso, dimensiones y caída libre dados (ASTM D-698).

Equipo:

- Molde de 10.2 cm de diámetro y 12.3 cm de altura, con extensión de 5cm de altura.
- Martillo de compactación manual.
- Base de 325Kg de peso (recomendable para lograr consistencia en los resultados).
- Balanza con precisión mínima de 5Kg.
- Malla N°4
- Regla metálica para enrasar.

- Cucharón.
- Horno de secado (110 ± 5 °C).
- Espátula, Charola, Atomizador, Probeta Graduada, Bolsas

4.3.1 Preparación de la muestra.

1. Se criba el material por la malla No.4 y se utiliza el que pasa por dicha malla como se muestra en la figura 4.10.
2. Se seca el material lo suficiente para determinar cada uno de los puntos de la curva de compactación.
3. Para el caso de tepetate-cal, tepetate-cemento, arcilla-cal, arcilla-cemento, se determina el peso de cada aditivo respecto al peso seco del suelo a 2, 4 y 6% en cada caso.
4. Se mezcla cada fracción de suelo (peso aproximado, 2Kg) y se agrega el 2.5 de agua correspondiente al peso inicial para cada punto.
5. Se almacena cada una de las muestras para permitir que el contenido de agua sea uniforme y evitar pérdida de humedad.

4.3.2 Procedimiento de prueba.

1. Se pesa el molde con su placa de base.
2. Se acomoda el collarín de extensión sobre el molde.
3. Se coloca una tercera parte del suelo.
4. Se compacta esta capa con 25 golpes del martillo de 2.5Kg de peso, con altura de caída libre de 30cm. Los golpes deberán distribuirse uniformemente sobre la superficie de la capa.
5. Se repiten los pasos 3 y 4 con la segunda y tercera capa.
6. Se quita con cuidado el collarín de extensión y se enrasa el suelo con la regla metálica.
7. Se pesa el molde (incluyendo la placa base) y el suelo, después de limpiar el cilindro exteriormente. Se registra Peso del molde + Material.

8. Se extrae el material del molde y se hacen dos determinaciones de contenido de agua tomada de la parte superior e inferior del molde con un peso de 100gr.
9. Se repiten los pasos 2 al 8 para las cuatro fracciones de suelo restantes.
10. Se dibuja la gráfica de peso volumétrico contra contenido de agua de compactación.

4.3.3 Determinación del contenido de agua o humedad del suelo.

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{W_m - W_s}{W_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Donde:

w = Contenido de agua o humedad en %.

W_w = Peso del agua.

W_s = Peso de los sólidos.

W_m = Peso de la masa.

4.3.4 Determinación del peso específico de la masa del suelo.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad (4.2)$$

Donde:

γ_m = Peso específico.

W_m = Peso de la masa.

V_m = Volumen de la masa.

4.3.5 Determinación del peso específico seco.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + w} \quad (4.3)$$

Donde:

γ_d = Peso específico seco.

γ_m = Peso específico.

w = Contenido de agua o humedad en %.



Figura 4.10. Cribado del tepetate por la malla No. 4.

El quipo para determinar el peso específico seco máximo mediante la prueba proctor se presenta en la figura 4.11.



Figura 4.11. Equipo proctor estándar.

La compactación se realiza de forma en espiral, de los extremos hacia el centro. En la figura 4.12 se muestra el procedimiento de la prueba.



Figura 4.12. Determinación de los puntos en la curva de compactación.

4.4 Permeabilidad

Uno de los temas de interés en la mecánica de suelos es el estudio de agua a través de medios porosos como lo es el suelo, este fenómeno está gobernado por una ley descubierta por Henri Darcy en 1856. La investigación de Darcy consiste en las características del flujo a través de filtros utilizando materiales térreos.

4.4.1 Coeficiente de permeabilidad

Es la velocidad del agua a través del suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. En k se reflejan las propiedades físicas del suelo y en cierta medida ese valor indica la mayor o menor facilidad con que el agua fluye a través del suelo, estando sujeto a un gradiente hidráulico dado, (Juárez y Rico, 1963).

De la ecuación de continuidad, el gasto se expresa por:

$$Q = vA \quad (4.4)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal del conducto.

v = Velocidad del flujo.

Se deduce:

$$v = ki \quad (4.5)$$

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (4.6)$$

Entonces:

$$Q = \frac{dV}{dt} = kAi \quad (4.7)$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad.

i = Es el gradiente hidráulico del flujo, medido con:

$h_1 - h_2$ = Es la pérdida de energía del flujo.

L = Es la longitud de la muestra.

4.4.2 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo.

Existen varios procedimientos para determinar la permeabilidad del suelo como son los directos e indirectos. El primer método son pruebas que miden directamente el coeficiente de permeabilidad, el segundo es de forma secundaria pues miden principalmente otros fines. Estos métodos se dividen de la siguiente manera:

a) Directos:

1. Permeámetro de carga constante.
2. Permeámetro de carga variable.
3. Prueba directa de los suelos en el lugar.

b) Indirectos:

1. Cálculo a partir de la curva granulométrica.
2. Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
3. Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

Para fines de la investigación se determinó el parámetro de permeabilidad para diferentes condiciones, es decir, en arcillas en estado natural, en arcilla-cal y arcilla

cemento, con un contenido de 2, 4 y 6% a 7, 14 y 28 días, de igual forma en tepetate-cal y cemento. El método utilizado es el permeámetro de carga variable.

La diferencia del permeámetro de carga constante con este tipo de permeámetro mencionado anteriormente consiste en medir la cantidad de agua que atraviesa la muestra de suelo en su longitud L . Se llena el tubo vertical del permeámetro con agua y el agua desciende conforme atraviesa el flujo la muestra.

Equipo:

- Permeámetro de carga variable.
- Balanza con aproximación de 0.001gr y capacidad de 300 gr.
- Espátula de abanico.
- Charola rectangular.
- Probeta graduada de 500ml y 1000ml.
- Pisseta.
- Cronómetro.

4.4.3 Preparación de la muestra.

1. De los materiales utilizados en esta investigación, como son arcilla y tepetate, se determina mediante un testigo de humedad el peso de los sólidos y se procede a dosificar el contenido de cemento o cal según sea el caso.
2. Se determina el volumen del anillo y de acuerdo a los resultados obtenidos en las curvas de compactación se representa el γ_m y la humedad óptima de cada material.

4.4.4 Procedimiento de prueba.

1. Se saturan las piedras porosas.
2. Se mide la altura de la muestra y el área transversal de esta y de la bureta.
3. Se llena la bureta y se deja saturar durante 24h.

4. Una vez saturada la muestra el flujo se estabiliza y se procede a iniciar lecturas.
5. Se vierte agua a la bureta con la piseta y se abre la válvula.
6. Se inicia inmediatamente el tiempo en el cronómetro.
7. Se determina la altura final y se procede a calcular.

Fórmula:

$$k = 2.3 \frac{La}{At} \text{Log} \frac{h_1}{h_2} \quad (4.8)$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad.

L = Longitud de trayectoria del agua en la muestra.

a = Área transversal de la bureta.

A = Área transversal de la muestra.

t = Tiempo transcurrido de h_1 a h_2 .

h_1 = Carga hidráulica inicial.

h_2 = Carga hidráulica final.

El procedimiento de prueba para determinar la permeabilidad del suelo se muestra en la figura 4.13.



Figura 4.13. Determinación de la permeabilidad (carga variable).

4.5 Determinación del pH.

Equipo:

- Potenciómetro.
- Balanza con 0.01g de sensibilidad.
- Vaso de precipitado de 250 ml.
- Pipeta.
- Varilla de vidrio.
- Pizeta.
- Cronómetro.

4.5.1 Preparación de la muestra.

Se calibró el potenciómetro con la solución buffer de pH 4 y 7 colocando en un vaso de precipitado por separado 10 ml de solución y 10 de agua destilada como se muestra en la figura 4.14. Estas soluciones deben estar al momento de la prueba a temperatura ambiente.



Figura 4.14. Calibración del potenciómetro.

Se dejaron reposar las soluciones por un lapso de una hora y posteriormente se introdujo el potenciómetro para ajustar la lectura hasta que coincidiera con el patrón de calibración correspondiente.

Una vez calibrado el equipo se puede determinar el pH del suelo.

Previo a la prueba se secó el suelo y posteriormente se cribó por la malla No. 10. Es conveniente mencionar que antes de cada calibración y prueba en suelo se deberá de limpiar el diodo del potenciómetro con agua destilada.

4.5.2 Procedimiento de prueba.

Se limpia perfectamente el vaso de precipitado a utilizar y se colocan 10 ml de agua destilada y 10 g de suelo.

Con una varilla de vidrio se agita manualmente la mezcla en intervalos de 5 minutos durante 30 minutos, después de este último se deja reposar 15 minutos.

Antes de introducir el potenciómetro se agita la suspensión. Se registra la lectura de pH (ASTM D 4972-95a). En la figura 4.15 se muestra el procedimiento de prueba.



Figura 4.15. Determinación del pH.

La determinación del pH se realizó sólo a las arcillas, estas a su vez en diferentes proporciones de cal y cemento al 2, 4 y 6% respectivamente a 7, 14 y 28 días, antes de someterse el suelo a permeabilidad y después de esta.

4.6 Densidad de sólidos.

Se define como densidad de sólidos a la relación entre el peso específico de la materia que constituye las partículas del suelo y el peso específico del agua destilada a 4°C.

La densidad de sólidos se obtiene en la práctica como la relación entre el peso de los sólidos y el volumen de agua que desalojan a la temperatura ambiente. A este valor obtenido se le hace una corrección por temperatura.

Equipo:

- Dos matraces aforados de 500ml.
- Bomba de vacío.
- Termómetro de 110 °C.
- Balanza con precisión de 0.01g.
- Horno de temperatura constante.
- Flanera.
- Estufa.
- Pipeta.
- Embudo.
- 1 vaso de aluminio.

4.6.1 Preparación de la muestra.

Se toma una muestra de suelo que se desea analizar de acuerdo a la tabla 4.3 y se inicia el secado de esta en el horno de temperatura constante durante 12 a 16 horas (ASTM D 2216-92, 1992).

Tabla 4.3 Selección de masa mínima de acuerdo al tamaño de partícula.

Tamaño máximo de la partícula (pasa 100%)	Numero de malla	Masa mínima del especimen de prueba
2.00 mm	No. 10	20 g
4.75 mm	No. 4	100 g

Después del proceso de secado se toman 50 g de material y se satura durante 24 h con un espesor de agua libre de 1 cm (ASTM D 854-92, 1992).

Respecto a las mezclas de tepetate-cal, tepetate-cemento, arcilla-cal y arcilla-cemento, se adiciona al material sus diferentes porcentajes que hemos estado manejando, como son 2, 4 y 6%.

4.6.2 Calibración del matraz.

1. Se limpian ambos matraces y se llenan hasta $\frac{3}{4}$ de la altura del bulbo, posteriormente se ponen a hervir hasta una temperatura de 80°C dentro de un recipiente.
2. Se hace la extracción de aire mediante la bomba de vacío en ambos matraces durante 12 minutos para cada matraz.
3. Se identifica el matraz a calibrar y se vierte con agua del otro matraz un centímetro por debajo del nivel de aforo.
4. Durante 5 minutos se extrae nuevamente el aire y se deja enfriar ambos matraces hasta que tengan una temperatura de 60°C +/- 10°.
5. Se mide la temperatura en el centro del bulbo y a $\frac{2}{3}$ por debajo del cuello del matraz, si la diferencia de temperaturas es menor a 0.5°C se anota el valor.
6. Se pesa el matraz a la temperatura registrada y se verifica el nivel de aforo.
7. Se continúa haciendo los pasos 5 y 6 en cada decremento de 5°C hasta que la temperatura sea la del medio ambiente.

4.6.3 Determinación del peso específico relativo de los sólidos (S_s).

1. En el matraz calibrado se vierte el material preparado.
2. Se agrega agua hasta $\frac{3}{4}$ de la altura del bulbo. Se calienta ambos matraces en un recipiente.
3. Con la bomba de vacío se extrae el aire en ambos matraces durante 15 minutos (ASTM D 854-92, 1992) como se muestra en la figura 4.16.
4. Se agrega agua en el matraz calibrado un centímetro abajo del nivel de aforo y durante 5 minutos se hace vacío con la bomba. Se agita para homogenizar la temperatura cuidando evitar que el agua llegue más arriba del nivel de aforo.
5. Se afora el matraz calibrado con el agua del otro matraz y se mide la temperatura a la mitad del bulbo y a $\frac{2}{3}$ por debajo del cuello del matraz, si la diferencia de temperaturas es menor a 0.5°C se anota el valor.
6. Se pesa el matraz con agua y suelo a la temperatura registrada y se verifica el nivel de aforo.

Se le determinó la densidad de sólidos a las diferentes mezclas y a diferentes edades, como son 7, 14 y 28 días, esto debido a que se ensayaron probetas a estas edades.

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fws}} \quad (4.9)$$

Donde:

W_s = Peso de los sólidos (g).

W_{fw} = Peso del matraz mas agua (g).

W_{fws} = Peso del matraz mas agua y suelo (g).



Figura 4.16. Extracción de aire mediante la bomba de vacío.

4.7 Ensayo de compresión simple.

Tiene como finalidad, determinar la resistencia a la compresión simple (q_u) de una muestra de suelo cilíndrica ya sea inalterada o remoldeada, e indirectamente la resistencia al corte.

Este ensayo es ampliamente utilizado, ya que constituye un método rápido y económico. Consiste en un ensayo uniaxial, en donde la probeta no tiene un soporte lateral ($\sigma_3=0$) realizándolo en condiciones no drenadas.

Equipo:

1. Cámara triaxial.
2. Extensómetro con soporte.
3. Cápsulas.
4. Balanza con precisión de 0.01g.
5. Horno de temperatura constante $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
6. Torno.

7. Molde para remoldeado.
8. Aceite.
9. Probetas.
10. Espátula de abanico.
11. Charola rectangular.

4.7.1 Preparación de las muestras.

Se obtienen especímenes cilíndricos de diámetro de 36 mm \pm 2 mm por una altura de 90 mm \pm 2 mm como se muestra en la figura 4.17.

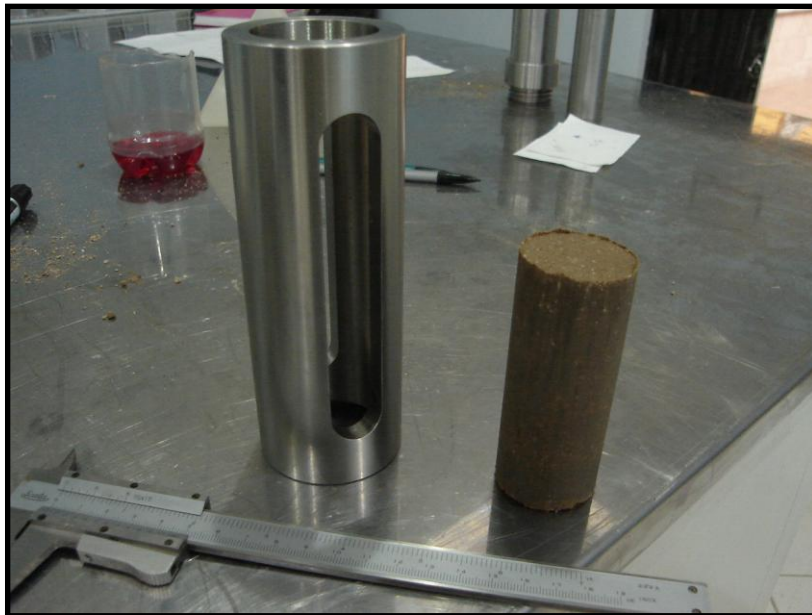


Foto 4.17. Dimensiones de las probetas.

a) Muestras Inalteradas.

