

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE



“Estabilización Físico-Química de Suelos Arcillosos elaborados con precursores Nano-métricos”.

TESIS

**Para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería**

Presenta:

ING. ERICK OLIVER CERVANTES GUTIÉRREZ.

**Asesor de Tesis:
Dr. José Carlos Rubio Ávalos.**

**Coasesor de Tesis:
Dr. Carlos Chávez Negrete.**



Morelia, Michoacán. Mayo de 2010.



RESUMEN

En esta investigación se probaron cuatro productos nuevos creados a través de precursores nano-métricos donde se pretendió ver qué tipo de mejoría o estabilización realizaban estos dentro de las propiedades físicas y químicas de las arcillas.

Estos productos ó también llamados estabilizantes, se aplicaron en la parte experimental basándose en la metodología de la “National Lime Association”, utilizando la norma de “Diseño y Procedimiento de ensayos de suelos estabilizados con cal”.

Para diferenciar un producto de otro durante las pruebas mecánicas, se tomó la decisión de nombrarlos Estabilizante 1, Estabilizante 2, Estabilizante 3 y Estabilizante 4. Durante el proceso de pruebas se observaron diferentes comportamientos de las mezclas donde unas tuvieron mejores resultados que otras.

El resultado final que se tuvo es que el producto nombrado como Estabilizante 1, mostró los mejores resultados mejorando las características volumétricas, de resistencia y de compresibilidad.





DEDICATORIAS

Me gustaría dedicar este proyecto de tesis a:

Dios por mostrarme en cada momento su presencia dándome paz y serenidad durante todo este tiempo, también por iluminar mi camino durante este camino largo así como la sabiduría para la toma de decisiones que he realizado en mi vida.

A mi abue Eloísa González Vásquez quien es el pilar de la familia, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi madre soportar mis errores y tenerme paciencia además, Gracias a tus consejos, por el amor que siempre me has brindado.

¡Gracias por darme la vida!

¡Te quiero mucho!

A mis Hermanos Roseline y Chistopher por hacer que me esfuerce día a día como persona de bien para poder llegar hacer un buen ejemplo para ellos, así como su apoyo y comprensión y saber que siempre está con mingo y acompañarme en todo momento.

A mi novia Nalleli por su apoyo, comprensión y empuje durante todos estos proyectos, y ser la luz que va iluminando mi vida, por apoyarme en los momentos difíciles y demostrarme que esta incondicionalmente conmigo en todo momento.

A mi familia Tíos Marielena, Salvador, Víctor Manuel, Ricardo y Griselda por estar siempre al pendiente de mi y ser mi ejemplo y aportar cada uno con cinceladas para mi formación y esperando que se sientan orgullosos de mi y espero no defraudarlos y seguir creciendo.

A mis amigos. Que gracias al equipo que formamos y al apoyo que , seguimos siendo amigos: Miguel Ángel, Oscar Rangel, Chava Fajardo, Luis Davitcito, Toño González, Mi tocaño Erik Garfias, Héctor “el bupa” y un agradecimiento especial a Carlos Erasto





AGRADECIMIENTOS

Al proyecto: 12.11 Nano-Cementos Geopoliméricos: Síntesis y Evaluación de sus propiedades ópticas y antibacteriales. Otorgado por la coordinación de la Universidad Científica de la UMSNH durante el programa de investigación 2009.

Al proyecto: MICHOACAN-2005-C01-028 con el título de “El estudio de la calidad del aire en Morelia, Zitácuaro, Uruapan y Lázaro Cárdenas del Estado de Michoacán y propuestas de remediación en caso de contaminación” es el esfuerzo conjunto de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el CONACYT, y la SEMARNAP, por el apoyo económico durante cuatro meses.

Deseo expresar mi agradecimiento a mi asesor Dr. José Carlos Rubio Avalos por el apoyo, atención y tiempo que me brindó en todo momento a pesar de sus múltiples ocupaciones así como su comprensión durante todo el proceso de la definición de la tesis.

De la misma manera, un agradecimiento al Dr. Carlos Chávez Negrete por el apoyo brindado e interés mostrado a través de todo el proceso de experimentación y su asesoramiento durante la redacción.

Mil gracias al M.A. Ing. Wilfrido Martínez Molina por su gran amistad, comprensión, respaldo y el apoyo brindado al prestarme las instalaciones del Laboratorio, ya que en él me sentí como en casa.

Agradezco a la coordinación de posgrado conformada por la Dra. Elia M. Alonso Guzmán y el Dr. Jorge Alarcón Ibarra por la colaboración durante los trámites de titulación.





Una mención especial al Dr. Eleazar Arreygue Rocha por sus consejos y apoyo desde el inicio del nuevo enfoque realizado a la tesis, ya que sin su comprensión habría sido muy difícil terminar con éxito esta tesis.

Al personal del laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” y en especial al Sr. Jaime Chora por compartir todos sus conocimientos y su experiencia y así resolver todas mis dudas que se me presentaron durante mi estancia en el laboratorio.

También un agradecimiento a la Maestría en Infraestructura del Transporte enfocada a las Vías Terrestres por el darme la oportunidad de ampliar mis conocimientos y ser un mejor Ingeniero.





OBJETIVO

Implementar nueva tecnología en materiales a base de nanotecnología, modificando la estructura molecular de las arcillas para tener un mejoramiento en su comportamiento.

Observar si estos nuevos materiales pueden funcionar como estabilizantes en suelos arcillosos de alta plasticidad ya que su composición química está hecha en base a productos alcalinos.

Realizar una comparación cualitativa y cuantitativa de las propiedades índices y mecánicas de un suelo arcilloso estabilizado con cuatro productos diferentes.

Definir un procedimiento de estabilización en base a la cantidad necesaria a emplear, es decir, los porcentajes a usar de cada uno de los estabilizantes.

Concluir en cuales propiedades mecánicas se tiene un mejoramiento y cuál de los cuatro productos es el mejor para utilizar en cualquier tipo de obra civil por construirse.





ÍNDICE

I.	Resumen	i
II.	Dedicatoria	ii
III.	Agradecimientos	iii
IV.	Objetivo	v
V.	Índice	vi
VI.	Índice de figuras	x
VII.	Índice de tablas y gráficas	xiv
1.	Introducción	1
1.1.	Definición de estabilización con cal.	3
1.2.	Efectos de la cal sobre suelos arcillosos.	5
2.	Marco conceptual	6
2.1.	¿Qué es la nanotecnología?	7
2.1.1.	Conceptos adicionales y usos	9
2.1.2.	Identificación de nanomateriales	10
2.2.	Composición de la arcilla	11
2.2.1.	El origen de los silicatos	14
2.2.2.	Formaciones arcillosas en México	16
2.2.3.	La nobleza del barro	17
2.2.4.	El árbol genealógico: los silicatos	20
2.2.5.	La estructura de las arcilla	25
2.2.6.	Grupo 1:1	28
2.2.7.	Grupo 2:1	30





2.3.	Estabilidad del suelo	37
2.3.1.	Estabilidad volumétrica.	39
2.3.2.	Resistencia	40
2.3.3.	Permeabilidad	45
2.3.4.	Durabilidad	47
2.3.5.	Comprensibilidad	48
2.4.	Efectos del agua en los minerales arcillosos	51
3.	Pruebas de laboratorio	62
3.1.	Muestreo del material	63
3.1.1.	Procedimiento.	63
3.2.	Secado, disgregado y cuarteado de muestras	64
3.2.1.	Secado.	64
3.2.2.	Disgregado.	65
3.2.3.	Cuarteo	65
3.3.	Contenido de humedad.	66
3.4.	Gravedad específica o peso específico relativo de los sólidos (ss)	68
3.4.1.	Preparación de la muestra.	68
3.4.2.	Procedimiento.	68
3.5.	Método del ph para estimar la proporción suelo-cal necesaria para la estabilización del suelo.	72
3.5.1.	Procedimiento	72
3.6.	Diseño de la mezcla estabilizar.	74
3.6.1.	Evaluación inicial del suelo	74
3.6.2.	Determinación de la demanda aproximada de cal	75
3.6.3.	Determinación del contenido de humedad óptimo y el peso específico seco máximo de la mezcla suelo-cal.	76
3.6.4.	Elaboración de los especímenes para la prueba de resistencia a la compresión no confinada (UCS).	76





3.6.5.	Curado y preparación de los especímenes para la resistencia a la compresión no confinada (UCS).	77
3.6.6.	Determinación del cambio en las características de expansión [sólo para suelos expansivos]	78
3.7.	Peso volumétrico seco máximo (compactación AASHTO)	79
3.7.1.	Procedimiento	79
3.8.	Límites de consistencia	83
3.8.1.	Preparación de la muestra	83
3.8.2.	Procedimiento de la prueba	84
3.9.	Determinación del límite plástico	86
3.9.1.	Procedimiento de la prueba	86
3.10.	Determinación del índice plástico	88
3.11.	Determinación de la contracción lineal	89
3.12.	Determinación de la contracción volumétrica	91
3.12.1.	Procedimiento de la prueba	91
3.13.	Prueba de consolidación	94
3.13.1.	Preparación del espécimen	94
3.13.2.	Procedimiento	95
3.14.	Prueba de presión de expansión	99
3.14.1.	Preparación del espécimen	99
3.14.2.	Procedimiento	100
3.15.	Prueba de compresión simple	103
3.15.1.	Procedimiento	103
3.16.	Prueba triaxial rápida	105
3.16.1.	Procedimiento	105
4.	Análisis de resultados.	108
4.1.	Muestreo del material	109
4.2.	Análisis del agua	110





4.3.	Determinación del % de estabilizante en la relación cal-suelo agua	110
4.4.	Pruebas índice	111
4.5.	Pruebas mecánicas	114
4.5.1.	Prueba proctor	114
4.5.2.	Compresión simple	116
4.5.3.	Pruebas triaxiales rápidas	118
4.5.4.	Prueba de presión de expansión	122
4.5.5.	Prueba de consolidación	123
5.	Conclusiones.	124
5.1.	Conclusiones del estabilizante 1	126
5.2.	Conclusiones del estabilizante 2	127
5.3.	Conclusiones del estabilizante 3	128
5.4.	Conclusiones del estabilizante 4	129
5.5.	Conclusiones generales	130
	Bibliografía	131
	Anexo A	135
A.1.	Pruebas de Campo	135
A.2.	Prueba Proctor	138
A.3.	Prueba de Consolidación	143





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0-1. Escala de tamaño nano.	7
Figura 0-2. Nanotubos de Carbono.	10
Figura 0-3. Hojuela de arcilla amplificada 15 000 veces. (Fernández Loaiza, 1982)	13
Figura 2-4. Borde de la hojuela amplificado 20 000 veces.	13
Figura 0-5. Depósitos arcillosos en México.	17
Figura 0-6. El tetraedro elemental o la pirámide triangular. (Domínguez J. M., 1995).	21
Figura 0-7. Estructura química de Silicio con oxígeno. (Domínguez J. M., 1995).	22
Figura 0-8. Estructura química de Sodio, Silicio, Oxígeno, Calcio, Aluminio y Potasio. (Domínguez J. M., 1995).	22
Figura 0-9. La estructura de los silicatos, o el mecano. (Domínguez J. M., 1995).	24
Figura 0-10. El anillo de seis tetraedros. (Fernández Loaiza, 1982).	25
Figura 0-11. Una lámina de tetraedros (T). (Fernández Loaiza, 1982).	26
Figura 0-12. Una hoja de octaedros (O). (Fernández Loaiza, 1982).	26
Figura 0-13. Una lámina T-O. (Fernández Loaiza, 1982).	27
Figura 0-14. Una lámina T-O-T. (Fernández Loaiza, 1982).	27
Figura 0-15. El árbol de los caolines. (Domínguez J. M., 1995).	28
Figura 0-16. La baraja de los caolines. (Domínguez J. M., 1995).	29
Figura 0-17. El árbol de las esmectitas. (Domínguez J. M., 1995).	31
Figura 0-18. Composición química de una arcilla esmectita, tipo montmorilonítica. (Domínguez J. M., 1995)	32
Figura 0-19. La composición de la lámina de T-O-T. (Domínguez J. M., 1995).	33





Figura 0-20. El árbol de las micas. (Domínguez J. M., 1995).	35
Figura 0-21. El espesor de las arcillas expandidas. (Domínguez J. M., 1995).	37
Figura 0-22. Partículas típicas de arcilla. (Fernández Loaiza, 1982). (a) Montmorilonita de 1 000 Å x 10 Å de espesor. (b) Caolinita de 10 000 Å x 1 000 Å de espesor.	52
Figura 0-23. Superficie de suelo mostrando los iones intercambiables. (Fernández Loaiza, 1982). (a) Superficie de caolinita seca + iones de sodio. (b) Superficie de montmorilonita seca + iones de sodio. (c) Hidratación de ion de sodio.	52
Figura 0-24. Partículas de suelos con agua y ion. (Fernández Loaiza, 1982). (a) Montmorilonita sódica. (b) Caolinita sódica.	52
Figura 0-25. Superficies de las partículas con agua e iones. (Fernández Loaiza, 1982).	53
Figura 0-26. Partículas con las capas dobles.	55
Figura 0-27. Sustitución de iones intercambiables. (Fernández Loaiza, 1982).	57
Figura 0-28. Efectos de los cambios en las propiedades del sistema de doble capa.	58
Figura 0-29. Sedimentos floculados. (Fernández Loaiza, 1982).	60
Figura 0-30. Estructuras de Sedimentos. (a) Floculación salina. (b) Floculación no salina.	61
Figura 0-1. Cuarteo y Disgregado del material.	65
Figura 0-2. Determinación del peso inicial de la muestra o peso húmedo.	66
Figura 0-3. Horno utilizado para determinar el contenido de humedad.	67
Figura 0-4. Secado del material durante 24 horas.	67
Figura 0-5. Embudo que se utiliza para verter el material en el matraz.	69
Figura 0-6. Peso del material y agua.	70
Figura 0-7. Toma de temperatura de prueba de la muestra.	71
Figura 0-8. Peso del material en el bote a utilizar.	72





Figura 0-9. Muestras agitadas durante 30 segundos.	73
Figura 0-10. Lectura del ph-metro.	75
Figura 0-11. Mezclas de suelo-cal-agua.	76
Figura 0-12. Material compactado de donde se obtienen los especímenes.	77
Figura 3-13. Material con estabilizante envuelto para su curado durante 7 días.	78
Figura 0-14. Material arcilloso después del secado y cuarteado	79
Figura 0-15. Material arcilloso al adicionarle el agua.	80
Figura 0-16. Características del pisón y molde	81
Figura 0-17. Compactación con el pisón aplicando 25 golpes para cada capa.	81
Figura 0-18. Material saturado con agua, para su posterior reposo por 24 horas.	83
Figura 0-19. Muestra de arcilla después de homogeneizarla con la espátula.	84
Figura 0-20. Material arcilloso en la Copa Casagrande después de pasarle el ranurador.	85
Figura 0-21. Rollitos de arcilla de 3 mm de diámetro	86
Figura 0-22. Fragmentos de los rollitos de arcilla.	87
Figura 0-23. Material arcilloso en el molde llenado en 3 capas.	89
Figura 0-24. Espécimen extraído del molde después de 18 horas en el horno.	90
Figura 0-25. Arcilla en el molde después de golpearlo varias veces para que el aire atrapado suba a la superficie.	91
Figura 0-26. Espécimen obtenido después del secado al horno.	92
Figura 0-27. Molde y espécimen después de la prueba.	93
Figura 0-28. Discos porosos y base de la cápsula.	95
Figura 0-29. Equipos de consolidación.	96
Figura 0-30. Placas aplicadas para la carga.	96
Figura 0-31. Pantalla del programa de consolidación.	97





Figura 0-32. Peso del material dentro del anillo.	100
Figura 0-33. Aparato utilizado para la presión de expansión.	101
Figura 0-34. Muestra obtenida después de sacarla del horno en el que duró 24 horas.	102
Figura 0-35. Espécimen probado después de la prueba de compresión simple.	104
Figura 0-36. Equipo utilizado para las pruebas triaxiales.	106
Figura 0-37. Espécimen fallado después de la prueba.	107
Figura 4-1. Contracción Volumétrica y Lineal del Suelo sin Estabilizante.	112
Figura 0-2. Clasificación de Atterberg.	113





ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla 0-1. Arcillas esmectitas del grupo 2:1. Fórmula química	34
Tabla 0-2. Micas, fórmula química y formas estructurales	35
Tabla 0-3. Contenido de agua.	55
Tabla 0-1. Características del material en estado natural.	109
Tabla 0-2. Relación % estabilizante – suelo (norma ASTM D6276 pH 12.4)	110
Tabla 0-3. Porcentajes utilizados para cada estabilizante.	111
Tabla 0-4. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. Compresión Simple.	117
Tabla 0-5. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.3$ Kg/cm ² .	119
Tabla 0-6. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.6$ Kg/cm ² .	120
Tabla 0-7. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.9$ Kg/cm ² .	121
Gráfica 0-1. Resultados de Pruebas Índice	112
Gráfica 0-2. Resumen de Pruebas Proctor.	115
Gráfica 0-3. Peso Específico Seco – Humedad Óptima.	116
Gráfica 0-4. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Compresión Simple.	117
Gráfica 0-5. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.3$ Kg/cm ² .	119
Gráfica 0-6. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.6$ Kg/cm ² .	120
Gráfica 0-7. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.9$ Kg/cm ² .	121
Gráfica 0-8. Presión de Expansión.	122
Gráfica 0-9. Índice de Compresibilidad e Esfuerzo de Preconsolidación de Preconsolidación.	123
Gráfica 0-10. Permeabilidad.	124





INTRODUCCIÓN





Desde el punto de vista geológico, las arcillas son minerales naturales que se formaron hace varios millones de años y que reúnen las características peculiares de composición y formación relacionadas con el curso de la evolución de la Tierra. Para el artista constituyen los materiales plásticos o los pigmentos que le permiten expresar, mediante formas y composiciones de color, un estado de alma o de conciencia que puede ser bello.

Desde un punto de vista utilitario las arcillas han sido los materiales preferidos por el hombre para la manufactura de utensilios que sirven en la cocción y el consumo de sus alimentos, de vasijas de barro para almacenar y añejar el vino, de piezas finas de porcelana, así como pisos de mosaico y embaldosados.

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no se perciba, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas, como en los juguetes, en las partes de automóvil y en otros componentes que son, además, resistentes a la flama y al desgaste.

Algunos productos de alta tecnología incorporan a las arcillas en alta proporción, como los convertidores catalíticos que se utilizan en el control de emisiones contaminantes de los vehículos de motor, o bien en el papel incombustible con que se provee a los astronautas desde el accidente del Challenger o en las revistas de alta calidad.

Dentro de la ingeniería existen otras aplicaciones masivas de las arcillas minerales: los lodos de perforación de los pozos petroleros, los moldes de fundición y los catalizadores empleados en la refinación del petróleo.





Naturalmente, antes de empezar la construcción o reparación de cualquier carretera es necesario un detallado diseño, incluyendo las especificaciones de los trabajos y tomando en cuenta las condiciones climatológicas, de tráfico, **de suelos y materiales**.