Se labran las muestras con las dimensiones mencionadas anteriormente cuidando que la posición a cielo abierto se mantenga en la probeta como se muestra en la figura 4.18. Esto se logra utilizando el torno y el cortador de alambre o con cuchillas.



Figura 4.18. Muestra inalterada.

Se identifican y se guardan las probetas y se protegen para evitar que gane o pierda humedad hasta que sea sometida a ensaye.

b) Muestras Remoldeadas.

Se toma de 2 a 3 kg del material, ya sea el tepetate o la arcilla, se desmorona y se criba por la malla No. 4 y se coloca en la charola.

Para el caso de adición de cal o cemento, se determina el peso de estos según la masa inicial para los diferentes porcentajes utilizados. Se homogeniza bien el suelo con el aditivo. Se humedece el material y se mezcla bien con una espátula para uniformizar la humedad.

Los requisitos que deben satisfacer la manufactura de las probetas remoldeadas son: Peso volumétrico seco máximo y contenido de agua óptimo, determinados previamente y que la compactación sea igual o uniforme en capas de 3 a 5. En la figura 4.19 muestra la realización de las probetas.



Figura. 4.19. Aplicación de la carga estática.

Obtenidas las probetas se identificaron y se guardaron para evitar que gane o pierda humedad hasta que sean sometidas a sus fechas de ensaye.

4.7.2 Procedimiento de prueba.

1. Se ensayó a 7, 14 y 28 días para cada mezcla del tepetate y la arcilla
2. Una vez obtenida la probeta ya sea inalterada o remoldeada, se determina los diámetros superior, medio e inferior promedios así como su altura. Estas se determinarán con el calibrador cuyo vernier aproxime a 0.1 mm.
3. Se determina el peso de la probeta.
4. Se coloca en el pedestal en la base inferior de la cámara triaxial en posición vertical. Se verifica que la probeta esté bien centrada.
5. Se procede a realizar la prueba tomando lecturas simultáneas en el extensómetro del anillo de carga y el de deformación con la velocidad de 1mm/min para definir la curva esfuerzo-deformación.
6. La prueba debe detenerse cuando la lectura de carga comience a decrecer, esto es, después de haber llegado a su máximo o cuando la deformación corresponde al

20% respecto a la altura inicial (NMX-C-432-ONNCCE-2002). En la figura 4.20 se muestra el procedimiento de ensaye.



Figura 4.20. Ensaye a compresión simple.

Fórmulas:

Área de la probeta:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (4.10)$$

Donde:

D=Diámetro promedio de la probeta (cm).

$\pi=3.1416$

Volumen de la probeta:

$$V = A * L_0 \quad (4.11)$$

Donde:

A =Área de la probeta (cm^2)

L_0 =Altura promedio inicial (cm).

Deformación unitaria:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.12)$$

Donde:

ΔL =Variación de altura de la probeta (cm).

Área corregida:

$$A_c = \frac{A}{1 - \varepsilon} \quad (4.13)$$

Donde:

A =Área (cm^2).

ε =Deformación unitaria.

Esfuerzo:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} \quad (4.14)$$

Donde:

P =Lectura de carga (kg).

A_c =Área corregida (cm^2).

Resistencia al corte o cohesión:

$$c = \frac{q_u}{2} \quad (4.15)$$

q_u = Esfuerzo máximo (kg/cm²).

Se grafica la curva deformación unitaria ($\epsilon \times 10^{-2}$) contra esfuerzo para cada aplicación de carga (Bowles J., 1982).

4.8 Expansión.

La mayor parte de los suelos en la superficie de la tierra están en condiciones no saturadas, debido a esto se presentan los problemas de consolidación o expansión según los factores que influyan (Zeevaert, 1983). Debido a este fenómeno se requiere realizar evaluaciones encontrando parámetros como son: Presión de expansión, porcentaje de expansión, índice de colapso, potencial de colapso entre otros (ASTM D4546-96, 1996 y ASTM D 5333-92, 1996).

Equipo:

- Consolidómetro.
- Anillo con extensión.
- Cuchillos o exacto.
- Plástico adherible.
- Dos piedras porosas.
- Papel filtro.
- Tijeras.
- Cronómetro.
- Flaneras.
- Horno de temperatura constante.
- Báscula de 0.01 gr.
- Pizeta.

4.8.1 Preparación de la muestra.

1. Para medir la expansión de un suelo no saturado se requiere el uso del edómetro, para esto las muestras de arcilla fueron ensayadas en condiciones inalteradas, con la humedad óptima y peso volumétrico y adicionando cemento al 2, 4 y 6%, de igual forma adicionando cal. La humedad de cada mezcla fue determinada inicialmente en las pruebas proctor estándar, así como el γ_m , con finalidad de representar las condiciones óptimas.
2. Se determina las dimensiones del anillo a utilizar, este sin considerar extensiones, como son el diámetro, altura en cm y peso en gr.
3. Se labra para el caso de muestra inalterada cuidando la parte superior de la muestra como se muestra en la figura 4.21, y para el caso del suelo cemento o cal se determina la masa inicial con la humedad correspondiente de acuerdo a los resultados obtenidos de las curvas de compactación proctor estándar.



Figura 4.21 Labrado de muestra para determinar el porcentaje de expansión.

4. Se determina la humedad inicial del producto labrado. Se pesa la muestra mas el anillo.

5. Se preparan dos papeles filtro del diámetro de la muestra y colocan una en cada cara de la muestra seguido de esto se colocan las piedras porosas. Se debe cuidar que las piedras porosas estén completamente secas en el momento de su uso.

4.8.2 Procedimiento de prueba.

1. Se monta la muestra en el consolidómetro nivelando el brazo y colocando en ceros el micrómetro de deformación.
2. Se satura la muestra y se toma lectura en el extensómetro con los tiempos de 5", 15", 30", 1', 2', 4', 8', 30', y 1,2,4,8,16,24 horas. En la figura 4.20 se muestran los consolidómetros en su periodo de medición.
3. Una vez terminada la expansión de la muestra se retira la muestra del consolidómetro y se determina el peso de la muestra saturada.
4. Se grafica los resultados tiempo en minutos contra expansión unidimensional en %.



Figura 4.22 Ensaye de expansión.

4.9 Succión.

Es una cantidad de energía que evalúa la capacidad del suelo para retener agua. Cuando el agua libre se traslada al ambiente del suelo, el agua puede retenerse o absorberse por el suelo. Para perder el agua adsorbida, se requiere energía externa para contrarrestar las fuerzas de retención del agua. La energía aplicada por unidad de volumen de agua viene a ser la que se conoce como succión del suelo. En términos generales, entre más seco esté el suelo, la succión será mayor (Zepeda et al 2004).

Este método expone al papel filtro como sensor pasivo para evaluar la succión mátrica y total. De esta forma se determina el contenido de agua en el papel filtro que está en contacto directo con el suelo o en equilibrio con la presión parcial del vapor de agua existente en el aire de un contenedor hermético, dentro del cual se coloca previamente el espécimen de suelo hasta que se establezca un equilibrio de la humedad, es decir que la presión parcial del vapor de agua en el aire está en equilibrio con la presión de vapor del agua del poro en el espécimen del suelo.

4.9.1 Preparación de la muestra.

Se tomaron muestras de arcilla mezclándose con diferentes cantidades de cal y cemento al 2%, 4% y 6%. Se homogenizaron y se humedecieron de acuerdo a las humedades óptimas determinadas en la curva proctor estándar para cada caso. Se pesaron cuatro muestras de cada mezcla y se colocaron en frascos previamente identificados.

4.9.2 Procedimiento de prueba.

De acuerdo a las humedades óptimas determinadas en las curvas proctor estándar se procedió a reproducir para cada caso aplicando sus diferentes

Antes de comenzar a manipular el papel filtro, deben de protegerse las manos con los guantes de látex, posteriormente se procede a realizar el corte del papel filtro en

círculos de 5.5 cm de diámetro. Se debe tener especial cuidado en no marcar con lápiz o plumón, ni perforar los papeles filtro al momento del cortado, por lo que no deberá usarse compás.

Se secan los papeles filtros seleccionados para la prueba al menos 16 horas o toda la noche en el horno de secado a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, para después colocar el papel filtro en un desecador con sílica. El papel filtro puede ser tratado sumergiendo cada papel en una concentración al 2% de pentaclorafenol diluido en metanol antes de usarse para prevenir el crecimiento de organismos o descomposición biológica del papel filtro. La descomposición biológica puede ser significativa cuando el papel filtro esta sujeto a humedad, en un ambiente cálido por más de 14 días (ASTM D 5298).

Coloque una muestra de suelo inalterado o fragmentos de suelo dentro del contenedor de vidrio como se muestra en la figura 4.23. El espécimen de suelo deberá llenar lo mejor posible el contenedor para reducir el tiempo de equilibrio y minimizar los cambios de succión en el suelo.



Figura 4.23 Contenedor de vidrio.

Se retiran dos papeles filtro del desecador (ya tratado con pentaclorofenol si se realizó el tratamiento) y se colocan inmediatamente sobre el espécimen que se encuentra

dentro del contenedor, pero aislándolos del mismo con una canastilla de alambre, un O-ring, u otro elemento inerte con un área superficial mínima entre el papel filtro y el suelo. El papel filtro debe tomarse con pinzas y usar guantes para toda su manipulación. Las orillas del papel filtro deberán estar un poco suspendidas para facilitar su remoción del contenedor con el uso de las pinzas después de haberse logrado el equilibrio.

Se coloca en su lugar la tapa del contenedor y se sella con papel encerado. Después se coloca el contenedor en una caja aislada térmicamente y se introduce en un cuarto de temperatura controlada. Una temperatura típica nominal es de $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}$. Debe permitirse el equilibrio entre la succión del papel y el espécimen de suelo dentro del contenedor por un mínimo de 7 días. Después se deberá pesar el contenedor metálico para el papel filtro con una precisión de 0.0001 g poco antes de que termine el periodo de equilibrio, designándole a este peso T_c y que corresponde al contenedor metálico frío.

Al final del periodo de equilibrio, coloque cada uno de los papeles filtro en el contenedor metálico previamente pesado. Utilizando un par de pinzas, se transfiere cada papel filtro del contenedor al contenedor metálico de masa predeterminada (T_c), este proceso entero debe ser completado de 3 a 5 segundos, después se sella el contenedor.

La clave para medir exitosamente el contenido de agua del papel filtro esta en minimizar la pérdida de humedad durante la transferencia de papel filtro del contenedor y durante la determinación de su masa antes de introducirlo al horno de secado. Se han observado pérdidas en peso de 5% o más debido a la evaporación durante un lapso de 5 a 10 segundos cuando se expone el papel filtro en un cuarto con una humedad relativa (R_H) de 30 a 50%. Posteriormente se determina la masa M_1 del contenedor metálico frío con el papel filtro húmedo con una precisión de 0.0001 g, después se coloca el contenedor dentro del horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ con la tapa ligeramente abierta para que el papel filtro pierda toda su humedad. Repetir este procedimiento para las demás pruebas.

Los contenedores deberán permanecer en el horno por un mínimo de 2 horas. Después de este tiempo mínimo, selle y deje los contenedores al horno por lo menos 15 minutos para permitir el equilibrio de temperatura. Saque el contenedor metálico con el papel filtro del horno y después determine la masa total M_2 del contenedor metálico caliente con el papel filtro seco con una precisión de 0.0001 g, inmediatamente saque los papeles filtro y redetermine la masa del contenedor que ha contenido el papel filtro o masa caliente T_h con precisión de 0.0001 g. Repetir este procedimiento para contenedores adicionales. Los contenedores metálicos del papel filtro deberán ser colocados en un bloque metálico aproximadamente 30 segundos antes de pesarlos para enfriarlo, ya que dicho bloque reduce las variaciones de temperatura durante la determinación de la masa. Una vez que las masas M_2 y T_h han sido determinadas, deseche los papeles filtro. Bajo ninguna circunstancia deberá reutilizarse papeles filtro secados al horno.

Se calcula la humedad del papel filtro a partir de los datos obtenidos mediante la siguiente expresión:

$$M_f = M_2 - T_h \quad (4.16)$$

$$M_\omega = (M_1 - T_c) - (M_2 - T_h) \quad (4.17)$$

Donde:

M_f = Masa del papel filtro seco, g.

M_1 = Masa del contenedor con el papel filtro previo al secado, g.

M_2 = Masa del contenedor con el papel filtro seco, g.

T_h = Masa de contenedor caliente, g.

M_ω = Masa de agua en el papel filtro, g.

T_c = Masa del contenedor frío, g.

El contenido de agua (ω_f) del papel filtro, expresado en porcentaje, se obtiene con la siguiente expresión:

$$\omega_f = 100 \frac{M_\omega}{M_f} \quad (4.18)$$

Se puede convertir el contenido de agua del papel filtro, ω_f , a un valor de succión por medio de la curva de calibración de referencia o calcular la succión a partir de:

$$h = m\omega_f + b \quad (4.19)$$

Donde:

h = es la succión total (kPa).

m = es la pendiente de la curva de calibración del papel filtro (kPa/%).

b = es la intersección de la curva de calibración del papel filtro (kPa).

V. RESULTADOS

5.1 Materiales utilizados.

Los suelos expansivos estudiados se encuentran en la zona del fraccionamiento Tejeda, en el municipio de corregidora, Querétaro, Qro. México. Para el caso de la arena limosa (SM) conocida regionalmente como “Tepetate” fue extraído del banco “Conin”. La cal y el cemento es el que comúnmente se utiliza en la región.

5.2 Caracterización de los materiales.

La caracterización de los materiales por utilizar consistió en determinar propiedades índice como límites líquidos, plásticos y contracción, índice plástico, humedad, así como su clasificación según el sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S). También Se obtuvo la granulometría de cada material.

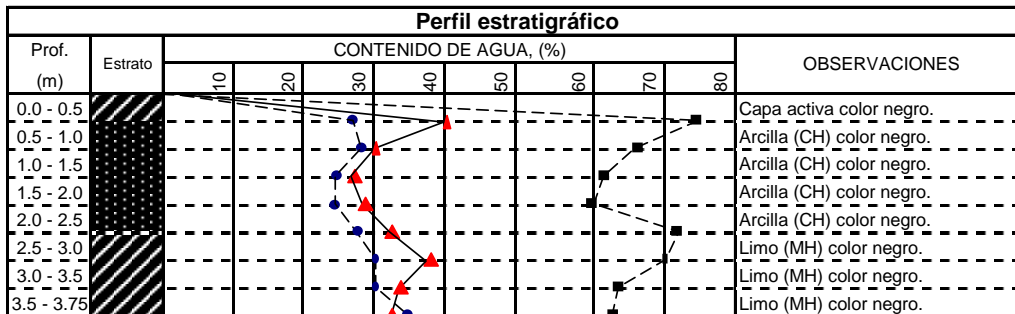
Se inició con la caracterización de los materiales a utilizar como son el tepetate cuya procedencia es del banco denominado “Conin” de la Ciudad de Querétaro, Qro., México. Las características del tepetate se muestran en la tabla 5.1. De la misma forma se tomaron muestras inalteradas de la arcilla en la etapa de exploración y se procedió a realizar la caracterización para cada pozo a cielo abierto (PCA) explorado correspondiente a la zona de estudio ubicado en el fraccionamiento Tejeda, en el Municipio de Corregidora, Querétaro, Méx. En la tabla 5.2 se muestra las características del PCA-01, en la tabla 5.3 se presentan las características del PCA-02 y por último en la tabla 5.4 se presentan las características del PCA-03.

Tabla 5.1 Características del material regional “tepetate”.

Propiedades Índice		
Límite Líquido =	26.9	(%)
Límite Plástico =	23.4	(%)
Índice Plástico =	3.5	(%)
Granulometría		
Gravas =	0	(%)
Arenas =	84	(%)
Finos =	16	(%)
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos		
SM (Arena limosa)		

Tabla 5.2 Características de la arcilla, PCA-01.

Características del PCA-01										
Prof. (m)	W (%)	G (%)	A (%)	F (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	SUCS	
0.5	28	0	8	92	68	32	36	21	CH	Arcilla de alta compresibilidad
1	29	0	2	98	66	30	36	20	CH	Arcilla de alta compresibilidad
1.5	24	0	11	89	61	27	34	14	CH	Arcilla de alta compresibilidad
2	24	0	9	91	60	29	31	15	CH	Arcilla de alta compresibilidad
2.5	28	0	2	98	71	32	39	16	CH	Arcilla de alta compresibilidad
3	30	0	2	98	70	38	33	18	MH	Limo de alta compresibilidad
3.5	30	0	2	98	64	34	30	18	MH	Limo de alta compresibilidad
3.75	34	0	2	98	63	33	30	18	MH	Limo de alta compresibilidad



ω (%) :	●
LL (%) :	■
LP (%) :	▲

Tabla 5.3 Características de la arcilla, PCA-02.

Características del PCA-02										
Prof (m)	W (%)	G (%)	A (%)	F (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	SUCS	
0.5	14	33	4	63	80	33	47	19	CH	Arcilla de alta compresibilidad
1.5	16	1	12	87	47	23	23	12	CL	Arcilla de baja compresibilidad
2	22	0	5	95	51	25	26	12	CH	Arcilla de alta compresibilidad
2.5	25	0	2	98	69	28	41	17	CH	Arcilla de alta compresibilidad
3.7	24	0	7	93	59	28	31	15	CL	Arcilla de baja compresibilidad

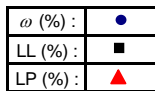
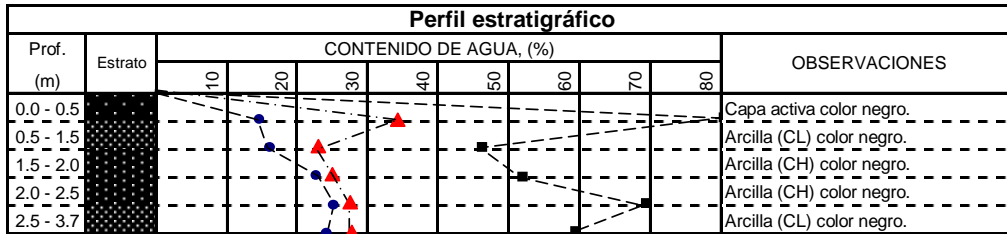
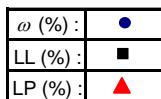
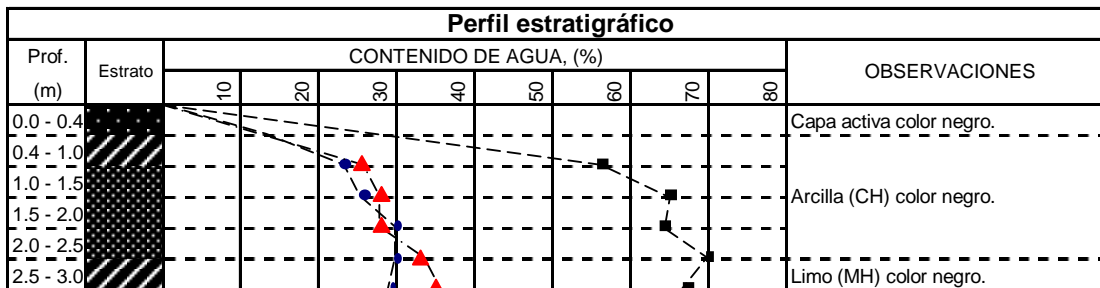


Tabla 5.4 Características de la arcilla, PCA-03.

Características del PCA-03										
Prof (m)	ω (%)	G (%)	A (%)	F (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	SUCS	
1	23	0	6	93	57	26	31	12	CH	Limo de alta compresibilidad.
1.5	26	0	3	97	65	28	37	16	CH	Arcilla de alta compresibilidad.
2	30	0	1	99	64	28	36	16	CH	Arcilla de alta compresibilidad.
2.5	30	0	2	98	70	32	38	17	CH	Arcilla de alta compresibilidad.
3	29	0	3	97	67	35	32	15	MH	Limo de alta compresibilidad.



5.3 Determinación del γ_d máx y humedad óptima.

Se determinaron el $\gamma_{dmáx}$ y la humedad óptima al tepetate y sus mezclas, ver tabla 5.5. También se realizaron las pruebas correspondientes para determinar el $\gamma_{dmáx}$ y humedad óptima a la arcilla y sus mezclas, ver tabla 5.6.

Se observa que el $\gamma_{dmáx}$ aumenta para el caso del tepetate con cemento y disminuye en las mezclas de tepetate cal respecto al valor del tepetate solo. Debido a las propiedades de los aditivos utilizados se puede apreciar un mayor contenido de agua para la mezcla de tepetate-cemento en comparación con el tepetate-cal, ver tabla 5.5.

Para la arcilla, se tiene que los pesos específicos secos máximos son menores para mezclas de arcilla cemento y cal respecto al valor del natural, no así para la humedad. Cabe mencionar que la mezcla de arcilla-cal presentó mejor trabajabilidad durante el proceso de compactación. En la tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos para estas mezclas.

Tabla 5.5 $\gamma_{dmáx}$ y humedad óptima del tepetate.

Curva Proctor Estándar			
Suelo	w (%)	γ_m kg/m ³	γ_d kg/m ³
Tepetate	25	1637.5	1310
Tepetate-Cal 2%	28	1661.44	1298
Tepetate-Cal 4%	28.1	1664.019	1299
Tepetate-Cal 6%	28.7	1673.1	1300
Tepetate Cemento 2%	25.6	1745.84	1390
Tepetate-Cemento 4%	29	1751.82	1358
Tepetate-Cemento 6%	32.1	1779.387	1347

Tabla 5.6 $\gamma_{dmáx}$ y humedad óptima de la arcilla.

Curva Proctor Estándar			
Suelo	w (%)	γ_m kg/m ³	γ_d kg/m ³
Natural	29	1883.4	1460
Arcilla-Cal 2%	30.2	1727.754	1327
Arcilla-Cal 4%	32	1745.04	1322
Arcilla-Cal 6%	33	1752.94	1318
Arcilla-Cemento 2%	35.6	1883.484	1389
Arcilla-Cemento 4%	37.4	1918.104	1396
Arcilla-Cemento 6%	39.2	1907.04	1370

5.4 Propiedades índice de las mezclas.

Los límites de consistencia se determinaron únicamente en la arcilla debido a las características particulares que presentan las arcillas y a su interés por su comportamiento mecánico. A lo largo del desarrollo experimental se determinó el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad a diferentes edades, antes de someterse bajo carga hidráulica y después de esta, por lo tanto se manejará en las figuras siguientes como antes y después refiriéndose a lo anterior, esto con el propósito de conocer como queda clasificado el suelo bajo estas condiciones. En la figura 5.1 se puede apreciar que el suelo casi no tiene variación en lo que respecta a sus propiedades índices. Solamente en la mezcla arcilla-cal 2% hasta antes de los 28 días el límite líquido y plástico permanecieron como MH.

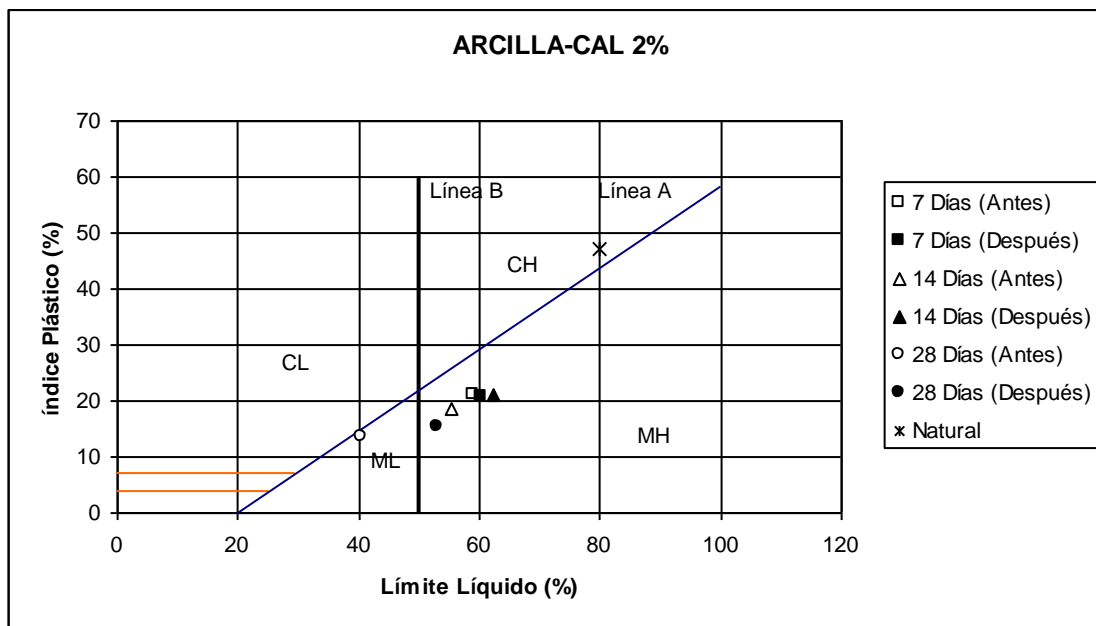


Figura 5.1 Propiedades índice, arcilla-cal 2%

En el caso de arcilla-cal 4% y 6%, se presentó un comportamiento similar, de ser clasificado conforme al S.U.C.S. como ML antes de determinar la permeabilidad pasó a ser MH una vez realizada las pruebas de permeabilidad. Bajo estas condiciones se puede

apreciar que aumenta la plasticidad junto con el límite líquido, esto no favorece las condiciones mecánicas. En la figura 5.2 se aprecia lo descrito anteriormente.

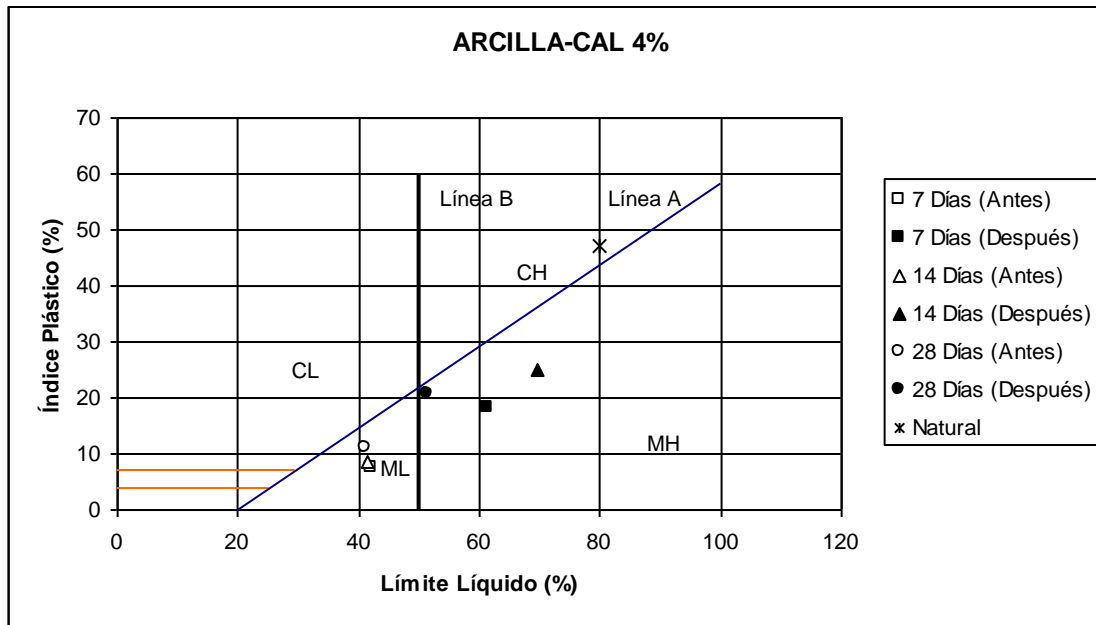


Figura 5.2 Propiedades índice, arcilla-cal 4%.

El comportamiento de la mezcla arcilla-cal 6% está bien definido y aumenta poco la plasticidad y el límite líquido después de determinar la permeabilidad en las diferentes mezclas. En la figura 5.3 se puede apreciar lo descrito anteriormente.

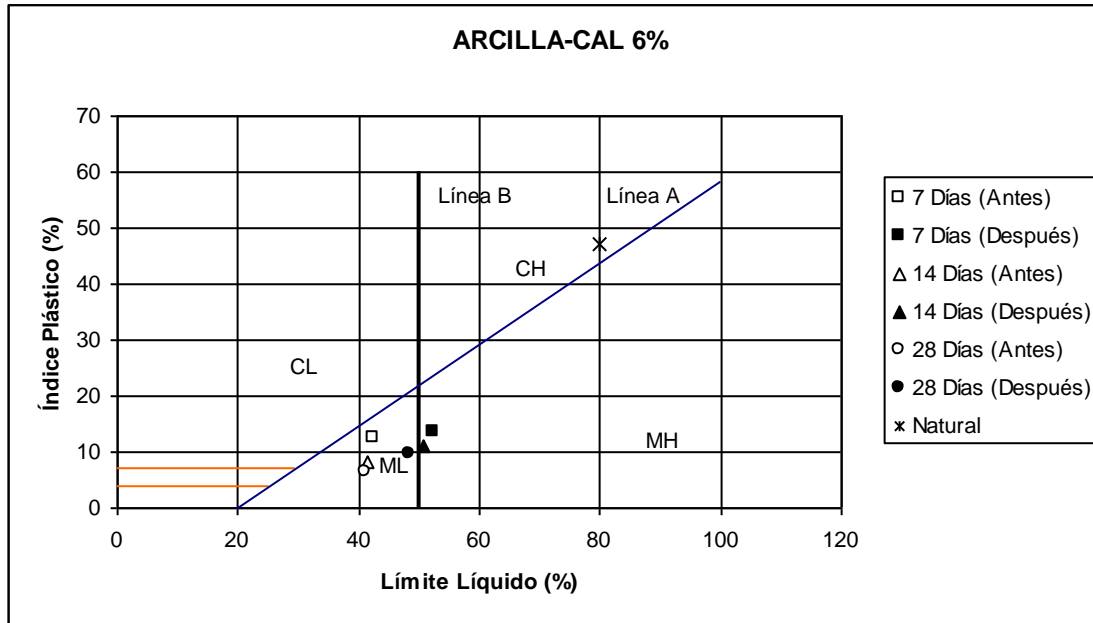


Figura 5.3 Propiedades índice, arcilla-cal 6%.