1.1 DEFINICIÓN DE ESTABILIZACIÓN CON CAL.

La estabilidad aplicada en la construcción de súper carreteras puede definirse como un medio de cambio permanente de las propiedades mecánicas de suelos y materiales de base, por el marcado incremento de su resistencia y su capacidad de apoyo, así como la disminución de su sensibilidad al agua y a cambios de volumen durante los ciclos humedad-sequia.

Para alcanzar la estabilidad debe incorporarse un aditivo al suelo, y uno de los métodos que más rápido está creciendo en estabilización de suelos involucra el uso de cal. Este aditivo es particularmente efectivo con suelos de asentamiento de arcilla y agregados, con los cuales reacciona tanto química como físicamente para producir materiales de calidad para la construcción de carreteras.

Se ha abusado mucho de la palabra “cal” implicando muchas veces cualquier tipo de material calcáreo. Sin embargo, de acuerdo con el diccionario Webster y su precisa definición, solo se puede referir a cal “viva” (óxido de calcio), las cuales son formas de piedra caliza calcinada (carbonato de calcio). La estabilización con cal solo abarca los productos de cal calcinada, no la piedra caliza pulverizada. Hay solo dos tipos fundamentales de cal: de alto contenido de calcio, y dolomítica (alta en magnesio). Existe muy poca diferencia (si no es que ninguna) en la efectividad de esos dos tipos de cal para estabilización, ya que ambas se han usado con éxito.





La reacción química de la cal con los suelos arcillosos tiene dos aspectos. El primero, que aglomera las partículas finas de arcilla en partículas gruesas desmenuzables (tamaños de arena y sedimentos, a través de un fenómeno llamado intercambio de base). Segundo, produce una definitiva “cementación” o acción de endurecimiento, en la cual la cal reacciona químicamente con la sílice disponible y alguna alúmina en el suelo raso (o con aditivos puzolanicos con el Fly ash) formando silicato de calcio y aluminatos. Los productos de la reacción son permanentes y la resistencia impartida a la capa estabilizada ayuda a promover la durabilidad y una mayor vida del pavimento.

En general, las reacciones de cal se facilitan en la mayoría de los suelos plásticos que contienen arcilla, ya sean arcillas de grano fino tipo grava. El rango de índice de plasticidad de dicho suelos (IP) es de 10 a 50. La única excepción podría ser los suelos orgánicos. Suelos con un IP menor a 10 no reaccionan fácilmente con la cal, si bien hay varias excepciones. En suelos con bajo IP es imperativo que al menos este presente el 15% del material menor a una malla No. 200.

Para suelos no plásticos y bajos en IP, que no responden a la cal, se requiere un segundo aditivo puzolánico, para producir la necesaria reacción cal-sílice. El Flyash, material de desecho de las plantas de calcinación de carbón, es la puzolana más comúnmente usada para este propósito. Asimismo se han usado con éxito otros materiales como cenizas de volcán y arcilla fina expandida. Bajo ciertas circunstancias algunas arcillas reactivas también pueden ser empleadas.





1.2 EFECTOS DE LA CAL SOBRE SUELOS ARCILLOSOS.

La cal cambia las características físicas de la mayoría de los suelos arcillosos, en distintos grados como sigue:

- ♦ El índice de plasticidad decae bruscamente (más de cuatro veces en algunos casos). Eso generalmente se debe a que el límite líquido disminuye, y el límite plástico se incrementa.
- ♦ El suelo se aglomera, disminuyendo substancialmente el contenido de la mezcla del suelo (partículas menores a una malla No. 40).
- ♦ La cal y el agua aceleran la desintegración (rompimiento) de los nódulos de arcilla durante el mezclado. Como un resultado del punto anterior y este, el suelo se vuelve desmenuzable y puede trabajarse fácilmente.
- ♦ La cal ayuda al secado rápido de la tierra, acelerando así la compactación.
- ♦ La contracción y el grosor característico de los suelos arcillosos se reducen notablemente.
- ♦ Después del curado, la resistencia a la compresión no confinada, se desarrolla considerablemente, en algunos casos tanto como 40 veces.
- ♦ Los valores de soporte-carga, medidos a través de varias pruebas (CBR, Triaxial, placa de asiento o valor-K) aumentan substancialmente.
- ♦ La resistencia a tensión y flexión, medida a través de diferentes pruebas (medición a la cohesión, tensión de cuarteadoras, etc.,) aumenta notoriamente.
- ♦ La capa estabilizadora de cal forma una barrera resistente al agua, la cual impide su paso por gravedad de la parte de arriba, y de humedad capilar abajo. Por lo tanto esta capa se convierte en una firme mesa de trabajo, rechazando el agua de lluvia y manteniéndose estable, por lo que se reducen las demoras de la construcción.





MARCO CONCEPTUAL





2.1 ¿QUÉ ES LA NANOTECNOLOGÍA?

Se llama nanotecnología al campo de las ciencias aplicadas y dedicadas al control, así como a la manipulación de la materia a una escala menor que un micrómetro, es decir, a nivel de átomos y moléculas (nanomateriales) (Figura 0-1).

También se pueden encontrar otras definiciones como una de Euroresidentes, en la que expone lo siguiente: La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala.

Por tanto, haciendo una síntesis de ambas definiciones, se puede concluir que se llama nanotecnología al campo de las ciencias, encargada de estudiar, diseñar, crear, sintetizar y manipular la materia, y aparatos funcionales a nano escala, medida muy pequeña, a nivel de átomos y moléculas. ^[1]

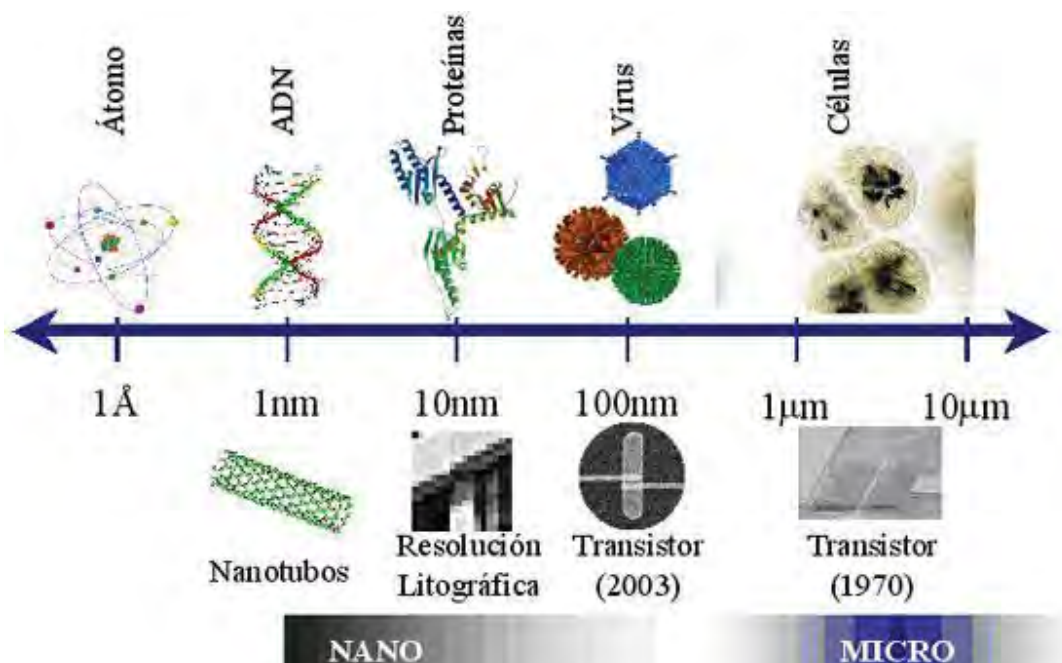


Figura 0-1. Escala de tamaño nano.





La mayoría de la gente que escucha por primera vez el término nanotecnología cree que se habla de las técnicas incluidas en el término "microtecnología", la tecnología usada en la microelectrónica y que ha transformado enormemente la sociedad en las últimas décadas. La relación no es del todo incorrecta, pero no es exacta.

La microtecnología es la tecnología que permite fabricar cosas en la escala del micrón. Un micrón es una millonésima de un metro, o, para darse una idea más clara, la milésima parte de un milímetro. Todos sabemos cuánto es un metro: más o menos la distancia entre nuestra nariz y la punta de nuestros dedos cuando extendemos del todo un brazo hacia un costado de nuestro cuerpo. Si tomamos una milésima parte de esta longitud, tenemos un milímetro. Un milímetro es muy pequeño, pero todavía podemos verlo. Ahora imaginemos que tomamos un extremo de este milímetro, lo apoyamos en nuestra nariz y lo estiramos hasta que llegue al extremo de los dedos de la mano que se encuentra en el brazo que hemos extendido. Ahora volvemos a dividir en mil partes. Tenemos una milésima de la milésima parte de un metro, una longitud llamada micrón. Esta es la escala en la que se trabaja cuando se construyen dispositivos tales como memorias, circuitos lógicos y de computación.

Un nanómetro es la medida que se obtiene si uno toma un micrón, aplica un extremo sobre la punta de la nariz, lo estira hasta el extremo de los dedos del brazo extendido y lo divide en mil partes. Es una milésima de una millonésima de metro, es decir, una milmillonésima de metro. El nanómetro marca el límite de reducción a que podemos llegar cuando hablamos de objetos materiales. En un nanómetro caben entre tres y cinco átomos. Aunque en el universo hay cosas más pequeñas que los átomos, se trata ya de cosas que no se pueden manipular. En nuestra vida cotidiana, los átomos son los ladrillos de construcción más pequeños que podemos utilizar. Ahora que estamos pensando en términos de átomos, démosle una mirada a un objeto producido por microtecnología.





Aunque la estructura tiene una millonésima de metro de ancho, sigue siendo muy grande. Hay miles de átomos en la superficie de este objeto y miles de millones en su interior. Es un trozo del macromundo. En el interior de este macroobjeto del tamaño de un micrón existe la posibilidad de hacer miles de divisiones para obtener un nivel mayor de detalle. Si logramos llegar a un nivel de detalle del orden del nanómetro y trabajamos con una precisión de nivel atómico, el poder de nuestra capacidad para controlar el comportamiento de este objeto puede hacerse inmenso.

2.1.1 Conceptos adicionales y usos

La nanociencia y la nanotecnología son nuevas herramientas para la investigación, la innovación y el desarrollo a partir del control de la estructura fundamental y el comportamiento de la materia a nivel atómico. Se utiliza para generar nuevas propiedades y usos, como: la inclusión de nanopartículas para reforzar materiales, la mejora de propiedades de materiales diseñados para trabajar en condiciones extremas, la investigación para detectar y neutralizar la presencia de microorganismos o compuestos químicos adversos.

Los nanomateriales tienen características estructurales que hace que al menos una de sus dimensiones esté en el intervalo 1 a 100 nm. Esto significa que puede haber nanomateriales 1D, 2D y 3D dependiendo de las dimensiones en que se cumple tal intervalo (o son nanométricas, según se llaman). La tecnología que más se emplea es conocida como la bottom-up (o de abajo hacia arriba) construyendo nanoentidades por combinación de elementos más pequeños (átomos y moléculas) guiando el autoensamblaje o bajo acomodos estratégicos controlados.^[2]





2.1.2 Identificación de nanomateriales

- ♦ **Nanocompuestos.** Se trata de materiales creados e introduciendo, en bajo porcentaje, nanopartículas en un material base llamado matriz. Con el resultado se obtiene materiales con propiedades distintas a las de los materiales constituyentes. Por ejemplo en propiedades mecánicas (como la rigidez y la resistencia). Los nanopolímeros son usados para relleno de grietas en estructuras afectas por sismos, por ejemplo.
- ♦ **Nanopartículas.** Se trata de partículas muy pequeñas, cuando menos una dimensión menor de los 100 nm. Las nanopartículas de silicato y las metálicas, se usan en los nanocompuestos poliméricos.
- ♦ **Nanotubos.** Son estructuras tubulares con diámetro nanométrico. Aunque pueden ser de distinto material, los más conocidos son los de silicio y principalmente, los de carbono. Son tipo canuto o de tubos concéntricos (o multicapa). Algunos están cerrados por media esfera de fullereno (o fullereno), una forma estable del carbono, del nivel siguiente al del diamante y el grafito (Figura 0-2).

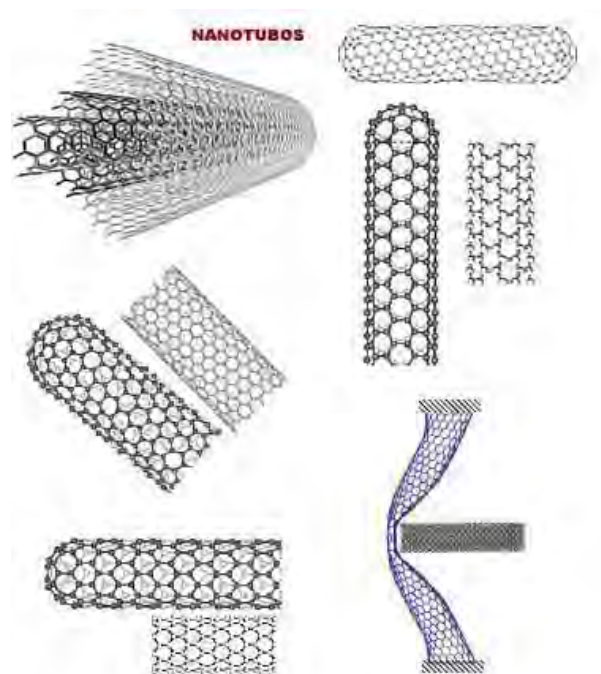


Figura 0-2. Nanotubos de Carbono.





- ♦ **Superficies nanomoduladas.** Son ordenadas o multicapa.
- ♦ **Materiales nanoporosos.** Principalmente de sílica y alúmina. Usados, por ejemplo, para captura de elementos nocivos.
- ♦ **Nanocapas.** Se trata de recubrimientos con espesores de nanoescala. Son usados en barnices, lubricantes o para endurecer compuestos frágiles o como protección ante la corrosión.
- ♦ **Nanoestructuras biológicas.** Materiales biomiméticos a escala nanométrica. Como polímeros usados como base para el crecimiento de la piel. O gomas antimicrobianas.

2.2 COMPOSICIÓN DE LA ARCILLA

Durante toda la investigación hablaremos de dos materiales importantes los cuales deberemos conocer a fondo para entender nuestra problemática por lo tanto comencemos definiendo a la arcilla.

- ♦ **El diccionario nos dice lo siguiente:** Las arcillas son las rocas blandas que se hacen plásticas al contacto con el agua, siendo frágiles en seco, y con gran capacidad de absorción. (Fernández Loaiza, 1982).
- ♦ **La Enciclopedia las define así:** La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho. (Fernández Loaiza, 1982).
- ♦ **La Enciclopedia técnica dice:** Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a 4 micras, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados (1 micra es la diezmilésima parte de un centímetro o sea la dimensión aproximada de los microbios comunes). (Fernández Loaiza, 1982).





Los sedimentos referidos en la definición anterior son aquellos minerales naturales que se han depositado en los lechos de lagos y mares por la acción de arrastre de los ríos. El material granuloso puede ser tan fino que se podría poner un gránulo en la pata de una mosca ¡sin que se entere de que lo lleva!

Con la ayuda de un microscopio óptico se podría amplificar la imagen de uno de estos granos hasta llegar a unas dos mil veces, pudiendo observar así el objeto de cuatro micras con el tamaño de un grano de arroz.

No obstante, la rugosidad y la estructura interna del grano no son observables a esos niveles de amplificación. Se necesitaría de un instrumento más poderoso: el microscopio electrónico, con el que es posible alcanzar una amplificación de unos quince mil aumentos. Así, el grano que se veía antes como un grano de arroz ahora se convierte en una hojuela con los bordes curvados hacia arriba, tal y como se muestra en la (Figura 0-3). Esta hojuela se asemeja a las placas de barro en un suelo secado, contraído y agrietado por el Sol.

Se verá que, a medida que aumenta el tamaño de la hojuela, ésta se va concentrando más y más en una pequeña porción del material, tal y como se muestra en la Figura 2-4, donde se observa el borde de la hojuela a 200,000 aumentos, es decir que ahora un centímetro de la Figura 2-4 equivale a ¡la veinteava parte de una micra, o sea a cinco millonésimas partes de un centímetro!, así, en la Figura 2-4 que, a esta escala, el borde de la hojuela parece formado por una serie de láminas apiladas una encima de la otra, dispuestas como si fueran las hojas de un libro.





Figura 0-3. Hojuela de arcilla amplificada 15 000 veces. (Fernández Loaiza, 1982)

Aún más, si se pone en contacto a la arcilla con el agua, se vería cómo las hojuelas se separan unas de otras, abriéndose, y si se secan extrayendo el agua absorbida entonces se observaría el efecto de contracción del espacio entre las láminas, ¡como si fuera un acordeón químico!

Se menciona en las definiciones precedentes que la arcilla es un silicoaluminato hidratado, es decir que desde el punto de vista químico está compuesta de silicio (**Si**), aluminio (**Al**), oxígeno (**O**) e hidrógeno (**H**). Por ello, nada más natural que comenzar el tema echando una mirada a esa familia de minerales, los silicatos, que forman el árbol genealógico de las arcillas. (Fernández Loaiza, 1982).

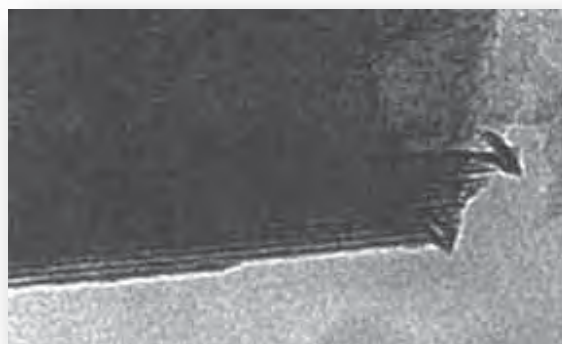


Figura 0-4. Borde de la hojuela amplificado 20 000 veces. (Fernández Loaiza, 1982).





2.2.1 EL ORIGEN DE LOS SILICATOS

Aun con las técnicas modernas disponibles hoy en día, el conocimiento que tenemos de la corteza terrestre es muy limitado, ya que sólo se ha explorado una pequeñísima porción del casquete superficial, es decir aproximadamente los primeros cuatro kilómetros a partir de la superficie, o sea el 0.062% del diámetro terrestre (12,740 km). Sin embargo, mediante métodos indirectos, como los sismológicos, se ha logrado poner en evidencia que la estructura interna de la Tierra, a semejanza de una cebolla, está formada por capas que tienen una composición más o menos definida: así, hacia el interior de la superficie encontramos la capa llamada SIAL, situada entre los 40 y 100 km de profundidad, que es rica en sílice (SiO_2) y aluminio, es de tipo ácido y con una densidad media de 2.7. Más hacia el interior hallaremos la capa denominada SIMA, rica en hierro y magnesio pero con algunas porciones de sílice, aluminio y otros elementos, de carácter básico, más caliente y fluida que la capa SIAL.