El comportamiento de las propiedades índice para el caso de las mezcla arcilla-cemento 2% antes y después de la permeabilidad fue de ML a MH, respectivamente. Como ya se describió anteriormente, el comportamiento del límite líquido e índice plástico se presentó de forma lineal y ascendente como se muestra en la figura 5.4.

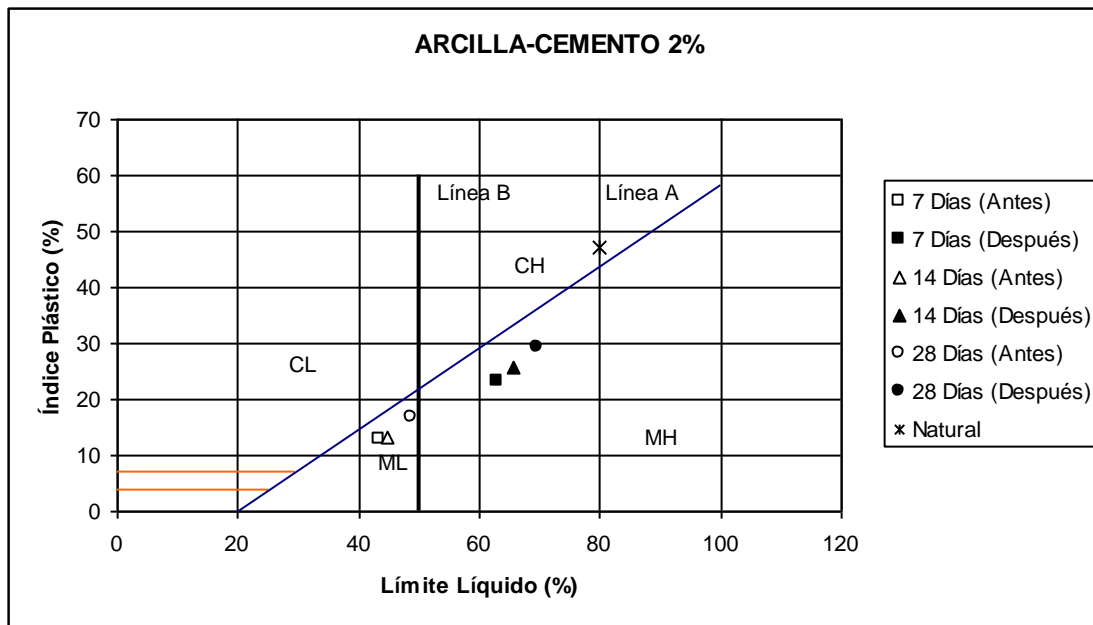


Figura 5.4 Propiedades índice arcilla-cemento 2%.

Para el caso de la arcilla-cemento 4%, el límite líquido e índice plástico presentó casi el mismo comportamiento respecto al caso anterior, es decir, se presentó un ascenso lineal como se muestra en la figura 5.5. Se aprecia casi el mismo comportamiento que presentó en el caso arcilla-cemento 2%, salvo que este fue casi vertical. La arcilla-cemento 4% se clasificó como ML antes de la permeabilidad y como MH después de ésta.

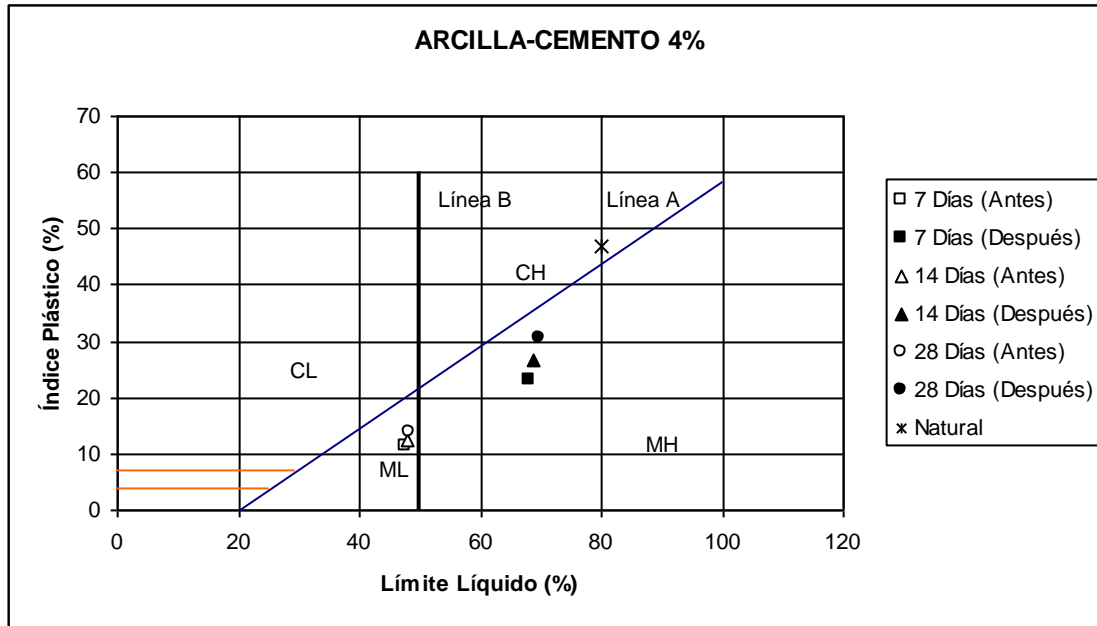


Figura 5.5 Propiedades índice, arcilla-cemento 4%.

En el caso de arcilla-cemento 6% no se presentó un comportamiento definido ya que antes de la permeabilidad el comportamiento es lineal y ascendente de forma casi horizontal y después de la permeabilidad descende en el valor del índice plástico y se clasifica MH. Como ya se explicó anteriormente (figura 5.6).

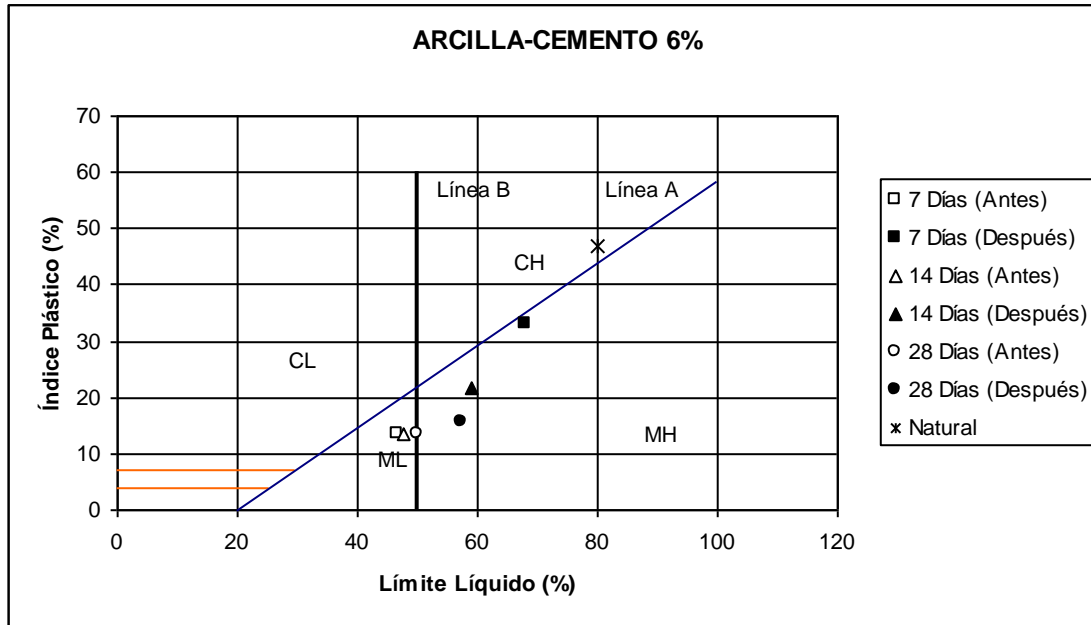


Figura 5.6 Propiedades índice, arcilla-cemento 6%.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las propiedades índice para mezclas de arcilla cal y cemento con sus diferentes porcentajes podemos decir que se presentó un solo patrón de comportamiento, ya que antes de determinar la permeabilidad las mezclas se clasificaban como ML, disminuyendo el índice plástico de acuerdo a las condiciones naturales de la arcilla y lo mismo sucedió en el límite líquido, pues éste disminuyó en las diferentes mezclas tanto de cal como de cemento. Sin embargo, una vez determinada la permeabilidad, las mezclas de suelo se clasificaron como MH, aumentando el límite líquido y el índice plástico. Solo en el caso de la mezcla de arcilla cal no sucedió lo descrito anteriormente, ya que el suelo permaneció en el área de clasificación de MH.

No se determinaron las propiedades índice en el tepetate debido a que éste no presenta problema de compresibilidad o plasticidad.

5.5 Compresión simple.

Se realizaron pruebas de compresión simple a probetas de suelo natural remoldeado y mezclado con cal y cemento con los porcentajes de 2, 4 y 6% respecto al peso seco a 7, 14 y 28 días, tanto para el tepetate y la arcilla.

Los resultados de las muestras obtenidas presentaron un aumento en su resistencia a la compresión simple, sobre todo mayor resistencia en todos los casos de las mezclas suelo-cemento. En la figura 5.7 se puede apreciar que la mezcla del tepetate-cemento tiene mayor resistencia, sin embargo la mezcla de tepetate-cal 6% se mantiene casi cerca de la mezcla tepetate-cemento 4%.

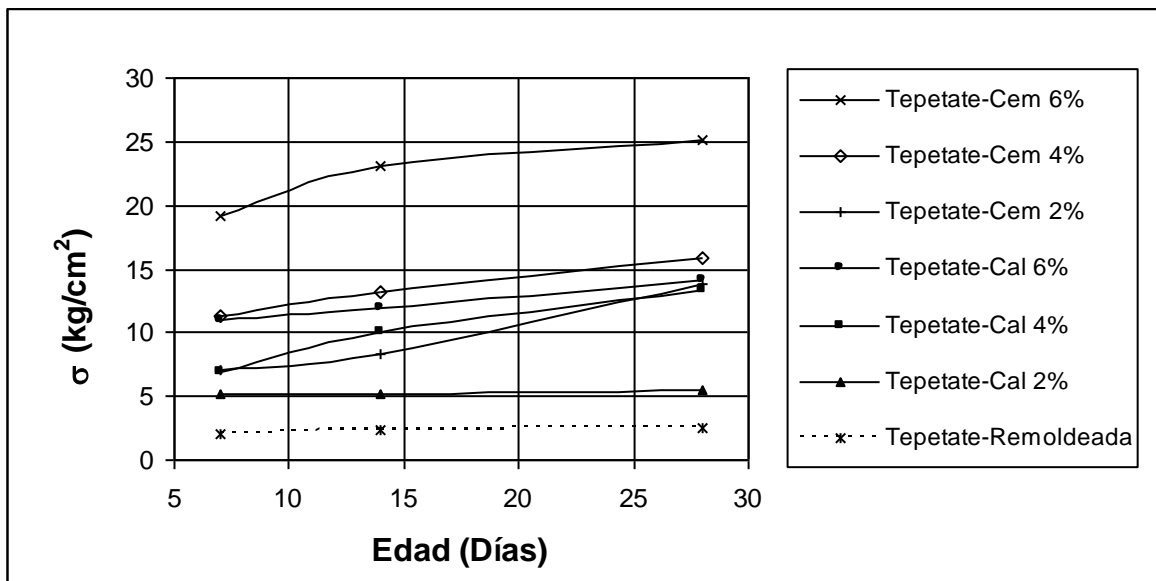


Figura 5.7 Resistencia a la compresión simple del tepetate.

Para el caso de las mezclas de arcilla (figura 5.8), las resistencias entre el cemento y la cal fueron bien definidas conforme avanzaba la edad de ensaye. Como se muestra en la figura 5.8, la resistencia alcanzada por las probetas de arcilla-cemento fue creciendo gradualmente en comparación con las de arcilla-cal.

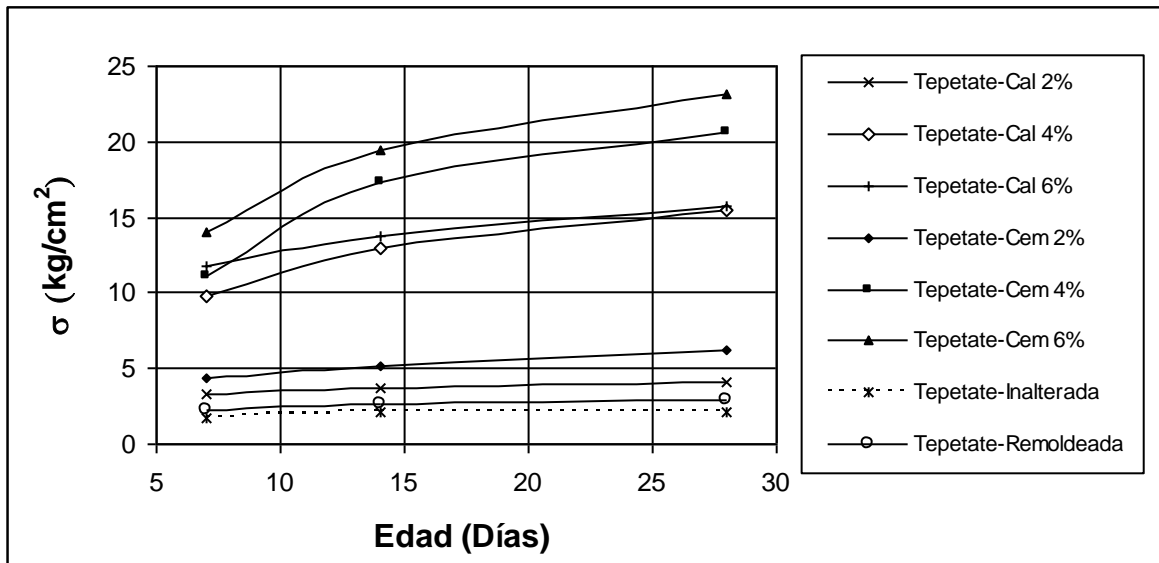


Figura 5.8 Resistencia a la compresión simple de la arcilla.

5.6 Permeabilidad.

Para determinar la permeabilidad se utilizó el permeámetro de carga variable y se realizó al tepetate y la arcilla como materiales solos, así como a sus mezclas con cemento y cal a diferentes porcentajes 2, 4 y 6 % a 7, 14 y 28 días.

Inicialmente la permeabilidad del tepetate natural es de $1.141E-04$ cm/seg y como se puede apreciar la permeabilidad se estuvo moviendo solo en ese rango. La figura 5.9 muestra gráficamente el comportamiento de la permeabilidad en las diferentes mezclas de tepetate. Como se observa, en la mezcla de tepetate-cemento la permeabilidad disminuye conforme pasa el tiempo, caso contrario con la cal.

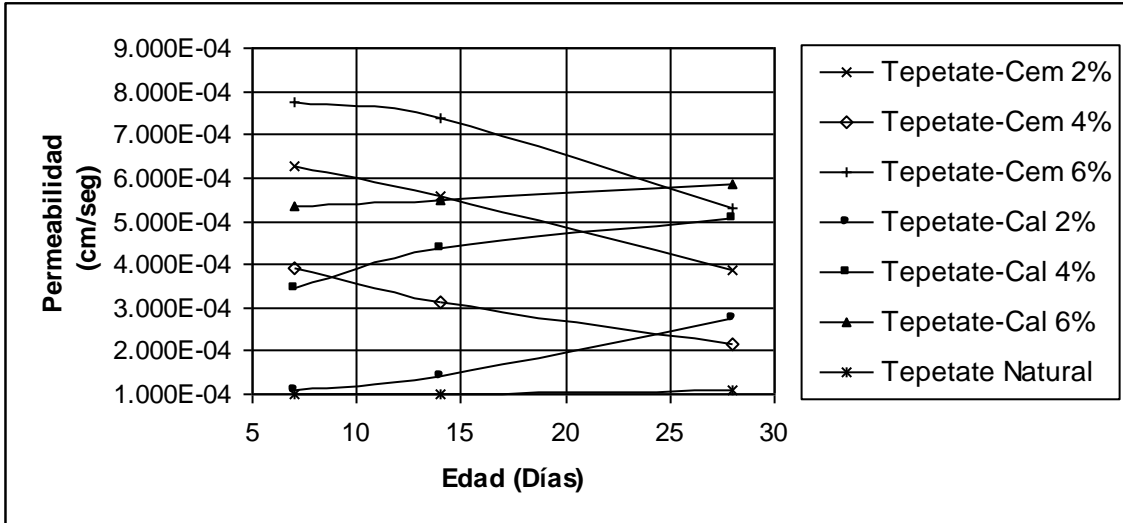


Figura 5.9 Permeabilidad en las mezclas del tepetate.

La figura 5.10 muestra claramente que la proporción de arcilla-cemento tuvo un comportamiento casi horizontal durante el tiempo. Por otro lado, las mezclas de arcilla-cal presentaron un incremento en la permeabilidad considerablemente a excepción de la mezcla arcilla-cal 2%.

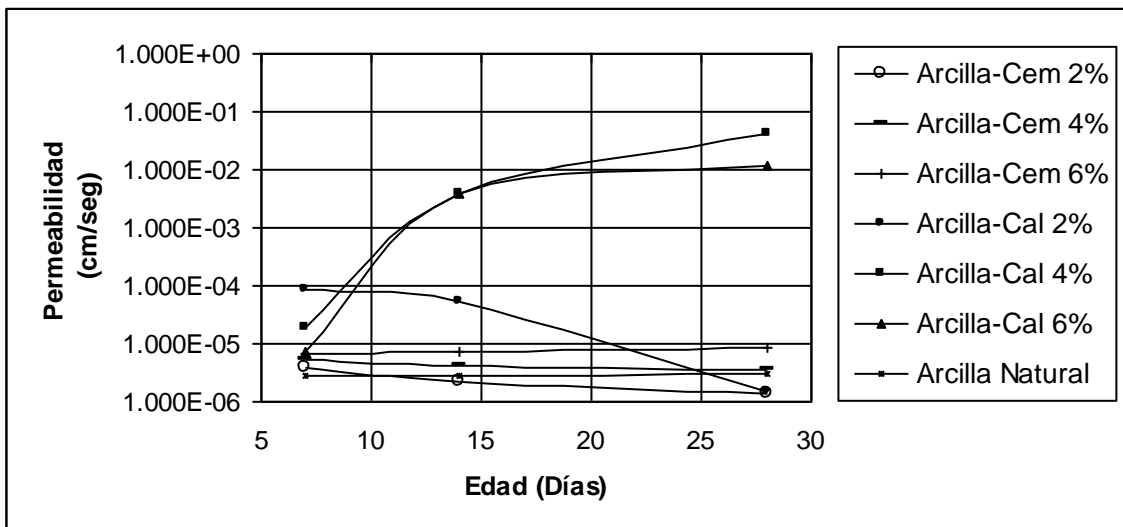


Figura 5.10 Permeabilidad en las mezclas de arcilla.

5.7 Expansión.

Las muestras inalteradas de arcilla presentaron un porcentaje de expansión promedio de 15.02%. Las muestras remodeladas con su $\gamma_{d_{max}}$ y humedad óptima incrementaron el porcentaje de expansión registrando un promedio de 25.31%. Las mezclas de arcilla con cal y cemento al 2% disminuyeron el porcentaje de expansión de 11.70% y 11.81% respectivamente (figura 5.11). Con los porcentajes de 4% y 6% se disminuye la expansión a valores iguales y menores al 1% (figura 5.12). La figura 5.11 y 5.12 muestra claramente los diferentes comportamientos de las expansiones de la muestra inalterada, remodelada y de las mezclas.

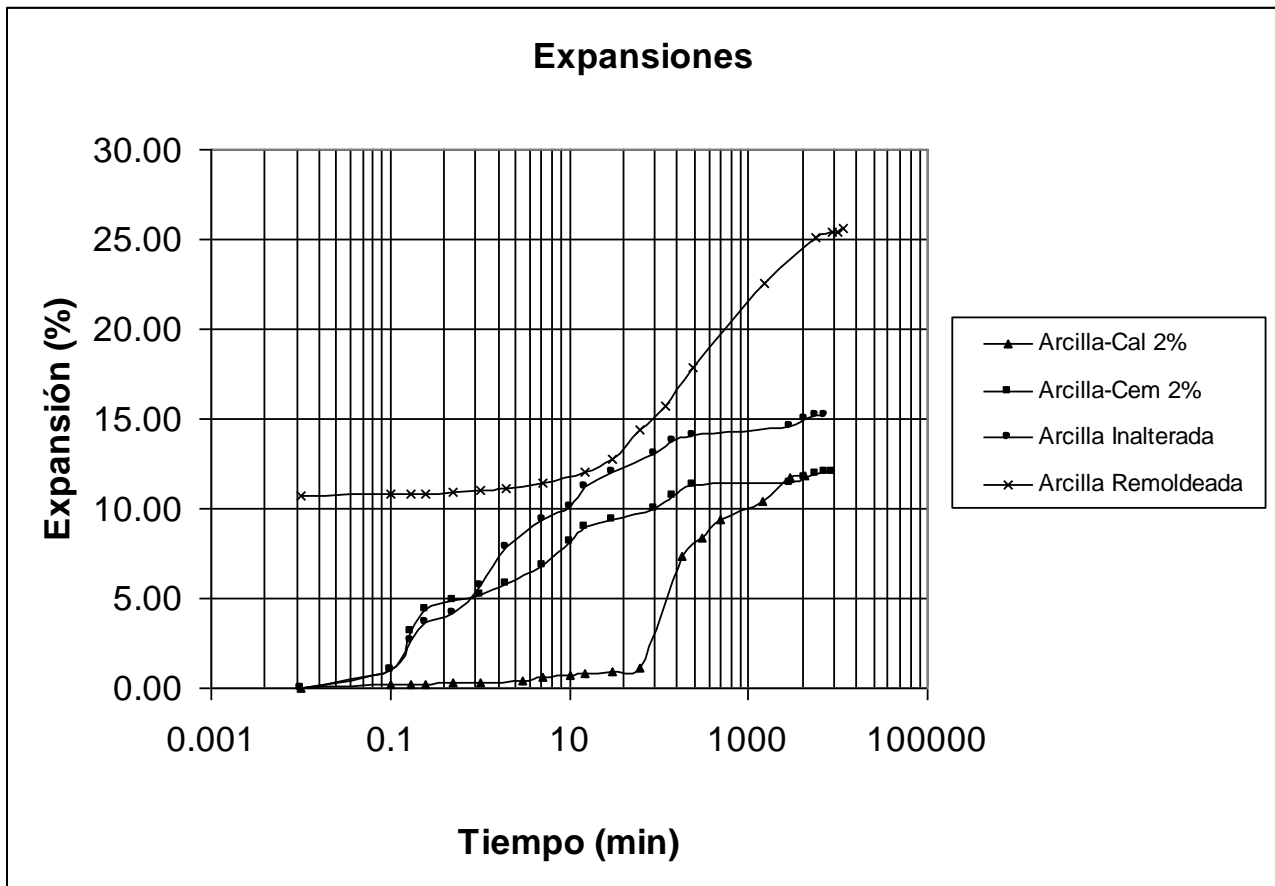


Figura 5.11 Porcentajes de expansión en muestras inalteradas, con cal y cemento al 2%.

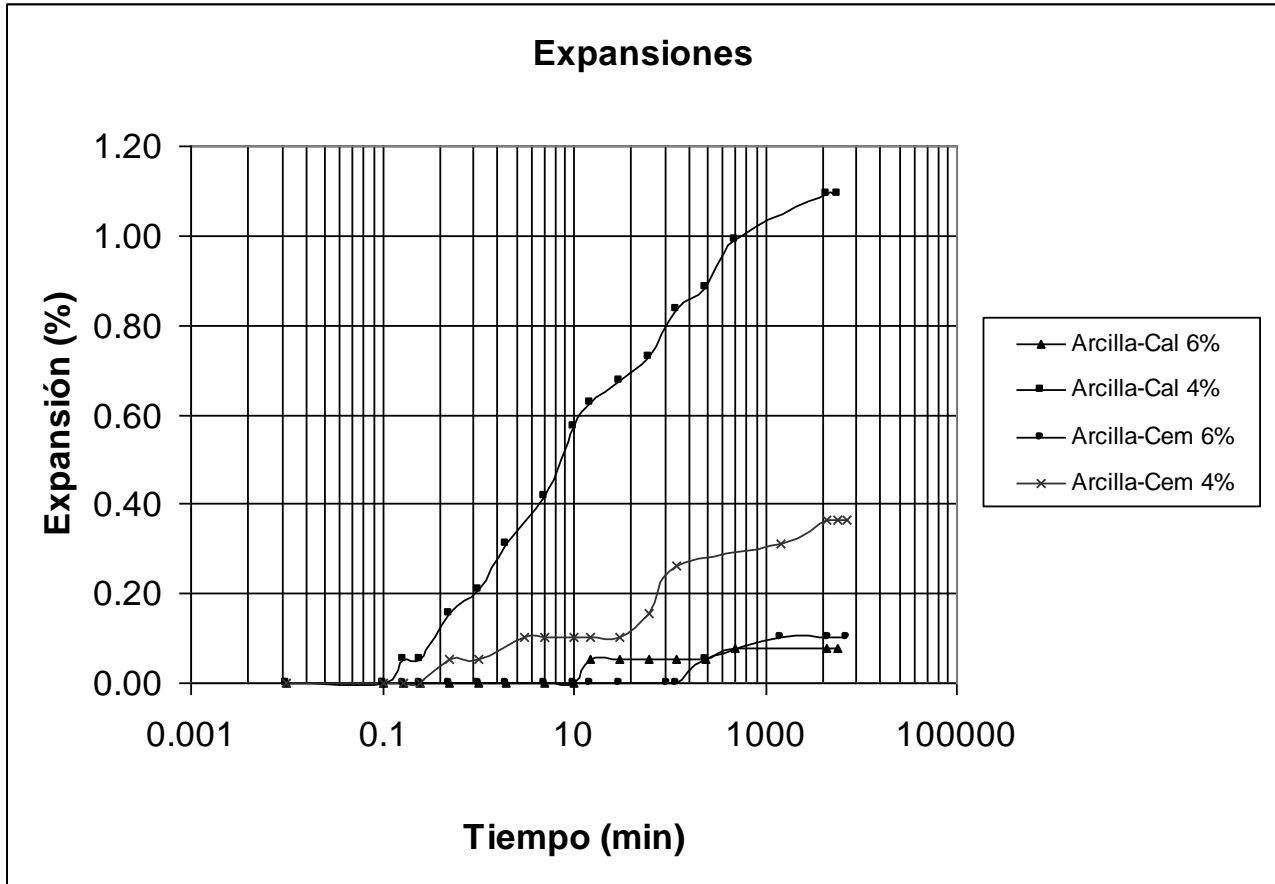


Figura 5.12 Porcentajes de expansión con cal y cemento al 4% y 6%.

5.8 Succión

Este parámetro no es un objetivo de la tesis, sin embargo se realizaron ensayos para complementar la investigación. La succión se midió utilizando papel filtro. En general los valores encontrados en lo referente a la succión de la arcilla con cal y cemento fueron bajos. En la figura 5.13 se presenta el comportamiento de la succión de la arcilla-cal de la cual se observa que a mayor humedad y porcentaje de cal la succión disminuye.

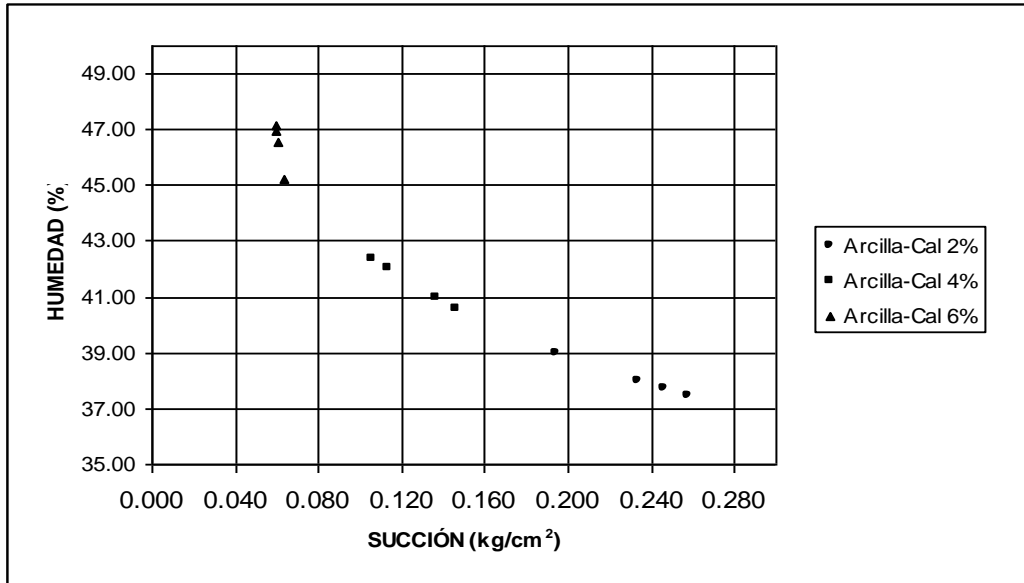


Figura 5.13 Succión de la mezcla arcilla-cal.