La capa SIMA es considerada la madre directa de todas las formaciones minerales que afloraron a la superficie. Es decir, que es muy probable que las primeras rocas superficiales se hayan formado por el enfriamiento y cristalización posterior de las corrientes de magma provenientes de la capa SIMA, acarreadas por las erupciones volcánicas y enfriadas en la superficie, dando origen a las rocas básicas como los basaltos. En cambio, la afloración del material fundido proveniente de la capa SIAL, a través de las hendiduras y fallas, originó la formación de las rocas ígneas de carácter ácido: los granitos. Las segregaciones del magma caliente, su migración y su compactación posteriores, dieron origen a diversos minerales, como las cromitas, magnetitas, corindón, sienitas, mármoles y cuarcitas, entre otros. Unos más resultaron de la presión de los suelos al replegarse, como ocurrió con el grafito. (Fernández Loaiza, 1982).





La acción de los vapores y de los gases calientes sobre las primeras rocas condujo a su alteración y a la consecuente formación de mezclas finas de minerales. Estas últimas permanecieron en forma de residuos o bien fueron transportadas y depositadas en los lechos de los ríos y en los fondos marinos. El arrastre y depósito de esas mezclas finas pudo efectuarse por vía fluvial, es decir, por acción de los ríos o bien por medio de los glaciares y los vientos. El resultado fue su depósito en los lechos lacustres y marinos, lo cual produjo los yacimientos más importantes. Por lo anterior, es fácil aceptar que el 95% de la corteza terrestre está formada por silicatos. La corteza tiene una densidad media de 2.7, mientras que la densidad media de la Tierra es de 5.5, o sea que en el interior se concentran los elementos más pesados, hierro, níquel, etcétera.

La familia de los silicatos comprende la mayoría de los minerales de la corteza terrestre, incluido el cuarzo y, como veremos, su composición y estructura están relacionados directamente con la historia geológica de la Tierra, es decir, que dependen de la naturaleza de la roca madre que les dio origen, así como del ambiente a que fueron sometidos durante la etapa de arrastre o deposición.

Las arcillas son, pues, una rama de los silicatos y su formación obedecieron a tres mecanismos principales:

- ♦ Por herencia,
- ♦ Por neoformación
- ♦ Por transformación.

El primer mecanismo indica que el material arcilloso fue derivado directamente de una roca madre y es este tipo de arcillas el que predomina en los sedimentos de lagos y mares. Los otros dos mecanismos implicaron una reacción química entre varios componentes —o bien a partir de la arcilla original—, por lo que este tipo de formación requirió de mayor energía y de ciertas condiciones hidrotérmicas.





Curiosamente, estos mecanismos están relacionados con la latitud en el planeta, de modo que encontramos que el primer mecanismo fue más común en las regiones árticas, mientras que la neoformación y la transformación resultaron dominantes en los trópicos húmedos. A las arcillas que se presentan en la naturaleza como una pasta suave se les llama "lodos", mientras que aquellas que tienen la apariencia de un sólido blancuzco se les denomina *piedra lodosa* o bien *roca laminada* (en inglés: *shale*). Es importante que a los depósitos de arcilla se les nombre *arcillosos*, a fin de distinguirlos de los depósitos arenosos y además *plásticos*, a fin de diferenciarlos de las rocas ígneas. (Fernández Loaiza, 1982).

2.2.2 FORMACIONES ARCILLOSAS EN MÉXICO

Los trabajos de investigación realizados por Enciso (1968) y De Pablo (1990) indican que el territorio nacional estuvo sujeto a una gran actividad volcánica durante los periodos Oligoceno-Mioceno, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de rocas vidriosas que a su vez fueron alteradas y dieron origen a la mayor parte de las arcillas que encontramos en México.

Estas son, por lo regular, del tipo montmorillonita y sus formaciones más abundantes se localizan al norte del país, en el Estado de Durango, siendo las de Cuencamé, Velardeña, Pedriceña, Rodeo y Nazas las más conocidas y las que actualmente se encuentran en explotación. (Domínguez J. M., 1995).

También existen depósitos importantes en Puebla, en los límites de Tlaxcala y Puebla, en Chupaderos, Zacatecas, en Oaxaca, en Neutla, Guanajuato, en Huayacocotla, Veracruz y en numerosas formaciones menores localizadas en las antiguas zonas lacustres como el valle de México (Figura 0-5).





Figura 0-5. Depósitos arcillosos en México. (Domínguez J. M., 1995).

2.2.3 LA NOBLEZA DEL BARRO

Las arcillas o lodos heredados de los continentes y depositados, neoformados o transformados, en los lechos marinos, lacustres, fluviales o estuarinos, han provocado cambios espectaculares en el planeta Tierra. Que digan si no es así la formación del petróleo, la de las moléculas orgánicas prebióticas que dieron origen a la vida y la de los suelos agrícolas, sin mencionar el surgimiento de las civilizaciones que hicieron uso del barro cocido en la manufactura de su cerámica.

En efecto, la mayor parte de las cimas de los yacimientos de petróleo de las costas del Golfo de México (EUA-México) ocurren a la profundidad en la que usualmente se produce la transformación de las arcillas tipo esmectita (**E**) en las denominadas illitas (**I**). Ambas tienen la misma estructura laminar, como se verá en detalle más adelante, excepto que las segundas no son expandibles debido a las fuertes cargas electrostáticas que mantienen a las hojas ligadas. Así, la transformación de la esmectita en illita pudo haber desempeñado papel importante en la génesis del petróleo: al ser contenidas las moléculas orgánicas en el interior del espacio interlaminar de la esmectita, aquellas estaban "protegidas" de la oxidación y sujetas a un proceso de tipo catalítico que pudo haberlas convertido en petróleo, tal y como ahora lo conocemos. (Domínguez J. M., 1995).





Pero es un hecho experimental que la sustitución del silicio (**Si**) por aluminio en las hojas que componen el *acordeón químico* de la esmectita, origina un exceso de carga electrostática negativa en las hojas, de tal magnitud a escala molecular que provoca la deshidratación del potasio (**K**), el cual se encuentra comúnmente en el espacio interlaminar de las arcillas. Luego, el agua así expulsada pudo haber acarreado en su paso a los hidrocarburos formados en el interior de las arcillas, mientras que la contracción subsecuente de las hojuelas de arcilla deshidratada podría haber provocado un colapso en el material, dejando hendiduras y poros por los que pudo migrar el fluido hacia los recipientes rocosos.

Por otro lado, la estructura laminar de las arcillas permite el almacenamiento de agua en el espacio interlaminar, formando así agregados lodosos difíciles de romper. La combinación de la arcilla con la materia orgánica del suelo y algunos óxidos minerales contribuyen a la estabilidad estructural necesaria para resistir los efectos mecánicos destructivos. La porosidad interna de las hojuelas de arcilla y su carga electrostática asociada son adecuadas para la absorción de especies tales como los cationes de potasio (**K⁺**), magnesio (**Mg⁺⁺**) y amonio (**NH₄⁺**), los cuales son liberados bajo condiciones ácidas apropiadas, pudiendo ser absorbidas por las raíces de las plantas.

La acidez es provocada por una acumulación de iones de hidrógeno (**H⁺**) provenientes de compuestos químicos disueltos en el agua y acarreados por las lluvias; en ellos la concentración ácida llega a ser tal que algunos de los otros cationes atrapados por las arcillas, como los iones **Al³⁺** se disuelven rápidamente en las soluciones, pasando a las raíces vegetales y provocando efectos tóxicos en las plantas. (Domínguez J. M., 1995).

Es por ello que un suelo fértil debe estar balanceado en lo que a la acidez se refiere y el tratamiento en este caso consiste en la neutralización de la acidez mediante la agregación de compuestos alcalinos, como el carbonato de calcio.





Luego tenemos que la combinación de acidez e intercambio iónico en las arcillas del terreno es importante en el desarrollo de los suelos agrícolas. Éstos, en la actualidad, se encuentran expuestos a las contaminaciones por lluvia ácida proveniente de las zonas industriales y por los abonos químicos y plaguicidas, los cuales son absorbidos por las arcillas minerales provocando los efectos combinados de acidez e intercambio mencionados. En cualquier caso, las arcillas son las protagonistas en la formación de los suelos agrícolas y sus propiedades son determinantes para el crecimiento de los vegetales.

Por otra parte, la mineralogía del suelo es resultado de diversos factores, el clima y el intemperismo, así tenemos que en las regiones tropicales predominan los caolines mezclados con óxidos minerales (oxisoles) y los suelos negros formados por esmectitas expandibles (vertisoles) combinadas. Si la acidez es baja (**pH > 6**) el suelo arcilloso tiende a ser rico en calcio, en cambio si la acidez es alta (**pH < 6**) el aluminio tiende a ser más abundante, lo que trae efectos tóxicos para la vegetación. Otros cationes, como el amonio, los nitratos y los fosfatos, también son retenidos por las arcillas del suelo e intercambiados bajo condiciones de humedad y acidez adecuadas, siendo realmente accesibles a las plantas y representando una fuente importante de nutrientes. (Domínguez J. M., 1995).

La composición óptima del suelo debe incluir una fracción de arcilla compuesta de partículas menores a 2 micras, y una proporción mayor de sedimentos con tamaños de partícula entre 2 y 60 micras. Esta combinación parece incluir las mejores características para el cultivo y crecimiento de las raíces vegetales. Es claro, que las arcillas son los componentes del suelo que provocan la mayor influencia en su productividad.

No menos importante ha sido la interacción de las arcillas con las moléculas orgánicas.





Su afinidad por las bases orgánicas nucleicas, como la guanina, la citosina, etc., ha provocado interés creciente entre la comunidad científica que trata de atribuir un papel preponderante a los compuestos minerales de tipo laminar en la formación de las moléculas prebióticas. Otros usos de la interacción del barro (arcilla) con las moléculas orgánicas lo encontramos en la manufactura de la cerámica en la antigüedad.

Ahora que se cuenta con instrumentos analíticos poderosos y con métodos de cálculo avanzados, la sorpresa ha sido mayúscula al comprobarse que donde se esperaba encontrar una estructura simple y rígida, se tiene un arreglo complejo y flexible. Se ha venido encontrando que el horizonte llano presenta en realidad profundos abismos y montañas en lo que se refiere a la física y la química de las arcillas minerales. (Domínguez J. M., 1995).

Un tema de investigación que parecía pertenecer al pasado se descubre ahora como fuente inagotable de nuevos conocimientos y nuevas aplicaciones. Todas estas características sólo hablan de la nobleza de un material y nos dan la esperanza que con el polvo se puedan de construir y transformar grandes cosas para beneficio del hombre.

2.2.4 EL ÁRBOL GENEALÓGICO: LOS SILICATOS

No fue sino hasta el año de 1912 cuando, gracias a los físicos W. L. Bragg y M. Laue, que descubrieron las propiedades de los rayos X, fue posible desentrañar la estructura interna de los minerales. Estos son compuestos cristalinos, es decir, que a escala molecular están formados por planos y caras muy bien definidos, los cuales tienen la propiedad de dispersar los rayos X y producir así patrones de interferencia, los cuales nos proporcionan información muy valiosa sobre los arreglos cristalinos de las sustancias minerales.





Después, con el microscopio electrónico, desarrollado por primera vez por E. Ruska (1931), fue posible observar directamente los cristales minerales, su forma y su geometría. (Domínguez J. M., 1995).

Mediante las técnicas apuntadas, se sabe que los silicatos están formados por cristales regulares y, si vamos a una escala más pequeña, veríamos que estos cristales tienen a su vez una unidad básica: el tetraedro (en, griego "cuatro caras"), tal y como se ilustra en la Figura 0-6. Este es el *tabique elemental* con que podemos construir los edificios moleculares que forman a los silicatos, veamos más de cerca cómo se piensa que esto ocurre.

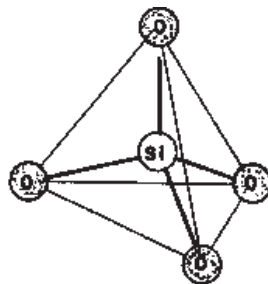


Figura 0-6. El tetraedro elemental o la pirámide triangular. (Domínguez J. M., 1995).

El tetraedro de la Figura 0-6 está compuesto por un átomo central de silicio (**Si**) y cuatro átomos de oxígeno en las esquinas (**O**).

Si cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas (Figura 0-7), es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central (**Si**), mientras que las esquinas todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva. Cuando esto último ocurre, entonces tenemos que se puede formar una cadena de tetraedros, mediante los enlaces del tipo:



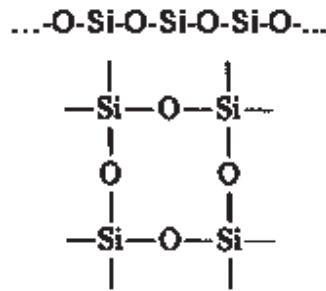


Figura 0-7. Estructura química de Silicio con oxígeno. (Domínguez J. M., 1995).

Similarmente, mediante este mecanismo podemos formar cadenas verticales que se unen a las cadenas horizontales para formar redes, de la manera siguiente: si seguimos armando este "Mecano", podemos superponer una red encima de otra, a manera de formar arreglos tridimensionales. También podemos sustituir uno de los átomos de silicio por otro, por ejemplo de aluminio (Al), con lo cual el arreglo quedaría desbalanceado, ya que el aluminio sólo tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa "extra" en uno de los átomos de oxígeno

Por ejemplo, como se observa en la Figura 0-8, la carga negativa desbalanceada puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (Na) o el potasio (K), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra.

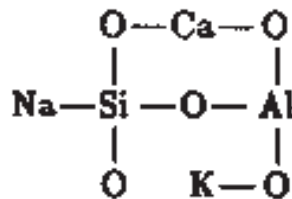


Figura 0-8. Estructura química de Sodio, Silicio, Oxígeno, Calcio, Aluminio y Potasio. (Domínguez J. M., 1995).

Existen dos reglas básicas que nos dicen cómo unir dos o más tetraedros (Reglas de Pauling):





1. La suma de las cargas negativas debe ser igual a la suma de las cargas positivas, de manera que la estructura sea eléctricamente neutra.
2. Todos los elementos con carga positiva (cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, coordinándose con ellos de modo que los arreglos coordinados dependen únicamente de los tamaños entre el catión (+) y el anión (-) respectivo. (Domínguez J. M., 1995).

Existe una tercera regla conocida como Regla de Lowenstein: No es válido enlazar dos tetraedros que tengan un átomo central de aluminio cada uno. Esto nos indica que dos tetraedros de aluminio sólo pueden enlazarse mediante otro tetraedro intermedio a base de silicio.

Siguiendo estas sencillas reglas podemos armar el mecano de manera que un tetraedro (**1T**) pueda unirse a otro para formar un arreglo tipo **2T** (dos tetraedros) o bien **3T**, etc. Así, en la Figura 0-9 se reúnen todas las posibles combinaciones de tetraedros que dan origen a una serie de vistosas geometrías, en forma de cadena simple, doble, redes de motivos hexagonales, etc. Lo más sorprendente es que cada uno de estos arreglos es típico de alguno de los silicatos minerales más conocidos.

Así vemos que el mineral circón está compuesto de tetraedros aislados (**1T**), mientras que los piroxenos por cadenas simples de un número infinito de miembros (**nT**). En particular, las redes de tetraedros que se extienden a lo largo y a lo ancho, formando hojas completas, constituyen el grupo de filosilicatos, o estructuras laminares, del que forman parte las arcillas. (Domínguez J. M., 1995).



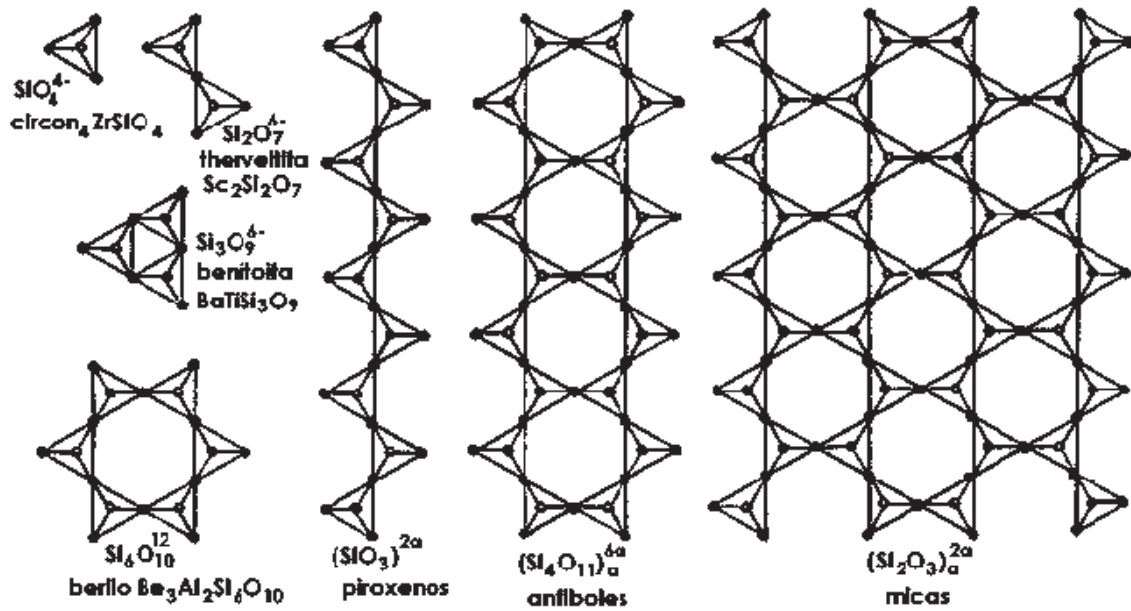


Figura 0-9. La estructura de los silicatos, o el mecano. (Domínguez J. M., 1995).

Una propiedad extraordinaria de estas estructuras es su posibilidad de ser capaces de sustituir al átomo de silicio (**Si**), situado en el centro de los tetraedros (Figura 0-6), por otro de menor carga como el aluminio (**Al³⁺**), generando así una deficiencia de carga positiva, o un exceso de carga negativa en el tetraedro, la cual necesita atraer a otros cationes para compensarse, por ejemplo **Na**, **K**, **Ca**, etc. Este es el mecanismo que permite a los silicatos tener propiedades superficiales únicas de acidez e intercambio iónico, tan importantes que a ellas se deben las propiedades catalíticas de las arcillas.

Esto es un ejemplo típico de lo que ocurre a menudo en la química, es decir, que los arreglos cristalinos, las sustituciones, etc., representan aspectos físicos, que ocurren a escala molecular, estableciendo o modificando las propiedades químicas de los materiales: fundamento de las propiedades químicas de las sustancias es la física que ocurre a escala molecular.