Para el caso de la succión en la arcilla-cemento no presenta mucha variación respecto a la cal, sin embargo, a partir del 4% de cemento la succión no varía mucho. La humedad en este caso fue un factor fundamental como se muestra en la figura 5.14.

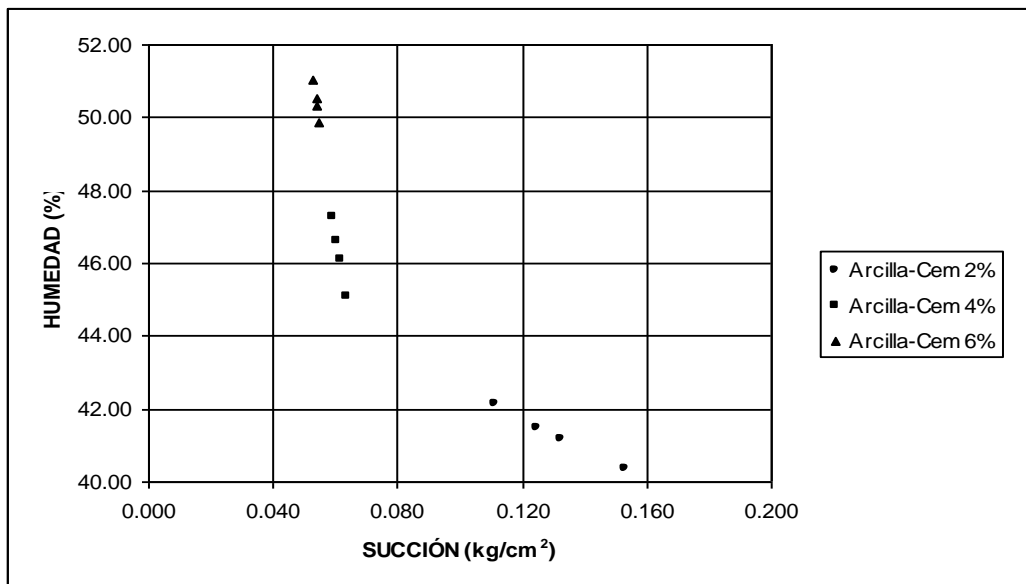


Figura 5.14 Succión de la mezcla arcilla-cemento.

5.9 Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH.

El valor de pH también se determinó para complementar la investigación aunque no sea objetivo de esta.

Como se describió anteriormente, se presentó un cambio de clasificación del suelo a lo largo del desarrollo experimental y las pruebas con el potenciómetro presentó, al igual que las propiedades índice una ligera disminución. La tabla 5.7 presenta notablemente el comportamiento antes de la permeabilidad y después de esta para el caso de la arcilla-cal.

Tabla 5.7 Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH de la arcilla-cal.

ARCILLA - CAL 2%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	58.86	60.49	55.24	62.39	40.37	53.12
IP	21.05	20.75	18.61	20.94	13.42	15.40
pH	9.7	9.6	9.7	9.6	9.3	9.3
ARCILLA - CAL 4%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	42.08	61.46	41.54	69.66	40.96	51.30
IP	7.57	18.13	8.63	25.07	11.18	20.75
pH	10.6	10.2	10.6	10.1	10.1	9.6
ARCILLA - CAL 6%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	42.39	52.44	41.34	50.86	41.13	48.42
IP	12.67	13.48	8.11	10.90	6.29	9.79
pH	11.2	10.5	11.2	10.6	10.7	10.3

En las mezclas de arcilla-cemento se presentó el mismo comportamiento que la arcilla-cal, es decir, hay una disminución en los valores de pH como se indica en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Influencia de la permeabilidad en las propiedades índice y pH de la arcilla-cemento.

ARCILLA - CEMENTO 2%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	43.41	63.00	44.90	65.53	48.62	69.49
IP	12.68	23.22	13.27	25.69	16.66	29.45
pH	10.3	9.9	10.2	9.9	9.9	9
ARCILLA - CEMENTO 4%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	47.53	68.18	47.79	68.68	48.31	69.70
IP	11.38	23.12	12.43	26.57	13.71	30.54
pH	10.4	9.9	10.3	9.8	9.9	8.9
ARCILLA - CEMENTO 6%						
Edad	7 Días		14 Días		28 Días	
Condición	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	46.70	68.14	47.65	58.86	49.86	57.22
IP	13.62	33.10	13.58	21.75	13.44	15.48
pH	10.6	10.1	10.3	10.3	10	9.3

El pH es un parámetro para determinar si un suelo es ácido, neutro o alcalino, es decir, para valores menores de pH 7 se habla de un suelo ácido, para valores de pH 7 se encuentra en estado neutro y para valores mayores de pH 7 se clasifica como un suelo alcalino. Si bien es sabido que la capacidad de intercambio catiónico del suelo crece con el grado de acidez de los cristales, es decir, a mayor acidez el pH disminuye, para un valor de pH mayor de 7 se habla de un suelo alcalino, del cual se traduce a que el intercambio catiónico disminuye considerablemente.

5.10 Comportamiento succión-permeabilidad.

La correlación succión-permeabilidad de la arcilla con cal y cemento se comportó de la siguiente manera:

- En el caso de la arcilla-cal, a medida que la succión disminuye la permeabilidad aumenta considerablemente.

- La mezcla arcilla-cemento se comportó de forma contraria al caso arcilla-cal ya que conforme disminuye la succión la permeabilidad casi se mantiene constante. El comportamiento gráfico se muestra en la figura 5.15.

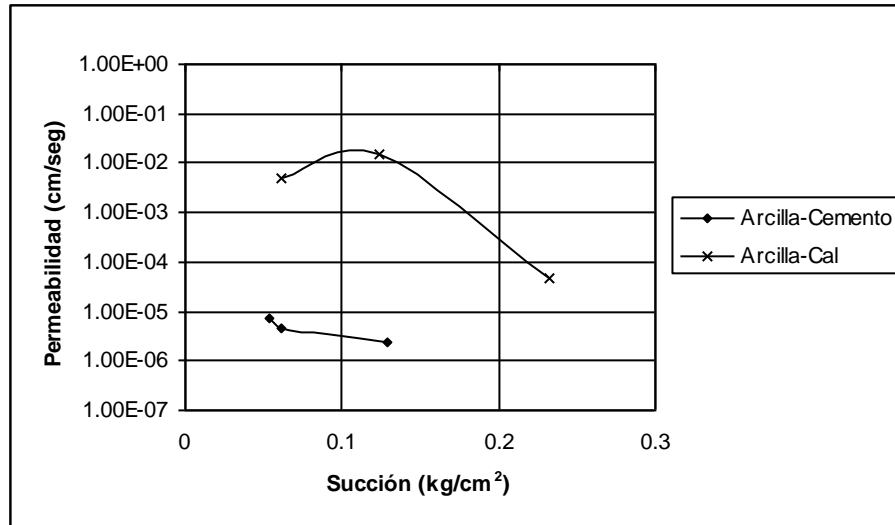


Figura 5.15 Comportamiento de Succión & Permeabilidad.

Como se analizó anteriormente el porcentaje de expansión se abatió a partir del 4% al 6% en ambas mezclas.

5.11 Comportamiento succión-expansión.

La correlación succión-expansión en la mezcla arcilla-cemento es todavía menor que la que se presentó con arcilla-cal. En la figura 5.16 se muestra como aumenta la expansión a medida que incrementa la capacidad de succión del suelo.

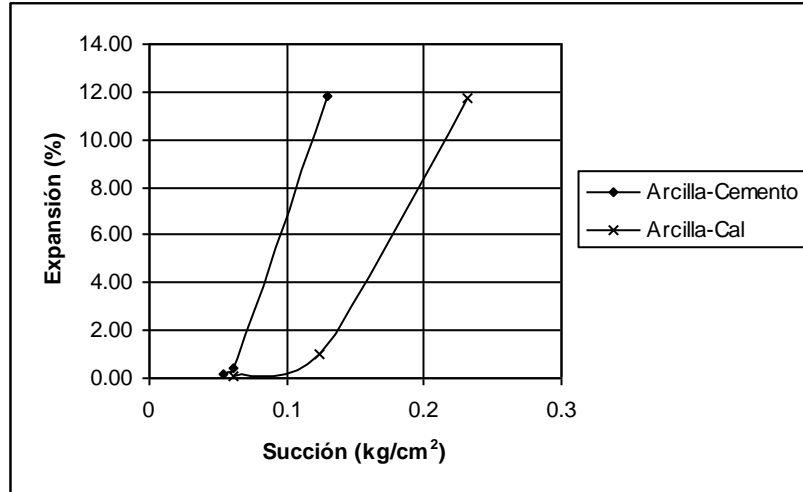


Figura 5.16 Correlación Succión-Expansión.

5.12 Comportamiento de resistencia & permeabilidad.

Se presenta la correlación resistencia a la compresión simple contra permeabilidad a diferentes edades de ensaye. Como se aprecia en la figura 5.17 existe mejor comportamiento disminuyendo la permeabilidad y aumentando la resistencia a la compresión simple en la mezcla tepetate-cemento con el 2% y 4%. Caso contrario en la mezcla de tepetate-cal en sus diferentes proporciones.

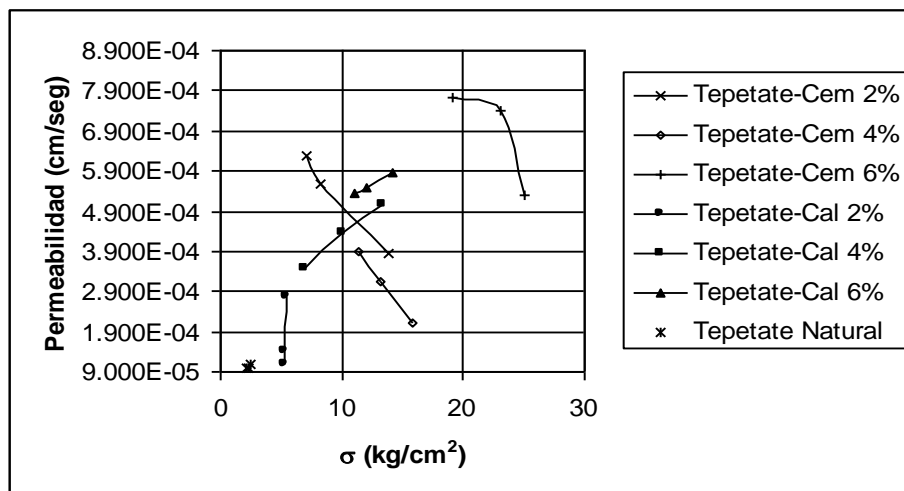


Figura 5.17 Comportamiento esfuerzo-permeabilidad en el tepetate.

Para el caso de la arcilla-cemento, permaneció casi constante la permeabilidad en la mezcla del 4% y 6%, aumentando la resistencia en el tiempo. Solo en el caso de la mezcla del 2% se presenta mayor tendencia a la impermeabilidad con menor resistencia.

El comportamiento de la mezcla arcilla-cal se presentó con mayor permeabilidad en las proporciones del 4% y 6% de forma muy considerable como se muestra en la figura 5.18. Solo con la mezcla del 2% se obtuvo una disminución con muy poca resistencia a la compresión.

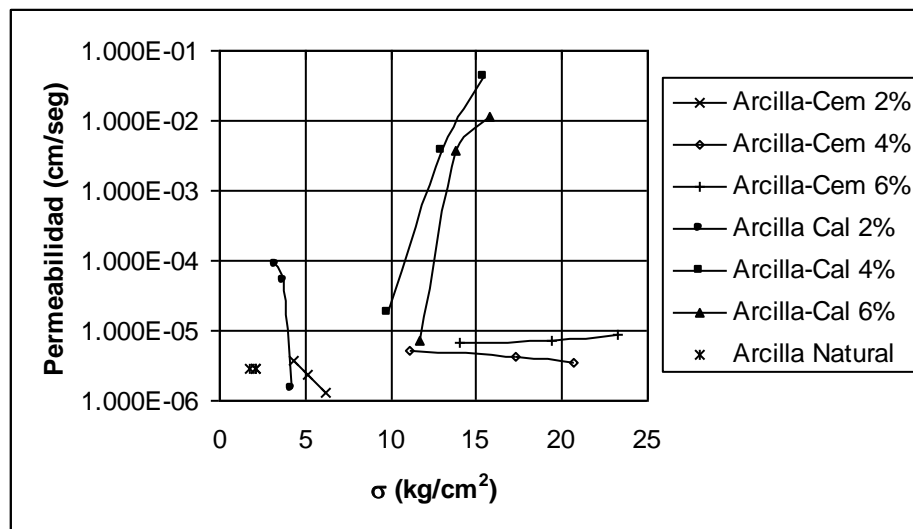


Figura 5.18 Relación Resistencia & Permeabilidad en la arcilla

5.13 Análisis de costos.

Se analizaron los costos de excavación para toda el área de una casa habitación de una planta con una superficie de 80 m² de construcción. El costo por el método de sustitución asciende a \$33, 247.92 pesos. En la tabla 5.9 se muestra el costo de sustitución sin mejoramiento químico y en la tabla 5.10 se presentan los costos con las diferentes mezclas. En este análisis se consideró hasta una profundidad de 1.50 m para el caso de sustitución de tepetate sin mejoramiento. Para el caso de las mezclas en la arcilla

y tepetate se consideró el costo por capas de 0.20 m. Solo en el caso de la arcilla no se consideraron los conceptos de acarreo y relleno.

Tabla 5.9 Análisis de costo de cimentación por sustitución y compactación mecánica del tepetate.

Fecha de cotización: Agosto de 2008				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Excavación por medios mecánicos para una capa de 0.20 m	m ³	16	\$32.00	\$512.00
Carga de material producto de la excavación.	m ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la Excavación*	m ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno incluye costo del tepetate*	m ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua. (Tepetate)	m ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.26
<i>Subtotal</i>				\$13,398.86
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,339.89
<i>Utilidad</i>				\$937.92
			TOTAL =	\$15,676.66
			Para una profundidad de 0.60 m	\$47,029.99

* El acarreo se refiere a un camión de 7 m³ de capacidad, por lo tanto se consideran 3 camiones para un espesor de 0.20m.

Tabla 5.10 Análisis de costo en las diferentes modalidades de estabilización para capas de 0.20 m.