2.2.5 LA ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS:

Hemos visto cómo la unión de varios tetraedros nos genera hojas que se extienden a lo largo y a lo ancho, dando origen a las estructuras laminares. Veamos de cerca qué ocurre al unir los vértices para formar anillos tipo **6T** (seis tetraedros), como se muestra en la Figura 0-10. Las puntas de los tetraedros se encuentran a la misma altura, formando un plano, de igual manera ocurre con los átomos de silicio situados en el centro de los tetraedros y con los de oxígeno situados en las bases. La articulación de esos tres planos nos conduce pues a la formación de una *hoja tetraédrica* (tipo T).

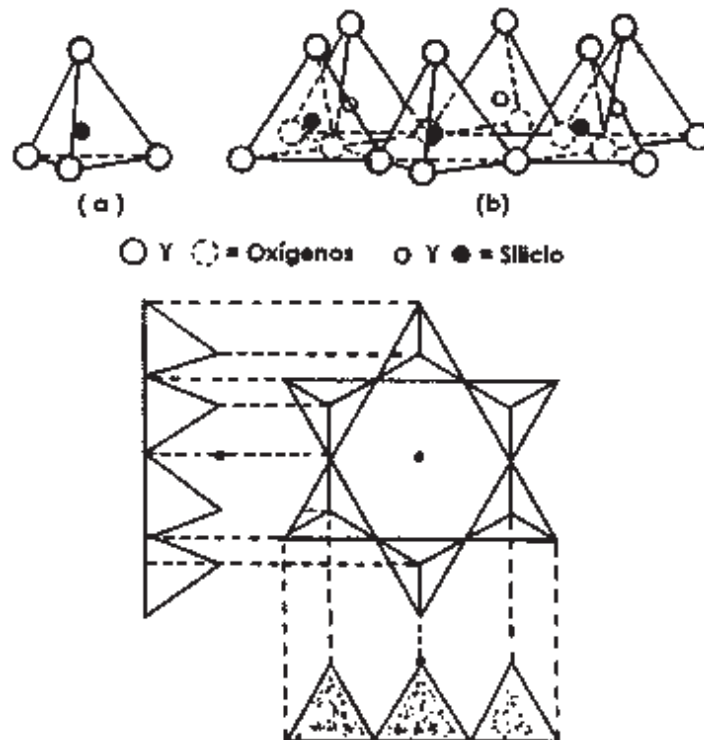


Figura 0-10. El anillo de seis tetraedros. (Fernández Loaiza, 1982).

Siguiendo esta secuencia, podemos ahora unir dos hojas para formar una *lámina tetraédrica*, tal y como se ilustra en la Figura 0-11. En ésta se observa que las dos hojas se encuentran invertidas, una con respecto a la otra, compartiendo uno de los vértices. (Fernández Loaiza, 1982).



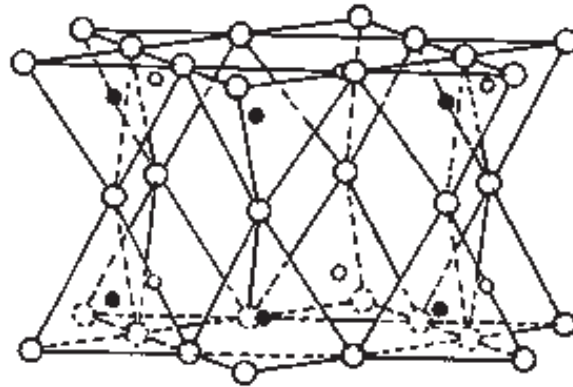


Figura 0-11. Una lámina de tetraedros (T). (Fernández Loaiza, 1982).

Similarmente, existen otros cuerpos poligonales que podemos unir entre sí para formar cadenas, tal y como ocurre con el octaedro (octa, ocho; edros, cara), representado en la Figura 0-12, formación típica de los compuestos de aluminio, por ejemplo $Al(OH)_6$, o del magnesio. Este arreglo es una *hoja octaédrica* (tipo O).

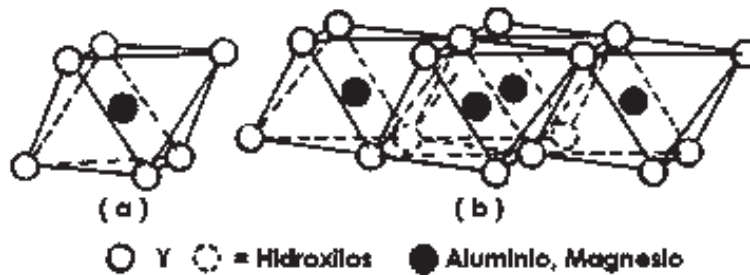


Figura 0-12. Una hoja de octaedros (O). (Fernández Loaiza, 1982).

Ahora bien, la unión de una hoja del tipo T, con otra del tipo O, genera una *lámina T-O*, o *lámina 1:1*, tal y como se ilustra en la Figura 0-13. La coincidencia, sin embargo, no es perfecta cuando se trata de hojas T formadas por silicio-oxígeno y de hojas tipo O formadas por aluminio-oxígeno-oxhidrilo, lo cual crea un efecto de esfuerzo entre las hojas que es de gran importancia para algunas de las aplicaciones de las arcillas que presentan este tipo de láminas (T-O), por ejemplo el caolín. (Fernández Loaiza, 1982).



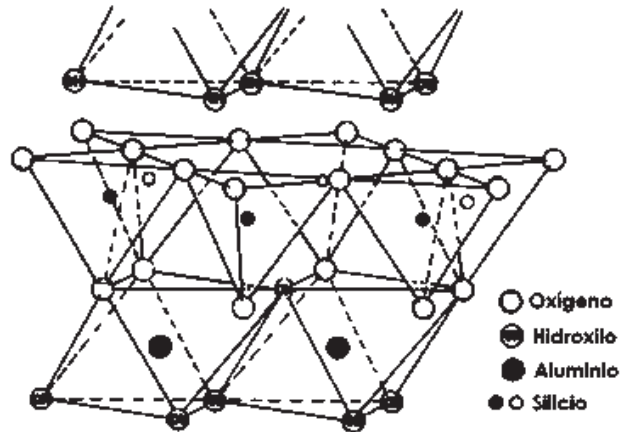


Figura 0-13. Una lámina T-O. (Fernández Loaiza, 1982).

Ahora terminamos la secuencia agregando una tercera hoja tipo **T** a la lámina **T-O** mencionada arriba y el resultado se ilustra en la Figura 0-14, que muestra la lámina **T-O-T**, o, como algunos autores la llaman: *la estructura de sandwich*, debido a que dos hojas tipo **T** se asemejan a los panes del sandwich, mientras que el jamón correspondería a la hoja tipo **O**. Esta lámina tiene pues dos hojas **T** y una hoja **O**, o sea la lámina es del tipo 2:1.

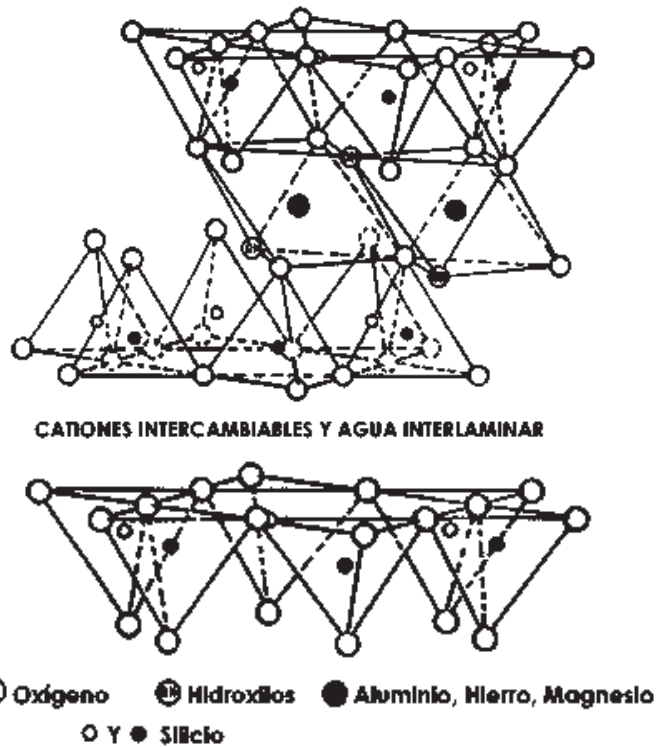


Figura 0-14. Una lámina T-O-T. (Fernández Loaiza, 1982).





Hasta aquí termina el juego del mecano, ya que la lámina **T-O-T** es la más completa y no acepta una nueva adición, debido a la saturación de los enlaces. Una cosa es clara en este punto: las estructuras de sandwich son nada menos que ¡la parte esencial de las arcillas! Por si hubiese alguna duda al respecto, pasaremos ahora a ilustrar la importancia de las estructuras formadas por las láminas tipo 1:1 y aquellas formadas por las láminas tipo 2:1.

2.2.6 GRUPO 1:1

2.2.6.1 LOS CAOLINES

El nombre caolín proviene de la voz china Kau-Ling, nombre del cerro de una región situada al norte de China de donde se extraía esta arcilla desde el siglo VIII d.C., para la fabricación de la porcelana. (Domínguez J. M., 1995).

La unidad fundamental de la estructura del caolín es la lámina **T-O**, o sea la lámina 1:1, una hoja de tetraedros de silicio-oxígeno unida a otra hoja de octaedros de aluminio-oxígeno-**OH**. La sustitución del silicio por otro elemento, como el aluminio, o bien la sustitución del aluminio en la hoja tipo **O** por otro elemento de menor carga, por ejemplo el magnesio, causa un cambio químico en el material pero mantiene esencialmente la misma estructura. Estas sustituciones dan origen a la familia de los caolines (Figura 0-15).

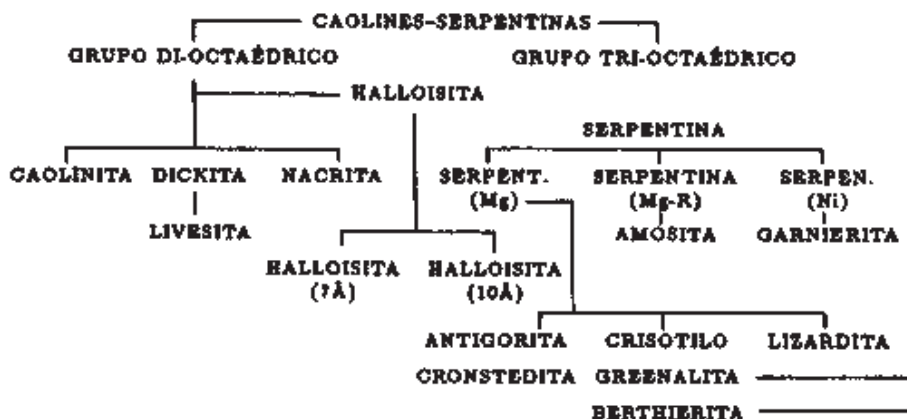
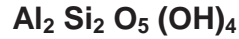


Figura 0-15. El árbol de los caolines. (Domínguez J. M., 1995).





La primera rama comprende a aquellos minerales derivados de la caolinita que guardan la misma composición química por cada unidad estructural:



Éstos son la nacrita, dickita, anauxita, halloisita y el alofano, los cuales difieren entre sí sólo por su arreglo laminar. Imaginemos un paquete de naipes en el que todas las cartas se encuentran ordenadas perfectamente: ésta es la estructura de la nacrita (Figura 0-16).

En este caso el paquete de cartas puede llegar a ser muy alto debido a que la estructura ordenada es más estable.

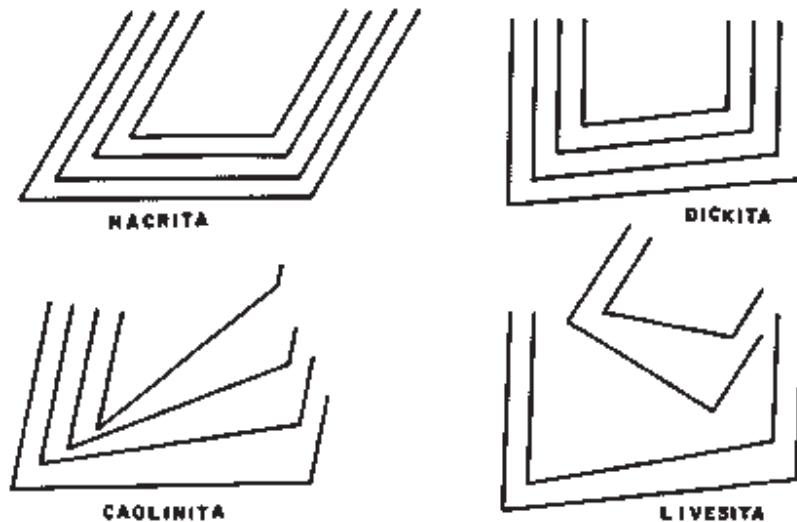


Figura 0-16. La baraja de los caolines. (Domínguez J. M., 1995).

En cambio, la dickita está dispuesta de tal manera que el paquete de naipes se abre más de un lado que del otro, entre 6 y 7 grados, mientras que la caolinita se abre hasta 15 grados.

Existe un mineral asociado (livesita) que presenta una abertura a un lado que es siempre regular, mientras que la carta siguiente se abre de forma irregular hacia el otro lado, dando origen a una estructura laminar muy desordenada y poco estable.





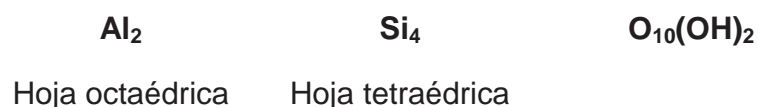
El otro grupo de caolines es igualmente importante y comprende el mismo tipo de estructura laminar, pero con una sustitución del aluminio de la hoja tipo **O** por otro catión, por ejemplo el hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}) o el magnesio (Mg^{2+}). Sin embargo, al sustituir el aluminio por el magnesio se contraen ligeramente las dimensiones de la hoja tipo **O**, originando una pequeña distorsión en la lámina **T-O**, la cual permite acomodar el esfuerzo pero ocasiona que la forma externa de los cristales de este tipo sea fibrosa o corrugada, tal es el caso de los asbestos (crisotilo) y la antigorita, respectivamente.

Una última observación: en las estructuras de estos derivados del caolín se ve que sus hojas se ensamblan naturalmente unas sobre otras, como las cartas de una baraja, con las variaciones mencionadas arriba, de modo que entre una hoja y otra hay un enlace muy débil, del tipo Van Der Waals, creando un espacio interlaminar que guarda propiedades muy interesantes, como veremos más adelante. (Domínguez J. M., 1995).

2.2.7 GRUPO 2:1

2.2.7.1 LAS ESMECTITAS

La familia de las esmectitas está formada por todas aquellas arcillas que presentan una estructura de ¡sandwich!, es decir, que está constituida por dos hojas de tipo **T** y por otra intermedia de tipo **O**. La fórmula estructural típica de estas arcillas es la siguiente:



Esta estructura es eléctricamente neutra debido a que todas las posiciones en la hoja **T** se encuentran ocupadas por átomos de silicio, mientras, que todas las posiciones de la capa **O** contienen aluminio. Ésta es la fórmula típica de la pirofilita.





Sin embargo, tal y como se muestra en la Figura 0-17, existen numerosas ramas en el árbol de las arcillas, las cuales presentan la misma estructura de sandwich, excepto que algunas veces el aluminio sustituye al silicio parcialmente en la capa **T**, o bien el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa **O**, e inclusive el flúor (**F**) pudiera sustituir al oxígeno de la capa **O**. Luego, estas diferencias de composición química hacen que las propiedades de cada arcilla mineral sean distintas. (Domínguez J. M., 1995).

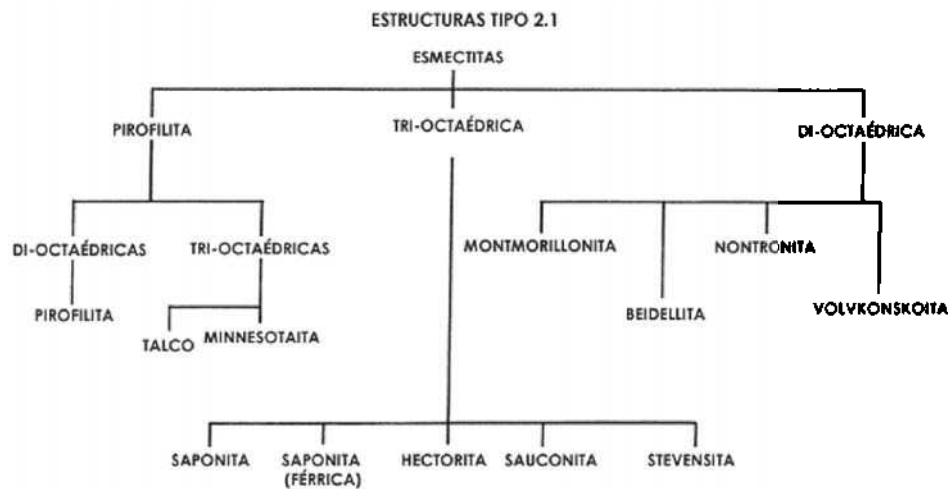


Figura 0-17. El árbol de las esmectitas. (Domínguez J. M., 1995).

Entre todas las esmectitas, la rama de las arcillas di-octaédricas presenta propiedades muy interesantes, derivadas por supuesto de su estructura laminar, de su espacio interlaminar y de la carga residual. La Figura 0-19 ilustra la composición de las láminas **T-O-T** para todas las arcillas del tipo esmectita, es decir, las láminas tipo 2:1. Entre ellas destaca la montmorillonita, cuyo nombre se deriva del francés Montmorillon, lugar de Francia en que se encontró esta arcilla típica en 1874. La composición química de una arcilla esmectita, tipo montmorillonita, es la mostrada en la Figura 0-18:



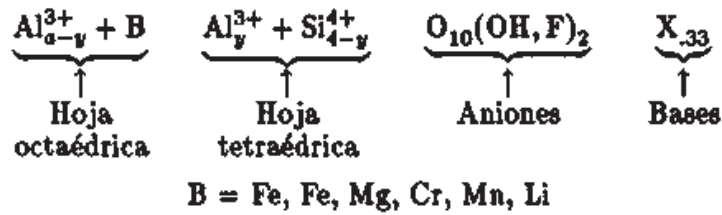


Figura 0-18. Composición química de una arcilla esmectita, tipo montmorilonítica. (Domínguez J. M., 1995)

Como se observa en esta fórmula estructural, la hoja tetraédrica está compuesta sólo de silicio y aluminio mientras que la hoja octaédrica contiene aluminio y una variedad de cationes (**B**).

Esto ilustra perfectamente la gran variedad de arcillas tipo esmectita que se pueden conseguir simplemente cambiando el catión de la hoja octaédrica y manteniendo ocupada la hoja **T** con **Si** y **Al** (Figura 0-19), para cada caso. Por supuesto, la sustitución de aluminio (**O**) y silicio (**T**) por un catión de menor carga eléctrica, por ejemplo **Mg**, origina una deficiencia de carga eléctrica que es responsable de algunas de las propiedades superficiales más importantes de las arcillas: la capacidad de intercambio, la absorción de moléculas polares como el agua, así como de otros compuestos orgánicos, por ejemplo las aminas, las cuales al introducirse en el espacio interlaminar causan el hinchamiento de la estructura laminar de las arcillas.



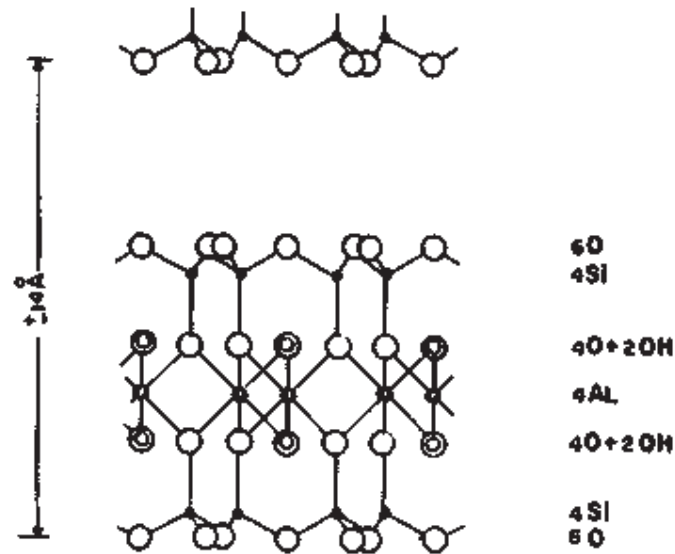


Figura 0-19. La composición de la lámina de T-O-T. (Domínguez J. M., 1995).

Debido a su afección por el agua y las moléculas orgánicas las montmorillonitas encuentran aplicaciones muy variadas que van desde la extracción de esencias naturales hasta la fabricación de catalizadores para procesar los hidrocarburos derivados del petróleo.

Los mecanismos que intervienen a escala molecular para llevar a cabo estas reacciones serán explicados en los capítulos siguientes, por ahora sólo mencionaremos que: la estructura de sandwich y el grado de sustitución catiónica determinan en gran medida las propiedades de las arcillas.

Más aún, la sustitución de cationes se lleva a cabo mediante mecanismos muy sencillos. La Tabla 0-1 muestra la fórmula estructural de las arcillas tipo esmectita, en donde podemos apreciar las sustituciones que se realizan en las hojas de cada uno de los minerales. (Domínguez J. M., 1995).





Tabla 0-1. Arcillas esmectitas del grupo 2:1. Fórmula química

Mineral	Carga	Composición (octa) (tetra) O₁₀ (OH)₂
Pirofilita	(E = 0)	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Talco	"	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Minnesotaita	"	(Fe, Mg) ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Saponita	(E ⁺ = 0.33)	Mg ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Saponita férrica	"	(Fe ²⁺ , Mg) ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Hectorita	"	(Mg _{2.6} , Li _{.33}) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Sauconita	"	(Mg, Zn) ₃ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Stevensita	(2E ⁺ = 2x)	Mg _{3-x} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Montmorillonita	(E ⁺ = 0.33)	(Al _{1.67} , Mg _{.33}) Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Beidellita	"	Al ₂ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Nontronita	"	Fe ₂ ³⁺ (Si _{3.6} , Al _{.33}) O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O
Volkonskoita	"	(Al, Fe ³⁺ , Cr) ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O

Existe otra familia de arcillas que se asemeja a la de las montmorillonitas: las vermiculitas, que tienen la misma estructura de sandwich, pero que pueden presentar un grado de sustitución mayor en la hoja octaédrica, originando una carga residual mayor que las montmorillonitas y, por eso mismo, la atracción entre las láminas es mayor también, por lo que la estructura no es tan expansible. (Domínguez J. M., 1995).

2.2.7.2 LAS MICAS

Las micas son los minerales clasificados como arcillas que tienen la misma estructura que las esmectitas, excepto que el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo el potasio, hacen que la carga residual sea muy alta. En estas condiciones, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible, ni sus cationes interlaminares intercambiables. La familia de las micas se ilustra en la Figura 0-20Figura 0-3 y la fórmula estructural en la Tabla 0-2.



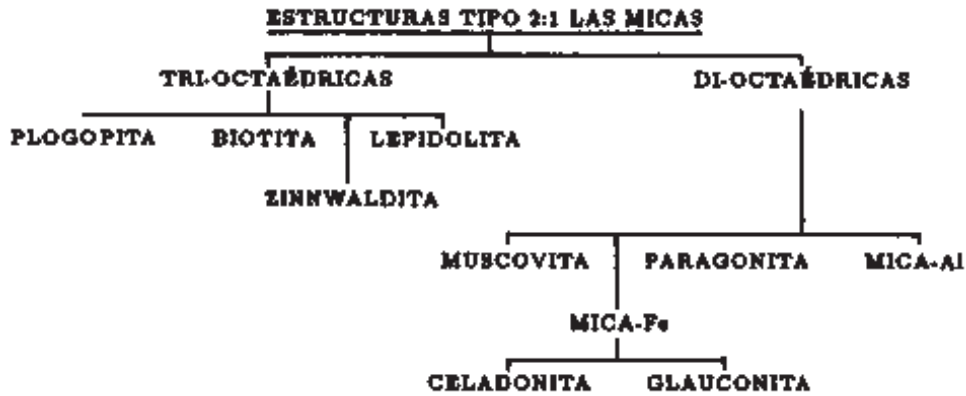


Figura 0-20. El árbol de las micas. (Domínguez J. M., 1995).

Tabla 0-2. Micas, fórmula química y formas estructurales

Mineral	Carga	Fórmula
Plogopita	($E^+ = 1$)	$KMg_3 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Biotita	"	$K (Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn)_3 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Lepidolita	"	$K (Al, Li)_3 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2$
Sinnwaldita	"	$K (Al, Li, Fe^{2+}, Fe^{3+})_3 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2$
Muscovita	"	$KAl_2 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Paragonita	"	$NaAl_2 (Si_3Al) O_{10} (OH)_2$
Mica-Al	($E^+ = 1$)	$K_x (Al, Mg)_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2 NH_2O$
Mica-Fe	($E^+ = 1$)	$KMgFe^{3+}Si_4 O_{10} (OH)_2$
Celadonita		
Mica-Fe (Glaucionita)		$K (R_{1.3}^{3+} R_{.67}^{2+}) (Si_{3.6} Al_{.33}) O_{10} (OH)_2$

En contraste con la montmorillonita, la cual tiene una deficiencia de carga localizada en el centro de los octaedros, la carga residual de las micas está localizada en la hoja tetraédrica, es decir, en la superficie misma de las hojas, originando un amarre fuerte de los cationes interlaminares con las hojas, por lo que la estructura no es fácilmente expansible. Entre las micas más conocidas se encuentran la muscovita, cuyo nombre deriva del "vidrio de Moscú", con el que se fabricaban antiguamente las ventanas de las casas de esa ciudad. (Domínguez J. M., 1995).





En resumen, las arcillas expansibles son las esmectitas, las vermiculitas y las haloisitas, que derivan esta propiedad de la concentración de carga interlaminar, por ejemplo de 0.33 unidades por cada celda unitaria, mientras que ésta es igual a 0.86 en las vermiculitas y 1.0 en las muscovitas.

La Figura 0-21 muestra los distintos espesores que se obtienen con las distintas arcillas al intercalarse una o dos capas de agua en el espacio interlaminar:

a) Pirofilita	cationes octaédricos
b) Mica	o cationes intercambiables
c) Esmectita	w capas de moléculas
d) Vermiculita	
e) Clorita	OH
f) Caolinita-serpentina	K ion de potasio
g) Haloisita (10A)	

Una cosa queda clara: los edificios moleculares que constituyen a las arcillas y el grado de sustitución logrado, permiten obtener una serie de propiedades de interés en diversos campos de aplicación. No sólo esto es cierto cuando interviene la mano del hombre al tratar de modificar el espacio interlaminar (Figura 0-21), sino que el proceso de modificación a través del intercambio con otras especies químicas ocurre naturalmente, lo que conduce a una variación constante de la naturaleza de la arcilla que se traduce en variaciones de la fertilidad del suelo, permeabilidad, etc.

Estas modificaciones del edificio molecular son susceptibles de estudiarse experimentalmente en el laboratorio y para ello es necesario introducir, ya sea un catión, ya sea una especie química distinta, en el interior del espacio interlaminar, lo cual será el tema que abordaremos enseguida. (Domínguez J. M., 1995).



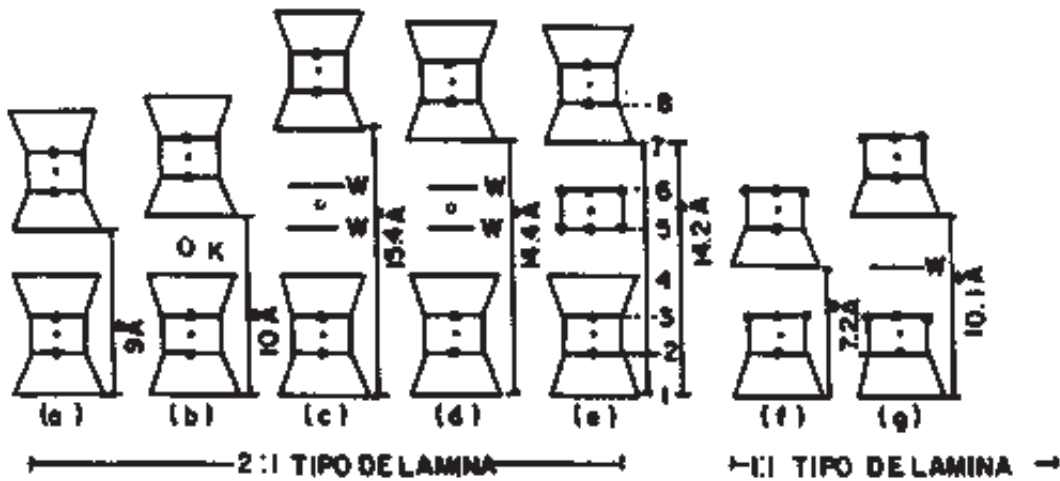


Figura 0-21. El espesor de las arcillas expandidas. (Domínguez J. M., 1995).

2.3 ESTABILIDAD DEL SUELO

Es de todos conocido la variabilidad y complejidad de los suelos. Sin embargo, debido a sus diversas utilidades, el ingeniero tiene grandes oportunidades para desarrollar sus habilidades, al utilizar a los suelos como un material ingenieril. (Del Castillo, 2008).

Desafortunadamente, en la República Mexicana existen muchos suelos que en su estado natural no son adecuados para su utilización en las obras por no reunir los requisitos especificados. En estos casos los ingenieros deberán tomar una de las tres decisiones siguientes:

- ♦ Aceptar el material tal y como esta y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad de la materia.
- ♦ Remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por un suelo de características adecuadas.





- ♦ Alterar o cambiar las propiedades del material existente de tal manera que se obtenga un material que reúna la mejor forma los requisitos impuestos, o cuando menos que la calidad obtenida será adecuada.

El objetivo del presente trabajo es considerar solamente lo que representa a la tercera decisión, es decir, que nos referimos solamente a la que se conoce como Estabilización de Suelos. La propiedad de un suelo se puede alterar de muchas formas como puede ser: por medios mecánicos, drenaje, medios eléctricos, cambios de temperatura o adición de agentes estabilizantes. Debe tenerse siempre muy presente que debido a la gran variabilidad de suelos, cada método resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos. (Del Castillo, 2008).

Desafortunadamente, en unos cuantos metros podemos tener variabilidad en los suelos, de tal manera que aplicando un cierto sistema de estabilización, este puede no ser efectivo para todos los suelos encontrados y la elección del tipo de estabilización estará gobernada por el número y tipo, así como la extensión de los suelos en los que el tipo de estabilización sea efectivo. También es indispensable reconocer que la estabilización no es una herramienta mágica que nos ayude a mejorar todas las propiedades de un suelo. Por consiguiente, se debe tener una clara apreciación de las propiedades que se desee mejorar, pues este requisito específico es un elemento muy importante para tomar la decisión correcta, a cerca de la conveniencia de la estabilización. Entre las principales propiedades de un suelo que pueden interesar a un ingeniero podemos contar a las siguientes:

- ♦ Estabilidad volumétrica
- ♦ Resistencia mecánica
- ♦ Permeabilidad
- ♦ Durabilidad
- ♦ Compresibilidad





Como posteriormente veremos, existen tratamientos mediante los cuales se pueden mejorar varias de estas propiedades en forma simultánea. Por otro lado, no debe pensarse en el uso de la estabilización solamente como una medida correctiva sino también como una medida preventiva o de seguridad contra condiciones adversas que se desarrollen durante la construcción o durante la vida de la estructura. (Del Castillo, 2008).

2.3.1 ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA.

Muchos suelos se expanden y se contraen con los cambios de humedad los cuales se pueden presentar en forma rápida o acompañando a las variaciones estacionales. Ahora bien, si las presiones de expansión que se desarrollen debido a un incremento en la humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tuberías de drenaje, etc., por lo cual es de vital importancia detectar al suelo expansivo su composición y el tratamiento más adecuado para evitar lo anterior.

Actualmente, las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y apoyar las estructuras a profundidades tales que no se registre variación estacional en la humedad. (Del Castillo, 2008).

Otro medio podría consistir en modificar la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla lo cual puede lograrse por medios químicos o térmicos. En estos casos cuando la capa a estabilizar sea pequeña deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aun susceptible de expandirse, pero tales movimientos podrían tolerarse siempre y cuando la capa estabilizada se mueva en forma uniforme.





Un medio más podría consistir en hacer que el agua se mueva más lentamente dentro de la masa expansiva mediante el sellado de sus poros o grietas. Últimamente se ha estado tratando de transformar a capas potentes de arcilla en una masa rígida mediante la inyección de productos químicos, pero se ha tenido el problema de que dichos productos penetran poco a la masa arcillosa.

Algunas veces se puede aumentar la impermeabilidad de un suelo y por ende reducir la velocidad de los cambios volumétricos en suelos expansivos, compactándolos a pesos volumétrico altos, pero debe tenerse presente que la humedad da compactación juega también un papel muy importante en el fenómeno de los cambios volumétricos. Pues si bien es cierto que una arcilla altamente densificada ofrece una alta impermeabilización, existe también la contingencia de que una vez dicha arcilla se sature alcanzará presiones de expansión más altas a medida que se haya compactado con menor humedad. Por tanto es conveniente que cuando se adopte este tipo de soluciones se tenga en cuenta también a las variaciones estacionales para comprobar así, si la impermeabilidad lograda hará que el materia no se sature durante el tiempo de lluvias. (Del Castillo, 2008).

Algunas veces se ha adoptado la solución de cubrir al suelo con membranas para reducir la posibilidad de cambio de humedad.

2.3.2 RESISTENCIA

Es del dominio común, que la resistencia de los suelos, salvo algunas excepciones, es en general más baja cuando estos se encuentran húmedos. Los suelos arcillosos al secarse alcanzan grandes resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillo. (Del Castillo, 2008).





Algunas veces sin embargo, la resistencia de un suelo es menos importante que su deformabilidad bajo carga como lo es en el caso de suelos resilientes.

En otras ocasiones se ha presentado disminuciones muy considerable en la resistencia de un suelo arcilloso debido, por ejemplo, a la disolución de cristales que conferían a la arcilla a su resistencia, como sucede con algunas arcillas sensitivas de Noruega en donde el agua de lluvia altera el equilibrio físico – químico en ellas. (Del Castillo, 2008).

Como se mencionó anteriormente, existen casos en donde la disminución de la humedad puede significar reducción en la resistencia, pues se han presentado casos de deslizamientos de tierra provocados por arcilla que se secaron y se agrietaron, provocando con ello que el comportamiento del material sea el de un suelo friccional que puede tener menor resistencia que si se considera como cohesivo a humedades mayores. La acción abrasiva del tránsito por ejemplo, puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión.

De lo anterior se concluye que al estudiar los efectos de una estabilización, debe tenerse presente el fin que se busca, ya que si el suelo estabilizado permanecerá húmedo en las condiciones de trabajo entonces la determinación de la resistencia bajo estas circunstancias sería la adecuada, sin embargo, si el suelo permanecerá seco y agrietado, probablemente sea más efectivo efectuar pruebas, con cargas repetidas para estudiar efectos de disgregación y pulverización. Para suelos de texturas abiertas y mal graduados sería más importante determinar su susceptibilidad a recomprimirse provocando con ello deformaciones en las estructuras, que sobre ellos se apoyes.





Por otro lado debe también tenerse en mente la forma como se va a utilizar al suelo, ya que si se va a emplear tal como se encuentra *in situ* puede ser más conveniente utilizara pruebas de resistencia *in situ* que en el caso de suelos remoldeados en donde las pruebas efectuadas en el laboratorio si pueden servir para estimar los parámetros de resistencia, siempre y cuando exista similitud entre lo que se hará en el campo y lo hecho en el laboratorio.

Algunas veces, sin embargo, resulta sumamente difícil tratar de incrementar la resistencia de un suelo mediante la adición de agentes estabilizantes, tal es el caso de los suelos con alto contenido de material orgánica, del orden de 10%, ya que esta inhibe la acción de tales agentes. (Del Castillo, 2008).

El incremento en el peso volumétrico, de un suelo orgánico mediante la compactación, se ha considerado, en general, como un incremento en la resistencia, pero cabe indicar que existen algunas excepciones como por ejemplo cuando se crean presiones de poro en exceso de la hidrostática.

Por otro lado, dependiendo de la humedad y energía de compactación se puede lograr diferentes características de resistencia en un suelo arcilloso, ya que un suelo de estos compactado del lado seco en la curva de compactación presenta, un comportamiento relativamente elástico y una resistencia relativamente alta; mientras que este mismo suelo compactado con una alta humedad, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso.

Este efecto se debe en general a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas, propiciando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación baja.





Por otro lado, se ha visto que en suelos finos, tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, sobre todo cuando se emplean humedades más altas que la óptima. Pues por ejemplo, la energía por impactos puede ocasionar que un suelo compactado del lado húmedo presente resistencias del orden de hasta cuatro veces menor que la resistencia que a igualdad de circunstancias, presenta el mismo suelo compactado en forma estática. La explicación a lo anterior reside en la diferente estructuración que adoptan las arcillas al ser compactadas mediante procedimientos de compactación diferentes. Algunos de los principales procedimientos para incrementar el peso volumétrico de un suelo son:

- ♦ Compactación mediante amasado, vibración o impactos.
- ♦ Vibroflotación.
- ♦ Precarga
- ♦ Drenaje
- ♦ Adición de agentes que reduzcan la fricción y cohesión entre las partículas.

Resulta un tanto evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzca cambios volumétricos, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo, como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular. Estos agentes pueden ser químicos o térmicos teniendo entre los primeros al cemento Portland y la cal como los más comunes. (Del Castillo, 2008).

Debe sin embargo, tenerse muy presente que en general el agua ablanda a los suelos cohesivos, razón que obliga a que cuando se quiera tener una resistencia que permanezca con el tiempo en suelos arcillosos, se propicie el adecuado drenaje. Algunas veces se requiere incrementar la resistencia a la deformación de un suelo o bien incrementar su capacidad de carga en forma temporal y se acude a procedimientos de electroósmosis.