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

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Se concluye que la arena limosa (SM) conocido en la región como “tepetate”, en condiciones naturales presenta permeabilidad semejante al de una arena fina y mezclado con cal y cemento lo incrementa. Por lo tanto, este material en condiciones naturales y mezclado con cal y cemento no cumple el objetivo de ser un material eficiente que pueda ser utilizado en sustitución de la arcilla expansiva debido a su alta permeabilidad, aunque sea inerte.
- La resistencia de las mezclas del tepetate-cemento son mayores a las de tepetate-cal y tepetate natural.
- La resistencia de la arcilla-cal y la arcilla-cemento tuvieron grandes diferencias entre ellas con el tiempo y con los porcentajes, presentándose mayor resistencia en las mezclas de suelo-cemento en comparación con la arcilla en condiciones inalteradas y remoldeada.
- Respecto a las propiedades índice en la mezcla arcilla-cal 2% se mantiene en la misma clasificación S.U.C.S., es decir MH. En todos los demás casos, tanto en arcilla-cal como arcilla-cemento el comportamiento parte de ser ML a MH, después de la permeabilidad. Analizando en conjunto con los resultados del potenciómetro en la misma modalidad de prueba de las propiedades índice se concluye que el suelo no presenta alteración respecto a la estabilización después de la permeabilidad.
- La permeabilidad en la mezcla de arcilla-cal con el 2% se comportó favorablemente disminuyendo en el tiempo, sin embargo, con el 4% y 6% aumentó notablemente y su comportamiento fue como el de una arena fina (entre 10^{-3} y 10^{-4}) según lo reportado por Casagrande y Fadum. La reacción de la cal con la arcilla en estos dos últimos porcentajes generó una textura como de arena, aglomerando la arcilla. En el caso de las mezclas de suelo-cemento, la permeabilidad se comportó favorablemente disminuyendo a través del tiempo.

- La expansión en la arcilla deja de presentarse en las mezclas de cal y cemento a partir del 4%, y se logra eliminar por completo la expansión con las mezclas del 6% para ambos casos.
- Observando los resultados y la combinación de estos se concluye que la mejor opción para mejorar un suelo potencialmente expansivo es implementando cemento al 4% de su peso volumétrico seco suelto, ya que aumenta la resistencia, disminuye la permeabilidad y no presenta expansión considerable.
- Respecto a la mezcla con cal y cemento se tiene que aunque la mezcla suelo cemento es mejor material para utilizarse como un material inerte e impermeable puede presentar problemas en el procedimiento de construcción.
- Para el caso de la mezcla arcilla-cal se tiene que la alta permeabilidad mostrada puede deberse a la absorción constante que presenta la cal con el agua. Sin embargo se ha demostrado que el espesor efectivo de arcilla-cal puede ser de 0.60 a 1.0 m (López-Lara et al. 2005), lo que significa que si hay entrada de agua en la superficie, ésta se quedaría en este espesor y solo bastaría tener precaución con las fugas de agua que pudiera haber a cierta profundidad.
- El costo analizado para una casa habitación de 80 m² se realizó por capas de 0.20 m resultando mas costoso sustituir el material con tepetate que estabilizar el suelo con cal o cemento.

Por lo tanto, si se considera una losa de cimentación en el área de cimentación se propondrían al menos dos alternativas:

1. Se proponen retirar el suelo como mínimo hasta una profundidad de 0.60 m en toda el área de construcción y mezclar el suelo cemento al 4% de su peso seco y compactar al 90% de su peso volumétrico seco máximo determinado en laboratorio mediante el procedimiento que indica la norma ASTM D698 y colocar tres capas de 0.20 m de espesor.
2. La otra alternativa es realizar zanjas alrededor de la cimentación de 0.20 x 1.0 m mejorando la arcilla con la misma proporción y compactando a la humedad óptima. En la parte superficial mejorar el suelo hasta una profundidad de 0.20 m y compactarlo con la humedad óptima.

Por otro lado se han presentado resultados en el cual se evidencia la capacidad de disipación de energía de expansión por la capa de material inerte el cual permite establecer el espesor apropiado de dicha capa bajo los criterios de compactación, módulos de elasticidad, módulo de Poisson y módulo de soporte así como las características de expansión del suelo, (Horta y Calderón, 2004).

Se presentan algunas recomendaciones para el procedimiento constructivo en el mejoramiento del suelo.

Durante el mezclado del suelo con los diferentes aditivos se deberá cuidar la calibración de los equipos y utilizar el mismo equipo de ensaye.

Se recomienda definir bien el proceso constructivo para el mejoramiento del suelo, homogenizar la mezcla y compactar a la humedad óptima que reporte el laboratorio. Otro factor importante a considerar es el seleccionar la maquinaria adecuada para el mezclado y compactación del material.

Al realizar el estudio de mecánica de suelos se deberá conocer la topografía de la zona, la geología y topología del lugar, estas son de suma importancia ya que son factores externos se deberán considerar para poder proponer las alternativas de solución.

Las instalaciones hidráulicas y sanitarias deberán tener un estricto control y verificar la inexistencia de fugas. En la etapa constructiva es de vital importancia que los materiales cumplan con lo requerido en las normas vigentes respaldados por reportes de laboratorio.

Procedimiento constructivo

Se recomienda escarificar con moto niveladora el material a utilizar como suelo cemento. Después que el material haya sido esparcido, se escarifica varias veces hasta que todo el material presente una gradación aceptable. El escarificador debe ser un modelo de dientes fijos, completos del diámetro y largos suficientes para efectuar una escarificación total y uniforme.

Determinada la dosificación por volumen del cemento que debe añadirse al suelo natural, se procede a determinar el espaciado de los sacos del producto en líneas paralelas a lo largo de la calzada previamente escarificada, definiendo así el área en metros cuadrados, que debe cubrir cada saco. En caso de utilizar cemento a granel, se determina el área de rodamiento que se puede trabajar con el contenido de una pipa de cemento. El material no requiera trabajar sobre una longitud mayor a 100 mts. Se recomienda verificar constantemente la humedad durante el proceso de construcción.

Una vez colocados los sacos del cemento, se procederá a romper la envoltura de los mismos y a vertir manualmente el contenido. Se inicia el mezclado con equipo apropiado para dicho trabajo, tales como mezcladoras semi romas agrícolas, moto niveladora y aditamentos hidráulicos para mezclado de materiales. Para garantizar un correcto mezclado en campo, con moto niveladora, es necesario acordonar el material cuando menos dos veces. Luego se procede a dar un baño con agua, conociendo la humedad higroscópica del material, en forma tal que no exceda hasta un 5% la humedad óptima.

Una vez humedecido el material se procede a uniformizar la humedad acordonando el material. Cuando el material presente una mezcla homogénea de suelo, cemento y agua, se procederá a conformar con moto niveladora. El material suelto se esparcirá con un espesor tal que al ser compactado no resulte espesores menores a 0.20 m.

En los lugares inaccesibles al equipo de compactación, el suelo cemento podrá ser compactado totalmente por medio de apisonadores manuales de rejilla para las capas inferiores, y apisonadores lisos para el acabado superficial. Es común preparar las juntas utilizando las cortadoras de las máquinas. Finalmente, se dará un riego superficial hasta la saturación a fin de iniciar el curado del material. Estas condiciones de curado deberán mantenerse por 7 días cuando menos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ashtiani, S.R. Little, N.D. and Masad, E. 2007. Evaluation of the impact of fines on the performance of lightly cement-stabilized aggregate systems. *Journal of the Transportation Research Board*. Vol. 2026, pp 81-88.
- Alshihabi, I.O. Shahrour and Mieussens, C. 2002. Experimental study of the influence of drying/wetting cycles on the resistance of a compacted soil. *Unsaturated Soils, Jucá de Campos & Marinho*, pp 491-494.
- Alshihabi, I.O. Shahrour and Mieussens, C. 2002. Experimental study of the influence of suction and drying/wetting cycles on the compressibility of a compacted soil. *Unsaturated Soils, Jucá de Campos & Marinho*, pp 541-545.
- Chen, F.H. 1975. *Foundations on expansive soils*. Else vier scientific publishing company. Amsterdam, the netherlands. Denver, USA.
- Fernández L.C. 1982. *Mejoramiento y estabilización de suelos*. Universidad de Guanajuato. Editorial Limusa. México.
- Fredlund, D. G. and Rajardjo, H. 1993. *Soil Mechanic for Unsaturated Soils*. Jhon Wiley and Sons, Inc. New York, USA.
- Garnica, A.P. Martínez, P.G.E.I. Prado, C.E.J. 2003. Algunos aspectos de la resistencia a la tensión y fatiga en suelos arcillosos estabilizados con cal. *IMT-SCT. Publicación técnica 230*. Querétaro, México.
- Garnica, A.P. Pérez, S.A. Gómez, L.J.A. Obil, V.E.Y. 2002. Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. *IMT-SCT. Publicación técnica 201*. Querétaro, México.
- Grim, R. E. 1968. *Clay Mineralogy*. Mc Graw Hill. New York, USA.
- Hernández, E. J.J. Estabilización con cal de arcilla en un pavimento flexible de Querétaro. *U.A.Q. Querétaro, México*.
- Hernández, Z. J.B. et al. 2006. Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos de Colombia. *II Congreso Internacional de Ingeniería*. U.A.Q. Querétaro, México.
- Hernández, Z. J.B. et al. 2008. Evaluación de la presión de expansión por el método B de la norma ASTM D4546 para muestras remoldeadas. *XXIV Reunión nacional de mecánica de suelos*. SMMS, Aguascalientes, México.
- Hernández, Z. J.B. López, L.T. 2006. Determinación del porcentaje de expansión a partir de la humedad del suelo. *XXIII Reunión nacional de mecánica de suelos*. SMMS, Chiapas, México.

- Horta, J.R. y Calderón, R.E. 2004. Influencia de la capa de material inerte en el diseño de una cimentación. Congreso Internacional de Ingeniería. U.A.Q. Querétaro, México.
- INEGI, Sistema de cuentas económicas y ecológicas de México, 1999-2004. México.
- Ingles, O.G. 1972. Soil stabilization, principles and practice. Butterworths Sydney. Australia.
- Instructivo para efectuar pruebas en suelos. 1981. Secretaría de asentamientos humanos y obras públicas (SAHOP). Vol. I. México.
- James, K. M. 1976. Fundamentals of soil behavior. University of California, Berkeley. Vol. 1 and 2. USA.
- Jimenez Salas, J. A. y Justo, J. L. 1975. Propiedades de los suelos y las rocas, Geotecnia y Cimentaciones I, Editorial Rueda, Madrid, España.
- Jones, D.E.J. and Holtz, W.G. 1973. Expansive soils, The hidden disaster. Civil Engineering. Vol 43. USA.
- Juárez, B. E. y Rico, R. A. 1963. Mecánica de suelos, tomo I. Editorial Limusa. México.
- Lambe, T. W. and Whitman, V. R. 1984. Mecánica de suelos. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa. USA.
- López et al. 1999. Un estudio comparativo de la efectividad de diferentes aditivos en el comportamiento expansivo de las arcillas. Mimeo. UNAM, México.
- López, L.T. 1998. Curso: Técnicas modernas de caracterización en la ciencia y tecnología de suelos arcillosos. U.A.Q., CONACYT, Instituto de Ingeniería de la UNAM. Querétaro, México.
- López, L.T. 1998. Nuevos materiales para la estabilización de suelos arcillosos expansivos. XIX Reunión nacional de mecánica de suelos, Puebla, México.
- López, L.T. et al. 2005. Useful lifetime and suitable thickness of soil-lime mixture. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. Vol.10. www.ejge.com/2005/Ppr0594/Ppr0594.htm.
- López, L. T. 2002. Estudio fisicoquímica de la modificación de suelos arcillosos. Tesis de doctorado. U.A.Q. Querétaro, México.
- López, L.T. y Guerrero, E. T. 2002. Análisis del tiempo óptimo de reacción en la estabilización de un suelo arcilloso tratado con cal. U.A.Q. Querétaro, México.
- López, L.T. Romero, Z.J.F. 2006. Métodos de prevención para viviendas sobre suelos expansivos. XXIII Reunión nacional de mecánica de suelos. SMMS, Chiapas, México.

- López, L.T. et al. 2006. Comportamiento del contenido de agua en arcillas modificadas. II Congreso Internacional de Ingeniería. U.A.Q. Querétaro, México.
- López, L.T. Hernández, Z. J.B. 2006. Estudio del comportamiento expansión-colapso en suelos. XXIII Reunión nacional de mecánica de suelos. SMMS, Chiapas, México.
- López, L.T. et al 2008. Reflexiones sobre las limitaciones predictivas de propiedades índice, respecto a comportamiento expansión-colapso de suelos arcillosos aluviales. XXIV Reunión nacional de mecánica de suelos. SMMS, Aguascalientes, México.
- Meghan, R y Karp, L. 1994. California housing damage related to expansive soils. Journal of performance of constructed facilities No. 2, USA.
- Mejoramiento masivo de suelos. 2002. Manual de construcción geotécnica. Sociedad mexicana de mecánica de suelos. Volumen I. México.
- N. Khalili; F. Geiser; G.E. Blight. 2004. Effective stress in unsaturated soils: Review with new evidence. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE , pp 115-125.
- Nenson, D. J. and Miller, J. D. 1992. Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering. Department of civil engineering Colorado State University. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- Ning Lu, M. and William J. Likos. 2006. Suction stress characteristic curve of unsaturated soil. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE , pp 131-146, Colorado, USA.
- Norma ASMT D 2216-98. Standard test method for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass.
- Norma ASTM D 2116-98a. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil.
- Norma ASTM D 2435-96. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils.
- Norma ASTM D 2487-98. Standard practice for classification of soils for Engineering purposes (Unified Soil Classification System).
- Norma ASTM D 4318-98. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- Norma ASTM D 4972-95a. Standard test method for pH of soils

- Norma ASTM D 5298-94. Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper.
- Norma ASTM D 854-98. Standard test method for specific gravity of soils
- Norma ASTM D 968-98. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (600 kN-m/m³)
- Norma ASTM D 3877-96. Standard test methods for One-Dimensional expansion, Shrinkage and Uplift pressure of soil-lime mixtures.
- Norma mexicana NMX C 430-ONNCCE 2002 "Sondeos de pozo a cielo abierto"
- Norma mexicana NMX C 431-ONNCCE 2002 "Toma de muestra alterada e inalterada" Métodos de prueba
- Norma mexicana NMX C 432-ONNCCE 2002 "Ensayo de compresión triaxial" Métodos de prueba
- Olvera, R. E.B. 2004. Manual de prácticas para el laboratorio de mecánica de suelos I. U.A.Q. Querétaro, México.
- Petrov, J. R. and Kerry, R.R. Geosynthetic clay liner (GCL) chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 34, pp 863-885.
- Petry, M. T. and Jiang, P.C. 2008. Soil suction and behavior of chemically. Journal of the Transportation Research Board. Vol. 2026, pp 30-38.
- Pierre, B. J. Experimental Soil Mechanics. 1997. Civil Engineering Department University of Southern California, Los Angeles. Prentice-Hall, Inc. USA.
- Preciado, C.H. 1998. Estudio de la influencia de las variables de compactación en las características expansivas de un suelo de Jurica, Qro. Tesis de maestría en mecánica de suelos, UAQ, Querétaro, México.
- Rafalko, D.S. Brandon, L.T. Filz, M.G. and Mitchell, K.J. 2007. Fiber reinforcement for rapid stabilization of soft clay soil. Journal of the Transportation Research Board. Vol. 2026, pp 21-29.
- Rafalko, D.S. Filz, M.G. Brandon, L.T. and Mitchell, K.J. 2007. Rapid chemical stabilization of soft clay soils. Journal of the Transportation Research Board. Vol. 2026, pp 39-46.