El procedimiento de Vibroflotación es especialmente aplicable en la compactación de arenas o suelos con alta permeabilidad. Consiste en la inserción, en el suelo arenoso suelto, de un dispositivo vibratorio, capaz de aplicar un chiflón de agua simultánea con el vibrado, de tal manera que el encontrarse dicho dispositivo dentro del suelo inyectando agua y vibrando se produce la licuación de la arena lográndose con ello su compactación.

El incremento del peso volumétrico de un suelo arcilloso mediante precarga consiste en la colocación de una carga superficial sobre el suelo en cuestión con el objeto de preconsolidarlo. (Del Castillo, 2008).

Después de la precarga el suelo tiene todas las características deseables de un terreno preconsolidado, si se comprara con uno normalmente consolidado, es decir que es menos comprensible y más resistente, aumentándose con ello la capacidad de carga y disminuyéndose los asentamientos.

Es muy importante, sin embargo, tener presente que este método de estabilización puede requerir de periodos largos, dependiendo estos de condiciones tales como la trayectoria de drenaje, permeabilidad del suelo, espesor tales como las trayectorias de drenaje, permeabilidad del suelo, espesor de las capas, coeficientes de consolidación y grado de saturación.

El drenaje de un suelo hace que reduzca la cantidad y/o presión en el agua intersticial, lo que suele permitir el aumento del peso volumétrico de un suelo y de esta manera mejorar su resistencia. Se suelen utilizar drenes de arena verticales conjuntamente con la precarga para provocar una rápida consolidación. Sin embargo, para tener una adecuada eficiencia en los drenes verticales es necesario que la capa de suelo blando sea gruesa, ya que de esta manera la trayectoria vertical, de flujo sería muy larga; es también necesario que la permeabilidad horizontal del suelo sea varias veces mayor que la permeabilidad vertical. (Del Castillo, 2008).





El drenaje de un suelo arcilloso se mejora notablemente mediante la electrólisis, la cual consiste en la aplicación de una corriente eléctrica directa a través de un suelo saturado, de tal manera que se provoca el movimiento del agua hacia el cátodo de donde es posteriormente removida.

Si el agua removida no es reemplazada en el suelo este se consolida y aumenta su resistencia, si dicha agua es reemplazada simplemente se mantiene un flujo de agua a través de suelo con una velocidad relativamente alta, en comparación con la velocidad que se tendría drenado al suelo por gravedad.

Adicionalmente la corriente eléctrica dentro del suelo puede provocar intercambios iónicos, descomposición de sólidos procedentes de la descomposición electroquímica de los electrodos y alteración en el arreglo estructural de las partículas. A la combinación de estos 3 factores se le conoce como estabilización electro-osmótica o simplemente estabilización eléctrica. (Del Castillo, 2008).

2.3.3 PERMEABILIDAD

En los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales en dos problemas básicos como lo es el relacionado con la disposición de las presiones de poro y el relacionado con el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos en tercerías y el flujo de agua puede originar tubificaciones y arrastres.

Si se compacta un suelo arcilloso con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo el esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales.





Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirán menos permeabilidades en el suelo compactado ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse eliminándose así grandes vacíos.

Se puede reducir la permeabilidad de un suelo mediante la inyección de lechadas; sin embargo, debido a que estos productos no sellan perfectamente los poros finos, solamente se logra disminuir el gasto y la velocidad del flujo sin lograr una impermeabilidad adecuada. Algunos defloculantes como el polifosfato pueden sellar perfectamente a un suelo. (Del Castillo, 2008).

En la actualidad se cuenta también con algunos aditivos líquidos y emulsiones que al penetrar en el suelo se adhieren a las paredes de los conductores capilares haciendo que el suelo sea parcialmente hidrofóbico, pero hay que tener en cuenta que los productos “hidrófobos” generalmente hacen que la cohesión del suelo se reduzca parcial o totalmente.

El control práctico del movimiento de la humedad en un suelo establece una interesante paradoja, la cual consiste en que, en ciertas circunstancias una zona arenosa altamente permeable puede funcionar como una zona completamente impermeable si subyace a una arcilla ya que destruye los efectos de sección en ésta.

La succión o potencial capilar, es otro aspecto muy importante ligado con la permeabilidad de un suelo, pues las variaciones de la succión de un suelo originan el movimiento de la humedad de zona de baja succión a zonas de alta succión por lo cual la humedad sufre redistribuciones, hasta que se alcanza un nuevo estado de equilibrio que involucra una distribución no uniforme de la humedad.





Dos suelos diferentes que se encuentran en contacto pueden estar en un estado de humedad en equilibrio, aunque sus contenidos de agua sean diferentes. Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesario mejora su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica y en algunos casos pueden inclusive resultar contraproducentes en estos aspectos. (Del Castillo, 2008).

2.3.4 DURABILIDAD

Al igual que con todos los materiales de construcción, una condición muy deseable en los suelos estabilizados es la durabilidad, definida como la resistencia a los procesos de intemperización, erosión y abrasión. La durabilidad en caminos está relacionada con las capas superficiales de los pavimentos en la formación de baches o disgregaciones, erosiones en los taludes y cortes y cambios en la textura de los agregados de las carpetas. Ocasionalmente, sin embargo, se presentan erosiones internas profundas en los terraplenes o cortes no solo a una baja durabilidad sino también a una alta permeabilidad.

Desde luego que una baja durabilidad tiene una alta repercusión en el costo de mantenimiento, más que en fallas estructurales de consideración. En los suelos estabilizados la durabilidad baja se debe en general a un diseño deficiente que puede tener su origen en la elección de un estabilizante inadecuado, por ejemplo cuando se aplica cal hidratada con algún tipo de arcilla con la cual no reacciona favorablemente. (Del Castillo, 2008).

También puede deberse a una cantidad insuficiente de estabilizante, o a una resistencia inadecuada contra los ataques del agua o agentes químicos, por ejemplo suelos arcillosos estabilizados con cemento en zonas salinas. Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad.





Las pruebas de Intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducirse en forma eficiente el ataque a que estarán sujetos.

En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aun una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien de orden cualitativo que cuantitativo.

La durabilidad es pues uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobre diseñar, lo cual a veces puede no ser correcto. La resistencia a los efectos del tránsito puede mejorarse mucho mediante la estabilización, pero existen problemas como por ejemplo la formación de polvo suelto en caminos revestidos, en donde es difícil tener una solución económica. (Del Castillo, 2008).

En zonas en donde se quiere evitar la formación de polvo que fácilmente se levante con la acción del viento, como lo es el caso del área que circunda a las aeropistas se aplican soluciones temporales mediante riesgos asfálticos o de hule, sales o cloruro de calcio. Algunas otras veces se pueden lograr estabilizaciones más permanentes como podría ser la aplicación de riesgo de ello o bien el crecimiento de vegetación.

2.3.5 COMPRESIBILIDAD

Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades ingenieriles de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.





En el caso de arcilla saturada, si no se permite el drenaje, y se aplican esfuerzos, estos serán tomados por el agua. En el momento en que se permita el drenaje, los esfuerzos son transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo; este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como consolidación. (Del Castillo, 2008).

Ahora bien, la comprensibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente, tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poro en exceso de la hidrostática, naturaleza química del líquido intersticial, aunados a estos factores los originados por el muestreo, sensibilidad del suelo y aun la forma de ejecutar las pruebas que se utilizan para estudiar la consolidación. Es un tanto obvio que al remoldear un suelo se modifica su comprensibilidad, por lo que esta característica se puede modificar mediante procedimientos de compactación.

Se ha encontrado que la humedad de compactación tiene una gran importancia en la comprensibilidad de suelos compactados, pues si se compactan dos especímenes al mismo peso volumétrico pero uno del “lado seco” de la curva de peso volumétrico contra humedad y el otro del “lado húmedo”, se tendrá que para presiones de consolidación bajas el espécimen compactado del lado húmedo será más comprensible debido a que su estructura se encuentra más dispersa, pero para grandes presiones se tienen colapsos y reorientaciones en la estructura del espécimen que encuentra en el “lado seco” lo cual provoca que este sea ahora más comprensible. (Del Castillo, 2008)

Bajo presiones muy altas ambas muestras llegan a la misma relación de vacíos ya que se llega a una orientación similar.





Concluyendo: se tiene que en el diseño de la estabilización de un suelo se deben tener muy presente las variaciones que se esperan lograr en lo que respecta a la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, permeabilidad, durabilidad y comprensibilidad, ya que se puede presentar el caso de que el mejoramiento de alguna o algunas características en un suelo mediante la estabilización, provoca que otras características resulten en condiciones desfavorables, esto es especialmente en el caso de la estabilización mediante la compactación.

El diseño de estabilizaciones con agentes estabilizantes, consiste en primer término en llevar a cabo una adecuada clasificación del suelo con base en lo cual se determina el tipo y cantidad de agente estabilizante así como el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño obviamente depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. En la práctica se tiene sin embargo, una gran conducción en lo que respecta al diseño de las estabilizaciones, pues es difícil establecer patrones de estabilización de materiales de base, por ejemplo, cuando se tiene una gran diversidad de métodos de diseño de pavimentos. (Del Castillo, 2008).

El diseño de la estabilización de los suelos resulta aun más complicado debido a la gran dificultad que existe al tratar de juzgar adecuadamente los efectos inmediatos y permanentes que producirán en el suelo diferentes tipos de agentes; por ejemplo, un cemento Pórtland puede rigidizar a un suelo mientras que un asfalto lo hace flexible. Por otro lado la mayoría de la investigación y desarrollo de los productos estabilizantes está a cargo de los propios productores por lo que podría esperarse que estos no presentaran estudios de productos que no representan y menos aun indicar comparativamente las desventajas de sus propios productos, sino que las ocultan amparadas bajo las ventajas más sobresalientes que descubran.





En el presente trabajo se muestran algunos de los procedimientos más comunes de estabilización e indicados por Instituciones o Empresas que representan a los productos utilizados.

La elección del método de estabilización deberán quedar a cargo del Ingeniero Geotecnista, él será el único que podrá estimar la viabilidad de la estabilización con base en sus conocimientos teóricos y prácticos y no se deberá basar únicamente en la publicidad, dada a tal o cual producto sin antes haber llevado a cabo un estudio racional y detallado de la variación en las características del suelo con la aplicación de la estabilización propuesta. Debe desde luego tomarse en cuenta a la facilidad y economía con la que la estabilización pueda llevarse a cabo en el campo. (Del Castillo, 2008).

2.4 Efectos del agua en los minerales arcillosos

Aunque ya se ha mencionado algo respecto a los efectos del agua en los suelos, en lo que sigue se tratarán algunos conceptos de suma importancia relacionados con las modificaciones que sufren el mineral arcilloso al quedar en contacto con el agua.

En la Figura 0-22, se muestran dos partículas, una de montomorilonita y otra de caolinita. La primera está constituida por uno de los minerales arcillosos más pequeños y, más sensibles al agua.

En la Figura 0-23, se muestran porciones de las caras de las superficies de ambas partículas en donde se han indicado las posiciones de los iones intercambiables de sodio (Na^+) y posteriormente se dejan caer ambas partículas en agua destilada, tanto las superficies de las partículas como los iones intercambiables toman agua. Al hidratarse, el ion de sodio (Na^+) crece 7 veces su tamaño como se ilustra en la Figura 0-23. (Fernández Loaiza, 1982).





Observando las escalas gráficas se deduce que los iones de sodio hidratados son demasiado grandes para permanecer como una sola capa sobre la partícula del mineral arcilloso. Lo que sucede entonces, es que los iones intercambiables hidratados se alejan de las superficies del mineral, pero al mismo tiempo, siguen siendo atraídos hacia la superficie de la partícula.

Por otro lado, debido a sus energías térmicas los iones de sodio (Na^+) tienden a alejarse. Las dos tendencias en los iones hacen que se establezca un compromiso entre ellas de tal manera que se ubican en una cierta posición. A esto se debe que cuando se dejan caer partículas arcillosas al agua, se forma lo que se conoce como “doble capa”.

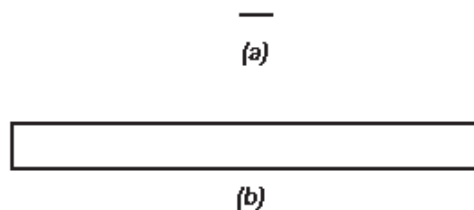


Figura 0-22. Partículas típicas de arcilla. (Fernández Loaiza, 1982). (a) Montmorilonita de 1 000 Å x 10 Å de espesor. (b) Caolinita de 10 000 Å x 1 000 Å de espesor.

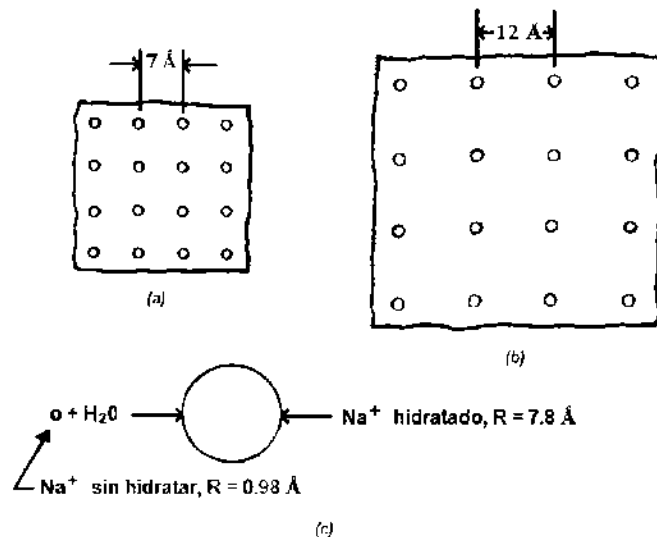


Figura 0-23. Superficie de suelo mostrando los iones intercambiables. (Fernández Loaiza, 1982). (a) Superficie de caolinita seca + iones de sodio. (b) Superficie de montmorilonita seca + iones de sodio. (c) Hidratación de ion de sodio.





En la Figura 0-24, se muestra a las partículas arcillosas con las dobles capas completamente desarrolladas suponiendo que se sumergió al suelo en agua destilada. (Fernández Loiza, 1982).

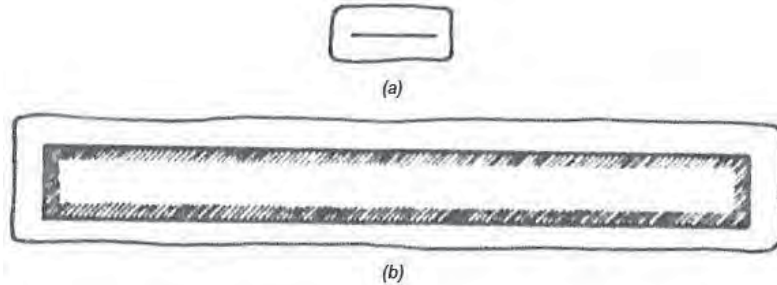


Figura 0-24. Partículas de suelos con agua y ion. (Fernández Loiza, 1982. (a) Montmorillonita sódica. (b) Caolinita sódica.

En la Figura 0-25, se muestran 3 dimensiones a las mismas secciones superficiales mostradas en la Figura 0-23. Observando en la Figura 0-25 se puede tener una idea del espaciamiento aproximado de los iones hidratados formando la doble capa.

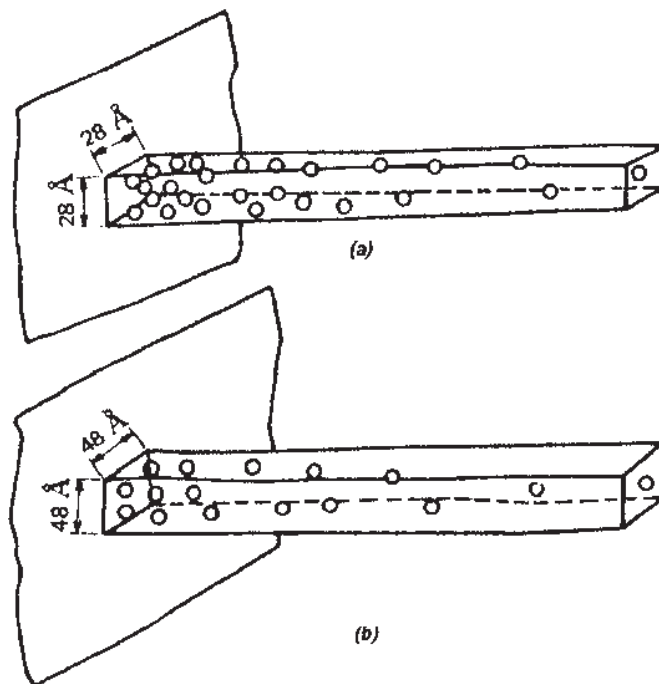


Figura 0-25. Superficies de las partículas con agua e iones. (Fernández Loiza, 1982). (a) Caolinita sódica. (b) Montmorillonita sódica.





En la Figura 0-26 (a) se ha mostrado a los iones como cargas puntuales (interpretadas por el símbolo +). En la Figura 0-26 (b) se muestran gráficamente las concentraciones de iones sodio contra su distancia a partir de la superficie de la partícula.

A una distancia de aproximadamente 400 Å que es el espesor de la doble capa, la concentración de iones sodio (Na^+) se vuelve igual a la que exista en el agua libre. En la Figura 0-26(c) se muestra la variación en el potencial eléctrico con respecto a la distancia a la partícula; siendo el potencial eléctrico el trabajo, requerido para mover una carga unitaria, desde el infinito hasta el punto en cuestión y es negativa para la superficie arcillosa. (Fernández Loaiza, 1982).

En esta forma el espesor de la doble capa es la distancia requerida, a partir de la superficie, para neutralizar la carga neta sobre la partícula, es decir, la distancia dentro de la cual se tiene potencial eléctrico. El agua en la doble capa se encuentra bajo una fuerza de atracción hacia la partícula de suelo debido a que dicha agua se encuentra unida a los iones intercambiables que a su vez se encuentran atraídos hacia la superficie de la partícula. El agua también sufre otras atracciones hacia la partícula por otras causas como son las ligas tipo hidrógeno, fuerzas Van Der Waals, etc.

Sin embargo, existe bastante controversia en lo que respecta al estado real del agua en las inmediaciones a la superficie del mineral. (Fernández Loaiza, 1982).



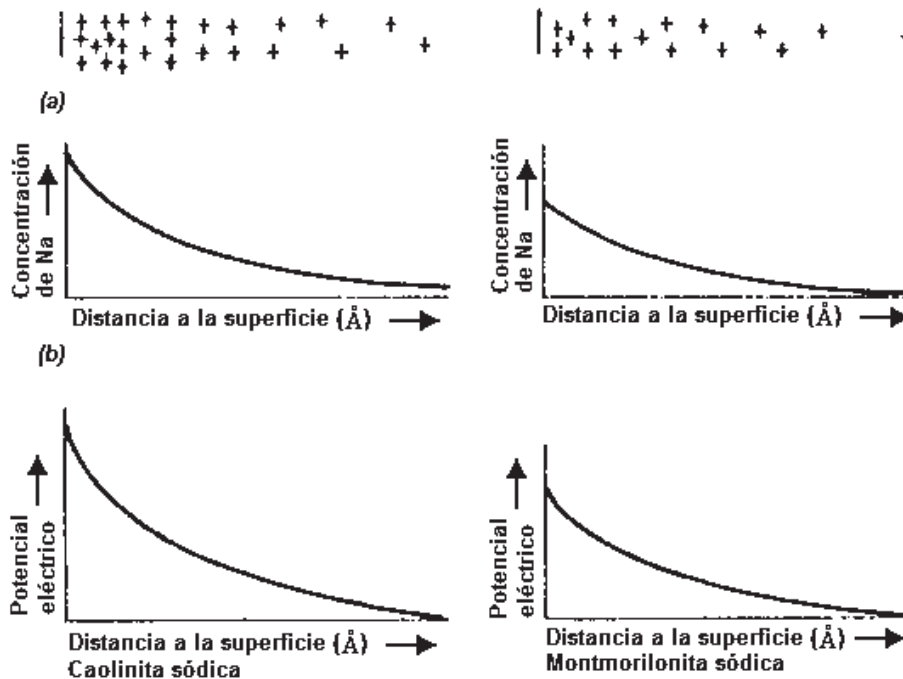


Figura 0-26. Partículas con las capas dobles.

Generalmente se reconoce que cuando menos las primeras capas moleculares se encuentran generalmente atraídas hacia la superficie del agregado. (Fernández Loaiza, 1982).

Para ilustrar la importancia de esta agua absorbida o atraída, consideremos el contenido de agua en un espesor de 5 Å alrededor de la partícula y veamos la Tabla 0-3.

Tabla 0-3. Contenido de agua.

Partícula	Área específica cm ² /gr	Contenido de agua en un capa de 5 Å (%)
Arena 0.1 mm	0.03	1.5 x 10 ⁻⁴
Caolinita	10	0.5
Ilita	100	5.0
Montmorilonita	1000	50.0





La tabla anterior es una aproximación burda, ilustrando solamente tendencias. Pero en ella se ve la gran importancia que tiene el tamaño de la partícula en la cantidad de agua que puede ligarse a ella. Existen ciertos minerales arcillosos que pueden inmovilizar una cantidad de agua relativamente grande. Uno de sales minerales en la halloisita que tiene una estructura cristalina similar a la caolinita pero con sus unidades de diferente forma y más aleatoriamente empacadas, las cuales pueden ser separadas por una sola capa molecular de agua, un aspecto particular de la halloisita es que esta presenta forma tubular contra la forma plana que presentan las partículas de caolinita.

Debido a que la halloisita presenta una habilidad especial para absorber agua los suelos que contengan dicha halloisita pueden existir presentando un contenido de agua muy alto y pesos volumétricos bajos. (Fernández Loaiza, 1982).

En las discusiones precedentes, se ha seleccionado al sodio como al ion intercambiable. Estos iones adsorbidos al suelo pueden ser intercambiados, según se ilustra en la reacción simbólica mostrada en la Figura 0-27. La adición de cloruro de calcio al sistema suelo-agua resulta en la sustitución de los iones sodio (Na^+) por iones de calcio (Ca^{2+}).

La naturaleza del ion intercambiable que se encuentre sobre la partícula de suelo tiene una importancia decisiva en el comportamiento del mismo. Una reacción como la mostrada en la Figura 0-27, tiene como resultado la depresión de la doble capa alrededor de la partícula, lo que a su vez afecta a las propiedades de la masa constituida por la partículas. Existen principios generales que controlan a la velocidad y, dirección de las reacciones de intercambio; dichos principios involucran a la valencia de los cationes intercambiados, concentración de cationes, etc. (Fernández Loaiza, 1982).



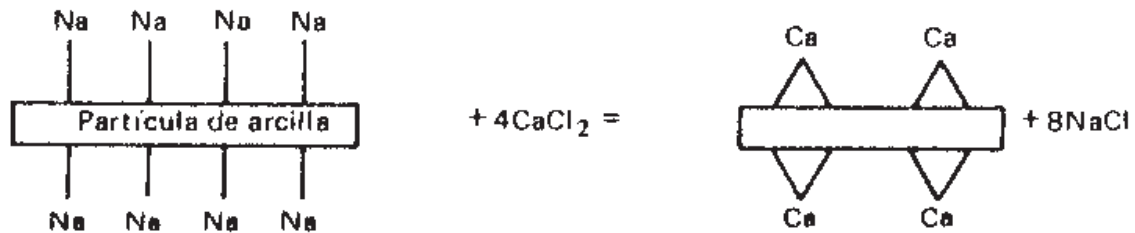


Figura 0-27. Sustitución de iones intercambiables. (Fernández Loaiza, 1982).

Si se tiene dos partículas de arcilla las cuales se encuentran muy separados y tratamos de acercarlas, se alcanzaran un espaciamiento entre las partículas tal, que se comenzaran a ejercer fuerzas entre ellas. Debido a que cada partícula presenta una carga neta relativa, las dos partículas se repelaran debido a fuerzas coulombica entre ellas. A esta fuerza se le designa como R' . Esta repulsión debida al acercamiento de partículas arcillosas es semejante a la existente entre dos imanes cuando se trata de acercar a polos semejantes.

Debido a que la carga negativa en una partícula arcillosa se encuentra balanceada por los cationes de la capa doble, las dos partículas comenzaran a repelerse cuando las dos capas dobles queden en contacto una con respecto a la otra. La fuerza repulsiva entre las dos partículas adyacentes, para cualquier espaciamiento dado, se relaciona por consiguiente con los tamaños de la doble capa de las dos partículas y cualquier cambio en el sistema suelo—agua que reduzca el espesor de la doble capa, reduce esta fuerza repulsiva para el mismo espaciamiento interpartícula. (Fernández Loaiza, 1982).

La Figura 0-28, ilustra la influencia de varias características del sistema sobre el potencial eléctrico, y por son siguiente R' a cualquier distancia "x" a partir de la superficie de la partícula. Adicionalmente a las fuerzas de repulsión R' que se presentan al acercar la partículas, se presentan también componentes de atracción, del tipo de Van Der Waals o de valencia secundaria, a las que se designará como A' .





Estas fuerzas de atracción entre las partículas son esencialmente independientes de las características existentes entre las partículas. (Fernández Loiza, 1982).

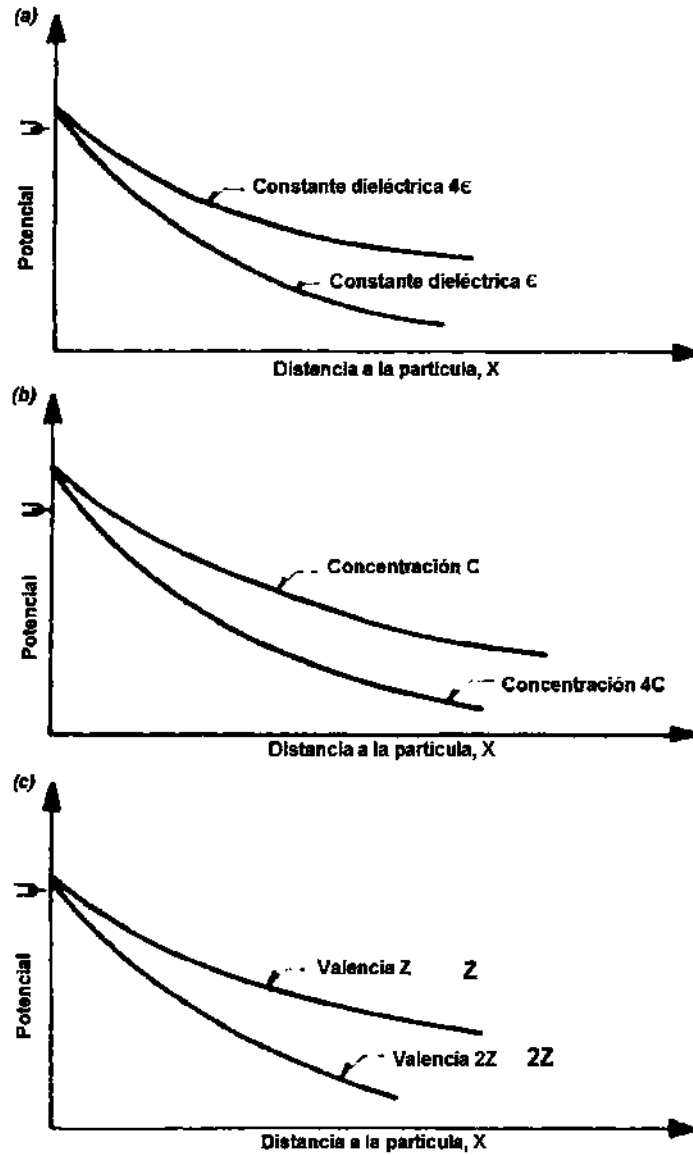


Figura 0-28. Efectos de los cambios en las propiedades del sistema de doble capa. (a) Variación en la concentración. (b) Variación en la valencia. (c) Variación en la constante dieléctrica. (Fernández Loiza, 1982).

Si el efecto neto de las fuerzas de atracción y repulsión son fuerzas de atracción, las dos partículas tenderán a acercarse y se unirán.





Debido a que la componente de repulsión depende en gran forma de las características del sistema y la componente de fuerza atractiva no depende tanto de dichas características, se pueden producir una tendencia hacia la floculación o dispersión debido a la alteración en las características del sistema, las cuales el espesor de la doble capa, se presenta una tendencia hacia la floculación causada por el incremento de una o más de las siguientes causas. (Fernández Loaiza, 1982).

- ♦ Concentración en el electrolito.
- ♦ Valencia de los iones
- ♦ Temperatura

O decremento de una o más de las siguientes causas:

- ♦ Constante dieléctrica
- ♦ Tamaño del ion hidratado
- ♦ pH
- ♦ Adsorción de aniones

La mayoría de los efectos de la variación en las características del sistema agua—suelo sobre la tendencia hacia la floculación o dispersión se puede demostrar introduciendo una suspensión de suelo dentro de un tubo de ensaye y posteriormente cambiando las mencionadas características empleando el mismo peso de suelo, como se ilustra en la Figura 0-29.

Conviene sin embargo, tener presente que se pueden presentar otros tipos de fuerzas eléctricas que en ocasiones son muy importantes cuando el espaciamiento entre las partículas decrece hasta distancias muy pequeñas tales como las que se presentan en los suelos arcillosos. Una de tales fuerzas es la debida a la carga positiva que se puede presentar en los bordes de las partículas. Esta carga es en realidad pequeña en comparación con la carga neta negativa debida a la sustitución isomorfa y en consecuencia juega un rol secundario cuando las partículas se encuentran a una separación de varios cientos de angstroms. (Fernández Loaiza, 1982).





Sin embargo, al acercar a las partículas, la carga positiva en los bordes puede provocar uniones del tipo electrostático de los bordes de unas partículas con las cargas de otras. En la Figura 0-29, los sedimentos floculados consiste en el sedimento, que se repelen, podrían empacarse en forma eficiente como los naipes de una baraja.

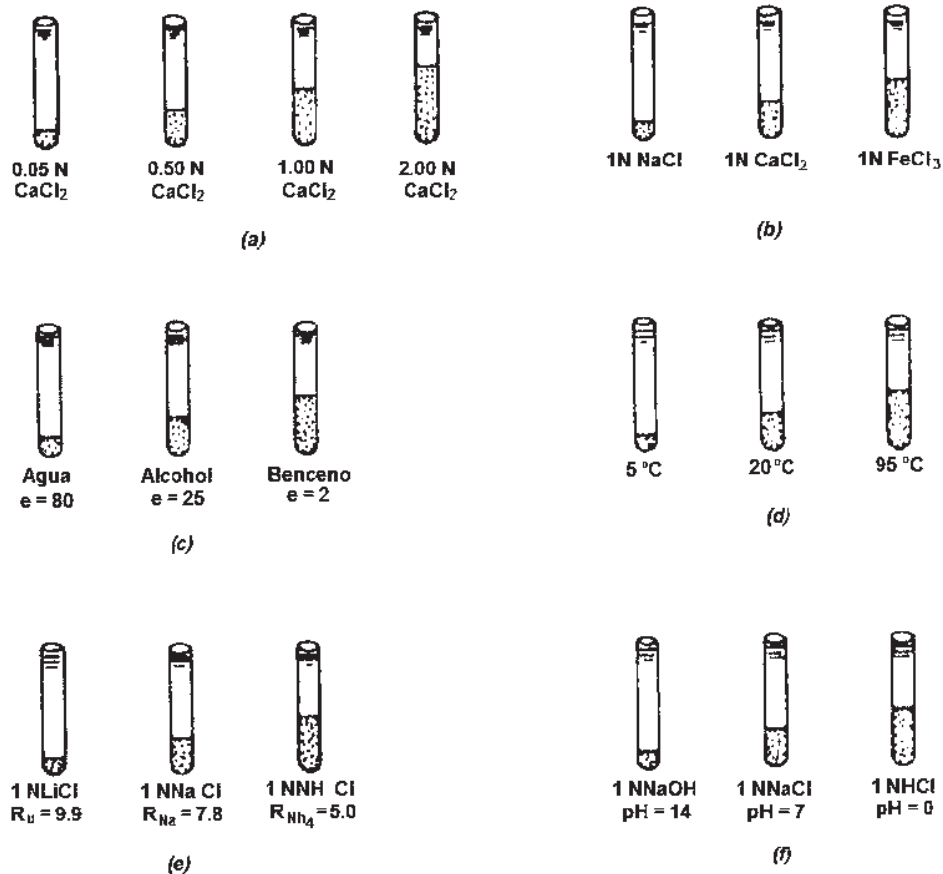


Figura 0-29. Sedimentos floculados. (Fernández Loiza, 1982).

En la Figura 0-30, se ilustran arreglos en las partículas de un suelo sedimentado. Cuando se tiene la presencia de sal se presenta un cierto grado de paralelismo entre las partículas adyacentes debido a que la atracción es de tipo de valencia secundaria. Cuando no se tiene la presencia de la sal se presenta el contacto de bordes con caras; las partículas tienden a ser perpendiculares entre sí debido a que las atracciones son electrostáticas.





Por último la estructura dispersa muestra las partículas en arreglos paralelos. (Fernández Loiza, 1982)

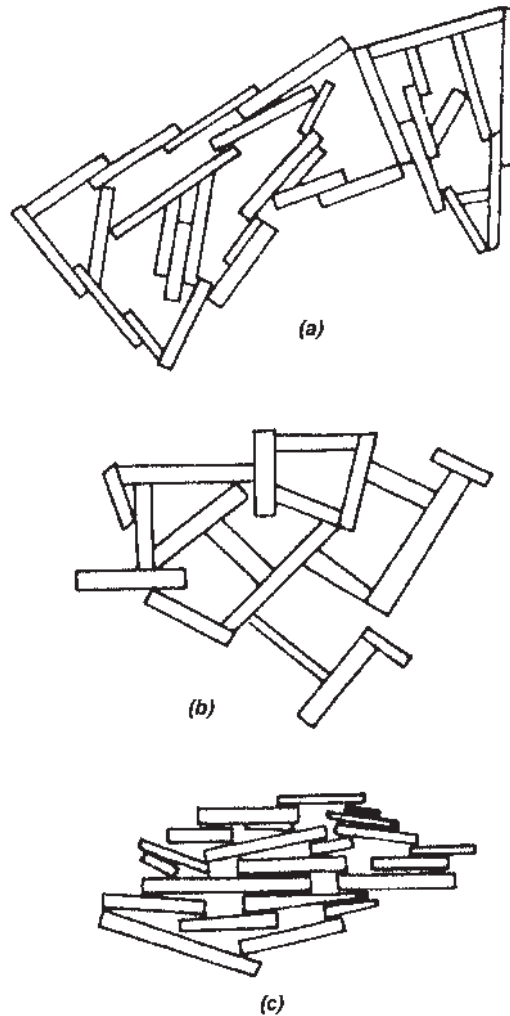


Figura 0-30. Estructuras de Sedimentos. (a) Flocculación salina. (b) Flocculación no salina. (c) Dispersión. (Fernández Loiza, 1982)

Es muy importante mencionar que frecuentemente los suelos contienen compuestos minerales amorfos (por ejemplo sílice y alumina amorfos) que son fácilmente atacables por ciertas sustancias para producir cambios químicos. Si tales sustancias son contenidas, por ejemplo, en el agua de mezclado de los suelos, tales cambios se producirán y es necesario que el proyectista de una estabilización conozca tales cambios para obtener un mayor éxito. (Fernández Loiza, 1982).





PRUEBAS DE LABORATORIO





3.1 MUESTREO DEL MATERIAL

Se realiza de acuerdo a la norma M-MMP-1-01/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). Se realiza el muestreo que consiste en obtener una porción representativa del material con el que se pretende construir una terracería o bien del material que ya forma parte de la misma. El muestreo incluye además las operaciones de embase, identificación y transporte de las muestras.

3.1.1 PROCEDIMIENTO.

1. Primeramente en el sitio de extracción de la muestra, se despalma la capa vegetal.
2. Enseguida se excava con maquinaria (Retroexcavadora) un pozo a la profundidad deseada de extracción de la muestra, el cual se nombra pozo a cielo abierto (PCA) de un diámetro aproximadamente de 80 cm.
3. En seguida el material excavado se toma y se deposita en costales (aproximadamente unos 40 kg por costal). Este tipo de muestra se considera como una muestra de tipo alterada ya que está constituida por el material semi-disgregado y en terrones. Es muy importante conservar el contenido de humedad de la muestra mediante una bolsa plástica, aislándola para conservar el contenido de humedad (aproximadamente 2 kg por bolsa).
4. Posteriormente se transporta el material hacia el laboratorio.

Consideraciones: Un análisis del suelo en forma inalterada obtiene resultados más apegados a la realidad; sin embargo en esta investigación los ensayos serán con material remoldeado ya que solo así se puede incorporar de manera homogénea el aditivo que se usará como estabilizante en cada una de las pruebas.





3.2 SECADO, DISGREGADO Y CUARTEADO DE MUESTRAS

Se realizan de acuerdo a la norma M-MMP-1-03/03 (SCT). Estos procedimientos permiten la separación de las muestras representativas de materiales para terracerías, mediante su secado, disgregado y cuarteado con el propósito de obtener las porciones representativas para efectuar las pruebas del laboratorio necesarias. Debe recordarse que dicha representatividad puede perderse en algunos de los suelos (Arcillas), especialmente los finos estructurados, al secárseles en el laboratorio (utilizando calor artificial), por lo que en estos caso se evitará su secado.

3.2.1 SECADO.

Se realiza con el objeto de facilitar la disgregación y manejo de las muestras cuando su contenido de agua es tal, que no se puede disgregar fácilmente, en este caso el secado se realiza al aire o al sol a temperatura ambiente.