- Rauch, F.A. Harmon, S.J. Katz, E.L. and Liljestand, M.H. 2007. Measured effects of liquid soil stabilizers on engineering properties of clay. Journal of the Transportation Research Board. Vol. 1787, pp 33-41.
- Rico, R. A. y Del Castillo, M. H. 1992. Consideraciones sobre compactación de suelos en obras de infraestructura de transporte. IMT-SCT. Documento técnico 7. Querétaro, México.
- S.A.A. Khattab; M. AL-Mukhtar; J. M. fleureau. 2002. Effect of initial suction suction on the swelling pressure and porosity of lime stabilized clays. Unsaturated Soils, Jucá de Campos & Marinho, pp 605-609.
- Santoyo, V. E. 1998. La cal en la historia de la construcción. tgc Geotecnia. México.
- Shangyan, H. Barbour S.L. and Fredlund, D.G. 1997. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 35, pp 411-425.
- Shen, L.S. Han, J. and Miura, N. 2007. Laboratory evaluation of mixing energy consumption and its influence on soil-cement strength. Journal of the Transportation Research Board. Vol. 1868, pp 23-30.
- T. Hueckel, M. Kaczmarek, and P. Caramuscio. 1997. Theoretical assessment of fabric and permeability changes in clays affected by organic contaminants. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE 34, pp 588-603.
- Trejo, M. A. 1995. Patologías de las cimentaciones sobre suelos expansivos. X Congreso panamericano de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones, Querétaro, México.
- Trejo, M.A. 1986. Soluciones constructivas de cimentaciones en suelos expansivos. Curso: cimentaciones sobre arcillas expansivas, Querétaro, México.
- Trejo, M.A. 1989. Los suelos expansivos y su problemática. Academia mexicana de ingeniería. Alternativas tecnológicas, 29 masas redondassobre los suelos expansivos y su problemática, México.
- XXI Reunión nacional de mecánica de suelos, Querétaro. 2002. Retos y oportunidades de nuevo siglo. Socieda de mexicana de mecánica de suelos. Vol. II. Querétaro, México.
- Zeevart, W. L. 1983. Problemática de parámetros en el diseño de cimentaciones, U.A.Q. Querétaro, México.
- Zepeda, G. J. A. 1989. Curso internacional de mecánica de suelos. U.A.Q., Universidad Laval (Canada). Querétaro, México.

Zepeda, G. J. A. y Flores, F. M. 2002, Expansión y compresibilidad de arcillas parcialmente saturadas. II Congreso Panamericano de enseñanza de la Mecánica de Suelos. Guayaquil, Ecuador.

Zepeda, G. J.A. et al. 2004. Mecánica de suelos no saturados. Sociedad mexicana de mecánica de suelos - U.A.Q. Querétaro, México.

ANEXOS

PROPIEDADES ÍNDICE, ARCILLA NATURAL

Propiedades Índice		
Límite Líquido =	80	(%)
Límite Plástico =	33	(%)
Índice Plástico =	47	(%)
Contracción Lineal	19	(%)
S.U.C.S.	Arcilla de alta compresibilidad (CH)	

PROPIEDADES ÍNDICE, ARCILLA-CAL

Condición	ARCILLA - CAL 2%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	58.86	60.49	55.24	62.39	40.37	53.12
LP	37.81	39.74	36.63	41.45	26.95	37.72
IP	21.05	20.75	18.61	20.94	13.42	15.40
S.U.C.S	MH	MH	MH	MH	ML	MH

Condición	ARCILLA - CAL 4%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	42.08	61.46	41.54	69.66	40.96	51.30
LP	34.51	43.33	32.91	44.59	29.78	30.55
IP	7.57	18.13	8.63	25.07	11.18	20.75
S.U.C.S	ML	MH	ML	MH	ML	MH

Condición	ARCILLA - CAL 6%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	42.39	52.44	41.34	50.86	41.13	48.42
LP	29.72	38.96	33.23	39.96	34.84	38.63
IP	12.67	13.48	8.11	10.90	6.29	9.79
S.U.C.S	ML	MH	ML	MH	ML	ML

PROPIEDADES ÍNDICE, ARCILLA-CEMENTO

Condición	ARCILLA - CEMENTO 2%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	43.41	63.00	44.90	65.53	48.62	69.49
LP	30.73	39.78	31.63	39.84	31.96	40.04
IP	12.68	23.22	13.27	25.69	16.66	29.45
S.U.C.S.	ML	MH	ML	MH	ML	MH

Condición	ARCILLA - CEMENTO 4%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	47.53	68.18	47.79	68.68	48.31	69.70
LP	36.15	45.06	35.36	42.11	34.60	39.16
IP	11.38	23.12	12.43	26.57	13.71	30.54
S.U.C.S.	ML	MH	ML	MH	ML	MH

Condición	ARCILLA - CEMENTO 6%					
	7 Días		14 Días		28 Días	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
LL	46.70	68.14	47.65	58.86	49.86	57.22
LP	33.08	35.04	34.07	37.11	36.42	41.74
IP	13.62	33.10	13.58	21.75	13.44	15.48
S.U.C.S.	ML	MH	ML	MH	ML	MH

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL TEPETATE Y LA ARCILLA

σ_{Desv} (kg/cm ²)			
Tepetate			
Remoldeada	2.10	2.30	2.50
Arcilla			
Inalterada	1.7	2.1	2.1
Remoldeada	2.2	2.6	2.9

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL TEPETATE CON CAL Y CEMENTO

Edad (Días)	Tepetate- σ_{Desv} (kg/cm ²)					
	Cal			Cemento		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
7	5.24	6.87	11.00	7.1	11.37	19.1
14	5.26	10.13	12.00	8.25	13.23	23.1
28	5.49	13.30	14.10	13.8	15.85	25.1

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LA ARCILLA CON CAL Y CEMENTO

Edad (Días)	Arcilla- σ_{Desv} (kg/cm ²)					
	Cal			Cemento		
	2%	4%	6%	2%	4%	6%
7	3.3	9.77	11.7	4.35	11.12	14
14	3.72	13	13.8	5.18	17.27	19.4
28	4.15	15.43	15.7	6.22	20.65	23.2

PERMEABILIDAD DEL TEPETATE Y ARCILLA.

Permeabilidad (cm/seg)		
Tepetate		
1.006E-04	1.009E-04	1.100E-04
Arcilla		
2.854E-06	2.854E-06	2.954E-06

PERMEABILIDAD DEL TEPETATE CON CEMENTO Y CAL.

Edad (Días)	Permeabilidad (cm/seg)		
	Tepetate-Cemento		
	2%	4%	6%
7	6.269E-04	3.893E-04	7.732E-04
14	5.591E-04	3.140E-04	7.391E-04
28	3.860E-04	2.136E-04	5.296E-04
Tepetate-Cal			
7	1.110E-04	3.450E-04	5.359E-04
14	1.394E-04	4.356E-04	5.502E-04
28	2.777E-04	5.061E-04	5.859E-04

PERMEABILIDAD DE LA ARCILLA CON CEMENTO Y CAL.

Edad (Días)	Permeabilidad (cm/seg)		
	Arcilla-Cemento		
	2%	4%	6%
7	3.754E-06	5.299E-06	6.781E-06
14	2.298E-06	4.335E-06	7.108E-06
28	1.324E-06	3.545E-06	8.711E-06
Arcilla-Cal			
7	8.869E-05	1.820E-05	7.381E-06
14	5.233E-05	3.758E-03	3.796E-03
28	1.504E-06	4.158E-02	1.127E-02

EXPANSIÓN DE LAS DIFERENTES MEZCLAS.

Ensaye	Condición	% Expansión
1	Inalterada	14.81
2		15.22
3	Compactada	25.03
4		25.60
5	2% Cemento	11.99
6		11.64
7	4 % Cemento	0.36
8		0.42
9	6% Cemento	0.10
10		0.26
11	2% Cal	11.89
12		11.52
13	4% Cal	1.09
14		0.99
15	6% Cal	0.08
16		0.10

SUCCIÓN ARCILLA-CAL

SUCCIÓN				
2% Cal				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.2878	0.2094	37.44	2.41	0.257
0.2897	0.2104	37.69	2.39	0.246
0.2936	0.2128	37.97	2.37	0.234
0.2930	0.2108	38.99	2.29	0.195
PROMEDIO:		38.02	2.36	0.232
4% Cal				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.2974	0.2094	42.02	2.05	0.113
0.3003	0.2109	42.39	2.02	0.106
0.2939	0.2085	40.96	2.14	0.137
0.2982	0.2121	40.59	2.16	0.146
PROMEDIO:		41.49	2.09	0.124
6% Cal				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.3054	0.2103	45.22	1.80	0.063
0.3082	0.2097	46.97	1.78	0.060
0.3065	0.2083	47.14	1.78	0.060
0.3097	0.2113	46.57	1.78	0.061
PROMEDIO:		46.48	1.78	0.061

SUCCIÓN ARCILLA-CEMENTO

SUCCIÓN				
2% Cem				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.287	0.2045	40.34	2.18	0.153
0.2909	0.2061	41.15	2.12	0.132
0.2958	0.2091	41.46	2.10	0.125
0.2976	0.2094	42.12	2.05	0.111
PROMEDIO:		41.27	2.11	0.129
4% Cem				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.3033	0.2076	46.10	1.79	0.062
0.3842	0.2609	47.26	1.77	0.059
0.3640	0.2483	46.60	1.78	0.061
0.3325	0.2292	45.07	1.80	0.064
PROMEDIO:		46.26	1.79	0.061
6% Cem				
Wm	Ws	w (%)	ψ (pf)	ψ (kg/cm ²)
0.3054	0.2022	51.04	1.72	0.053
0.3032	0.2017	50.32	1.73	0.054
0.3045	0.2023	50.52	1.73	0.054
0.3017	0.2013	49.88	1.74	0.055
PROMEDIO:		50.44	1.73	0.054

PERMEABILIDAD-SUCCIÓN

Condición	k Prom	ψ Prom.
	Cemento	
2%	2.46E-06	2.112
4%	4.39E-06	1.788
6%	7.53E-06	1.731
Condición	Cal	
2%	4.75E-05	2.365
4%	1.51E-02	2.095
6%	5.02E-03	1.785

EXPANSIÓN-SUCCIÓN

Condición	k Prom	ψ Prom.
	Cemento	
2%	2.46E-06	0.129
4%	4.39E-06	0.061
6%	7.53E-06	0.054
Condición	Cal	
2%	4.75E-05	0.232
4%	1.51E-02	0.124
6%	5.02E-03	0.061

ANÁLISIS DE COSTOS

ARCILLA CEMENTO 2%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	467.2	\$1.74	\$812.93
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	\$755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$4,766.98
<i>Costo Indirectos</i>				\$476.70
<i>Utilidad</i>				\$333.69
			Total	\$5,577.36
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$16,732.09

ARCILLA CEMENTO 4%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	934.4	\$1.74	\$1,625.86
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$5,579.91
<i>Costo Indirectos</i>				\$557.99
<i>Utilidad</i>				\$390.59
			Total	\$6,528.49
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$19,585.47

ARCILLA CEMENTO 6%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	1401.6	\$1.74	\$2,438.78
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$6,392.83
<i>Costo Indirectos</i>				\$639.28
<i>Utilidad</i>				\$447.50
			Total	\$7,479.62
Para una profundidad de 0.60 m.				\$22,438.85

ARCILLA CAL 2%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	467.2	\$1.28	\$598.02
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$4,552.07
<i>Costo Indirectos</i>				\$455.21
<i>Utilidad</i>				\$318.64
			Total	\$5,325.92
Para una profundidad de 0.60 m.				\$15,977.75

ARCILLA CAL 4%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	934.4	\$1.28	\$1,196.03
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$5,150.08
<i>Costo Indirectos</i>				\$515.01
<i>Utilidad</i>				\$360.51
			Total	\$6,025.60
Para una profundidad de 0.60 m.				\$18,076.79

ARCILLA CAL 6%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	m ³	16	\$6.00	\$96.00
Mezclado y homogenización del material.	m ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	1401.6	\$1.28	\$1,794.05
Compactación del material, incluye flete de agua y pipa.	m ²	20.8	\$110.00	\$2,288.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$5,748.10
<i>Costo Indirectos</i>				\$574.81
<i>Utilidad</i>				\$402.37
			Total	\$6,725.27
Para una profundidad de 0.60 m.				\$20,175.82

TEPETATE CEMENTO 2%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	419.2	\$1.74	\$729.41
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$14,149.06
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,414.91
<i>Utilidad</i>				\$990.43
			TOTAL =	\$16,554.40
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$49,663.19

TEPETATE CEMENTO 4%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	838.4	\$1.74	\$1,458.82
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$14,878.47
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,487.85
<i>Utilidad</i>				\$1,041.49
			TOTAL =	\$17,407.81
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$52,223.42

TEPETATE CEMENTO 6%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	1257.6	\$1.74	\$2,188.22
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$15,607.87
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,560.79
<i>Utilidad</i>				\$1,092.55
			TOTAL =	\$18,261.21
Para una profundidad de 0.60 m.				\$54,783.64

TEPETATE CAL 2%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	419.2	\$1.28	\$536.58
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$13,956.23
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,395.62
<i>Utilidad</i>				\$976.94
			TOTAL =	\$16,328.78
Para una profundidad de 0.60 m.				\$48,986.35

TEPETATE CAL 4%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	838.4	\$1.28	\$1,073.15
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$14,492.80
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,449.28
<i>Utilidad</i>				\$1,014.50
			TOTAL =	\$16,956.58
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$50,869.74

TEPETATE CAL 6%				
Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Importe
Costo para casa Habitación de 80 m²				
Despalme hasta una profundidad de 0.20 m.	M ³	16	\$6.00	\$96.00
Carga de material producto de la excavación.	M ³	20.8	\$35.00	\$728.00
Acarreo de material producto de la excavación	M ³	20.8	\$36.00	\$748.80
Acarreo de materiales para relleno	M ³	20.8	\$71.00	\$1,476.80
Mezclado y homogenización del material.	M ³	20.8	\$21.00	\$436.80
Cemento para estabilización	Kg	1257.6	\$1.28	\$1,609.73
Compactación del material de relleno incluye flete de pipa y agua	M ²	80	\$110.00	\$8,800.00
Cuadrilla (Albañil, Ayudante, Peón)	Jor.	1.5	755.50	\$1,133.25
<i>Subtotal</i>				\$15,029.38
<i>Costos Indirectos</i>				\$1,502.94
<i>Utilidad</i>				\$1,052.06
			TOTAL =	\$17,584.37
			Para una profundidad de 0.60 m.	\$52,753.12

SIMBOLOGÍA

μ	Micras (10^{-6})
pH	Potencial de Hidrógeno
$^{\circ}\text{C}$	Grados celsius
$^{\circ}\text{F}$	Grados fahrenheit
σ	Esfuerzo desviador
q_u	Esfuerzo desviador máximo
Δ	Cambio de altura
Å	Amstrong (10^{-10})
ω	Humedad, contenido de agua
γ_m	Peso específico de la masa del suelo
γ_d	Peso específico seco
κ	Coefficiente de permeabilidad
Ss	Densidad de sólidos
ε	Deformación unitaria
c	Cohesión
ψ	Succión del suelo, succión total
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
IP	Índice plástico
PCA	Pozo a cielo abierto
CH	Arcilla de alta compresibilidad
MH	Limo de alta compresibilidad
CL	Arcilla de baja compresibilidad
ML	Limo de baja compresibilidad
G	Grava
A	Arena
F	Finos