3.2.1.1 PROCEDIMIENTO:

1. Para realizar el secado de la muestra al aire o al sol a temperatura ambiente, se extiende la muestra sobre una superficie horizontal, lisa y limpia, para que sea fácil recogerla, evitar la pérdida de los finos y su contaminación.
2. Cuando se utilice un horno para el secado, la muestra se coloca dentro de este en charolas y se mantiene a una temperatura de 60 ± 5 °C.
3. En ambos casos, se revuelve periódicamente el material con un cucharón para lograr un secado más rápido y uniforme, hasta reducir su contenido de agua a un grado tal que permita su fácil disgregación.





3.2.2 DISGREGADO.

Se realiza con el objeto de separar las diferentes partículas aglomeradas que constituyen la muestra, en este caso la disgregación se realiza con mazo de concreto para el material en greña previamente seco.

3.2.2.1 PROCEDIMIENTO:

1. Una vez secada la muestra por alguno de los procedimientos que se indicaron anteriormente, se determina y registra su masa con una aproximación al décimo de gramo.
2. Obtenido el peso, el material se criba por la malla N° 4 (4.75 mm) apartando la fracción que pasa esta malla.
3. El material retenido en la malla N° 4 (4.75 mm) es nuevamente disgregado con el mazo y es vuelto a tamizar hasta obtener el peso de la muestra deseada.

3.2.3 CUARTEO.

Se realiza con el objeto de obtener una muestra representativa de tamaño adecuado para efectuar las pruebas del laboratorio que se requieran. (Figura 0-1).



Figura 0-1. Cuarteo y Disgregado del material.





3.3 CONTENIDO DE HUMEDAD.

Se realiza de acuerdo a la Norma M-MMP-1-04/03 (SCT). Esta prueba permite determinar su contenido de agua en los materiales para terracería, con el fin de obtener una idea cualitativa de su consistencia o de su probable comportamiento.

La prueba consiste en secar una muestra de material (Figura 0-2) en el horno y determinar el porcentaje de la masa del agua con relación a la masa de los sólidos.



Figura 0-2. Determinación del peso inicial de la muestra o peso húmedo.

En este caso la determinación del contenido de agua se realiza mediante el procedimiento estándar (mediante la utilización de un horno con una temperatura controlada, Figura 0-3 y Figura 0-4) o mediante el procedimiento rápido que consiste en secar el material con una fuente de calor sin control de la temperatura en una estufa.





Figura 0-3. Horno utilizado para determinar el contenido de humedad.



Figura 0-4. Secado del material durante 24 horas.

La importancia de la humedad en las pruebas es vital, por ejemplo para el caso de las pruebas triaxiales, una humedad distinta genera un incremento o decremento de la resistencia máxima de un espécimen respecto a otro, lo cual obviamente será factor de un resultado erróneo.





3.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA O PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE LOS SÓLIDOS (S_s)

Se realiza de acuerdo a la norma M-MMP-1-05/03 (SCT). Esta prueba permite determinar las masas volumétricas de los materiales para terracerías, es decir, las relaciones masa-volumen en diferentes estados o condiciones de acomodo, ya sean naturales o artificiales, así como los coeficientes de variación volumétrica al pasar de un estado a otro.

La gravedad específica de un suelo es la relación entre el peso en el aire de un volumen dado de partículas de la muestra de suelo, y el peso de un volumen igual al agua destilada a la temperatura de 4 °C.

La gravedad específica de un suelo se usa frecuentemente para relacionar el peso del suelo con el volumen; así conociendo la relación de vacíos (e), el grado de saturación (G_w) y la gravedad específica (S_s) puede calcularse, utilizando la fórmula correspondiente, el peso volumétrico del suelo. También se emplea en la identificación de minerales, pero su valor es limitado ya que está comprendido dentro de un pequeño intervalo.

3.4.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

3.4.1.1 SUELOS ARCILLOSOS O COHESIVOS

1. De la muestra del material recibida en el laboratorio, se toman aproximadamente 5 kg, los que se secan, disgregan y criban, para separarlos mediante cribado en dos fracciones: el material que se retiene en la malla N°4 y el que pasa por dicha malla, colocando las fracciones en charolas distintas.
2. De la fracción de material que pasa la malla N°4, se separa por cuarteo una porción entre 100 y 500 gr.
3. De la fracción tomada de 300 gr se pasarán por la malla 200 y del material que pasa dicha malla se tomarán tres muestras de 50 gr. Respectivamente.





3.4.2 PROCEDIMIENTO:

1. Inmediatamente después de preparar la muestra que pasa la malla N° 200, utilizando el embudo, se introduce el material en el matraz previamente calibrado (Figura 0-5). Posteriormente se llena el matraz con agua destilada hasta aproximadamente la mitad de su capacidad.



Figura 0-5. Embudo que se utiliza para verter el material en el matraz.

2. Empleando el dispositivo de succión, se aplica vacío al matraz durante 15 min, con objeto de extraer el aire atrapado en la muestra. Para facilitar este proceso se agita cuidadosamente la suspensión con un movimiento giratorio del matraz alrededor de su eje. La succión máxima que se aplique no deberá exceder de 100 mm de Hg (0.136 kg/cm^3).

En caso de no contar con el dispositivo de succión, utilizando la parrilla eléctrica o fuente de calor, se pone en ebullición el agua del matraz durante 10 min aproximadamente, moviendo al mismo tiempo el material con el agitador mientras hierve, hasta expulsar el aire atrapado.





3. Se deja enfriar el matraz hasta alcanzar la temperatura ambiente y se adiciona el volumen de agua destilada necesaria para alcanzar la marca de aforo, y en su caso, se vuelve aplicar el vacío para asegurar que no haya quedado aire atrapado en la muestra, lo cual ocurriría cuando ya no se observe ninguna variación en el nivel del menisco; si es necesario, se quitará o agregará agua destilada utilizando una pipeta, de tal forma que el nivel inferior del menisco coincida con la marca de aforo.
4. Se secan cuidadosamente la superficie exterior del matraz y el interior del cuello del mismo. Para esta última operación se emplea un lienzo absorbente enrollado, evitando tocar el menisco.
5. Se obtiene la masa del matraz con el material y el agua, registrándolo como, W_{fsw} , en gr. (Figura 0-6).



Figura 0-6. Peso del material y agua.

6. Se tapa el matraz y se invierte varias veces en forma cuidadosa con el fin de uniformizar la temperatura de la suspensión, a continuación se coloca el bulbo del termómetro en el centro del matraz, y se registra la temperatura, misma que es considerada como la temperatura de la prueba t_p . (Figura 0-7).





Figura 0-7. Toma de temperatura de prueba de la muestra.

7. Hecho lo anterior, se vierte toda la suspensión a una capsula de porcelana, empleando el agua necesaria para arrastrar todas las partículas de suelo y se deja reposar durante 24 h. Se elimina el agua sobrante mediante una cuidadosa decantación y se lleva la muestra al horno para su secado total a masa constante, a una temperatura de $105 \pm 5^\circ \text{C}$; se determina y se anota la masa seca de la muestra, W_s , en gr.
8. En caso de suelos arenosos o no cohesivos, el periodo de reposo podrá reducirse hasta que se observe limpio el tirante de agua, continuando la prueba en la forma descrita en el paso anterior.
9. Finalmente, utilizando la curva de calibración del matraz, se obtiene la masa del matraz con el agua, en gr, correspondiente a la temperatura de prueba t_p y se registra como W_{fw} .

$$S_s = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - w_{fsw}}$$





3.5 MÉTODO DEL pH PARA ESTIMAR LA PROPORCIÓN SUELO-CAL NECESARIA PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.

Se realiza de acuerdo a la norma ASTM D6276. Se preparan una serie de muestras se preparan, variando los porcentajes de contenido de cal en el suelo. Las mediciones de pH son realizadas en las muestras de lodos para determinar el mínimo contenido de cal de la mezcla suelo-cal, para obtener un pH de 12.4 por lo menos.

3.5.1 Procedimiento

1. Obtener cinco especímenes, cada uno equivalente a 25.0 g de suelo secados al horno. División u otros medios apropiados deben utilizarse para la obtención de cada uno de los cinco especímenes. (Figura 0-8).



Figura 0-8. Peso del material en el bote a utilizar.

2. Colocar cada muestra seca en botellas de plástico y tapparla herméticamente.
3. Obtener seis muestras representativas de cal reuniendo los requisitos de la Especificación C 977. De estas muestras, cinco representarán la mezcla suelo-cal. La sexta muestra será 2 gr. de cal.





4. Determinar el 2, 3, 4, 5, y 6% del peso de la muestra seca de suelo (25 grs.). Ese porcentaje corresponderá al peso en cal.
5. Añadir uno de los porcentajes de cal a una de las muestras de suelo en botellas de plástico, tapar herméticamente, marcar el porcentaje en el frasco, y homogeneizar por agitación. Este procedimiento se repetirá para las otras cuatro muestras.
6. Añadir 100 ml de agua a cada una de las mezclas suelo-cal, así como a la muestra que contiene 2.0 g de cal.
7. Agitar cada una de las mezclas suelo-cal-agua y la mezcla de agua-cal por 30 seg. cada 10 min durante 1 hr. (Figura 0-9).



Figura 0-9. Muestras agitadas durante 30 segundos.

8. Determinar el pH de las 6 mezclas 15 minutos antes de la hora del período de agitado y registrar su valor.
9. El valor del pH más cercano o igual a 12.4 será el porcentaje de cal a utilizar en las mezclas.
10. **NOTA:** En caso necesario, enfriar o calentar la muestra según sea necesario para que la temperatura sea de 25 ± 1 ° C.





3.6 DISEÑO DE LA MEZCLA A ESTABILIZAR

Los procedimientos descritos a continuación son para evaluar si un suelo puede ser estabilizado con cal y, en caso afirmativo, determinar la cantidad mínima necesaria de cal. Algunas de las propiedades del suelo a estabilizar serán la Resistencia, la durabilidad, compresibilidad etc. Esto se logrará basándose en los siguientes puntos:

3.6.1 Evaluación inicial del suelo

Objetivo: Evaluar las principales características del suelo como un paso inicial para determinar si es adecuado para la estabilización con cal.

Procedimiento: Usar los procedimientos de la norma ASTM C136 para determinar la cantidad de suelo que pasa la pantalla de las 75 micras y la norma ASTM D 4318 (método húmedo) para determinar el índice de plasticidad del suelo (IP).

Criterios: Generalmente, el suelo que pasa al menos 25% del total por la pantalla de 75 micras y que tiene un valor de IP de 10 o más, es candidato a la estabilización con cal. Algunos suelos con menor IP pueden ser exitosamente estabilizados con cal, siempre que el pH y la fuerza de los criterios descritos en este documento sean satisfechos.

Consideraciones adicionales: El suelo con contenido orgánico arriba del 1-2% en peso, según lo determinado por la norma ASTM D 2974 puede ser incapaz de lograr la resistencia a la compresión no confinada deseada para el suelo estabilizado con cal (Paso 3.6.6) Los suelos que contienen sulfatos solubles superiores al 0.3% pueden ser estabilizados exitosamente con cal, pero pueden requerir precauciones especiales.





3.6.2 Determinación de la demanda aproximada de cal

Objetivo: Determinar la cantidad mínima de cal necesaria para la estabilización.

Procedimiento: Utilizar los procedimientos de la norma ASTM D 6276. Esto también es conocido como el test "Eades-Grim".

Criterios: El porcentaje más bajo de la mezcla cal - suelo que produce una lectura del pH de 12.4 (Figura 0-10) es el porcentaje mínimo de cal para estabilizar el suelo.



Figura 0-10. Lectura del ph-metro.

Consideraciones adicionales: Usar la norma ASTM D 6276 para casos donde la lectura del pH sea de 12.3 o menos.





3.6.3 Determinación del contenido de humedad óptimo y el peso específico seco máximo de la mezcla suelo-cal.

Objetivo: Determinar el contenido de humedad óptimo (W%) y el peso específico seco máximo del suelo después de que la cal ha sido agregada. Esto es necesario porque al agregar la cal al suelo, esta cambiará los valores.

Procedimiento: Haga una mezcla de suelo, cal y agua en el porcentaje mínimo de cal, determinado en el paso 3.6.2., con un contenido de agua (Figura 0-11) tal y como lo marca la norma M-MMP-1-09/06 (SCT).



Figura 0-11. Mezclas de suelo-cal-agua

Consideraciones adicionales: Cuando se utiliza la cal viva, la mezcla debe guardarse de 20-24 horas para asegurar la hidratación.

3.6.4 Elaboración de los especímenes para la prueba de Resistencia a la compresión no confinada (UCS)

Objetivo: Fabricar especímenes para pruebas de UCS (Paso 3.6.6).

Procedimiento: Usar el procedimiento B de la norma ASTM D 5102, fabricando un mínimo de dos especímenes de cal, suelo y agua usando la cantidad (porcentaje) de cal determinada desde el paso 3.6.2 en el W% ($\pm 1\%$), determinado desde el paso 3.6.3. (Figura 0-12).





Figura 0-12. Material compactado de donde se obtienen los especímenes.

Resultado deseado: un mínimo de dos muestras para pruebas de UCS.

Consideraciones adicionales: Cuando se utiliza la cal viva, la mezcla debe guardarse de 20-24 horas para asegurar la hidratación. Especímenes adicionales pueden ser fabricados si se desean pruebas adicionales.

En algunos casos puede ser aconsejable realizar especímenes de prueba con un mayor contenido de cal (s) determinado a partir de la norma ASTM D 6276 (Paso 3.6.2). Estos especímenes adicionales pueden ser utilizados para determinar la UCS de de las mezclas cal-suelo-agua en mayor contenido de cal.

3.6.5 Curado y preparación de los especímenes para la Resistencia a la compresión no confinada (UCS)

Objetivo: aproximar, de manera acelerada, las condiciones de curado y la humedad.

Procedimiento: Inmediatamente después de la fabricación de los especímenes, se envuelven las muestras en plástico y se colocan en un recipiente hermético (Figura 3-13). Se dejan curar las muestras por 7 días a 40 °C.





Figura 0-13. Material con estabilizante envuelto para su curado durante 7 días.

Resultado deseado: un mínimo de dos especímenes curados para las pruebas.

3.6.6 Determinación del cambio en las características de Expansión (sólo para suelos expansivos)

Objetivo: Evaluar la expansión de suelos estabilizados con cal.

Procedimiento: Tenga en cuenta la dimensión vertical y circunferencial de las muestras fabricadas en el paso 3.6.5 antes de realizar la saturación. Después de saturar, realizar nuevas mediciones utilizando un vernier para la dimensión vertical y circular. Calcular la variación del volumen entre las condiciones iniciales (secas) y las finales (estado saturado).

Criterios: Expansiones tridimensionales entre el 1 y el 2% se consideran aceptables.

Consideraciones adicionales: Si la expansión excede el parámetro de diseño, fabricar muestras adicionales aumentando el contenido de cal en 1 y 2% y repetir la prueba. Si se desea expansión adicional, reducción e incrementar la presión, se realiza la norma ASTM D3877. Este paso sólo es aplicable a los suelos expansivos.





3.7 PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO (COMPACTACIÓN AASHTO)

Se realiza de acuerdo a la norma M-MMP-1-09/06 (SCT). Esta prueba permite determinar la curva de compactación de los materiales para terracerías y a partir de esta inferir su peso volumétrico seco máximo y su contenido de agua óptimo.

3.7.1 PROCEDIMIENTO:

1. Después de su secado y disgregado y cuarteo, se separa una porción representativa (Figura 0-14) de aproximadamente 8 kg.

La muestra de 8 kg. debe ser cribada por la malla N° 4. De los 8 kg que se cribaron se toman 2 kg. Para realizar cada punto de la prueba se tara las charolas de aluminio y el molde de compactación, anotando estos datos en el registro correspondiente.



Figura 0-14. Material arcilloso después del secado y cuarteado

2. Se le incorpora la cantidad de agua suficiente para que tenga de un 4 a un 6% abajo de la humedad óptima estimada, se uniformiza la humedad. (Figura 0-15).





Figura 0-15. Material arcilloso al adicionarle el agua.

3. En caso de que se hayan formado grumos durante la incorporación del agua, se revuelve el material hasta disgregarlo totalmente. Se mezcla cuidadosamente la porción para homogeneizarla y se divide en 3 partes aproximadamente iguales.

4. Se coloca una de las fracciones de material en el molde de prueba, con su respectiva extensión, se inicia la compactación del material con el pisón de 30.5 cm (las características del pisón y molde se muestran en la Figura 0-16), aplicando 25 golpes (Figura 0-17). Se escarifica ligeramente la superficie de la capa compactada y se repite el procedimiento descrito para las capas subsecuentes.



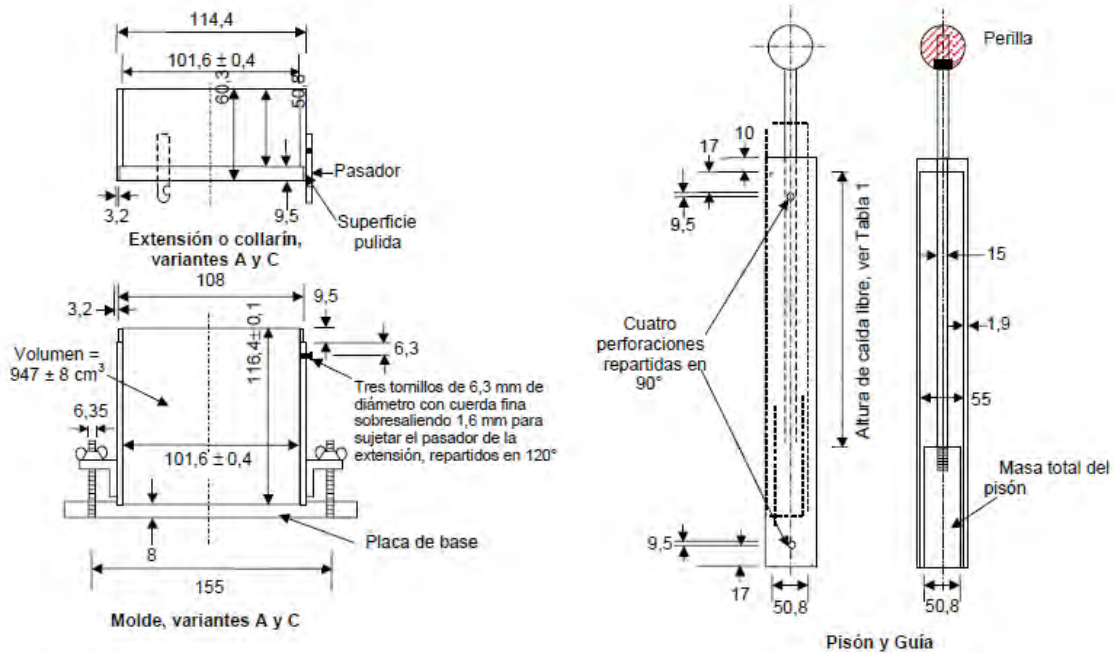


Figura 0-16. Características del pisón y molde



Figura 0-17. Compactación con el pisón aplicando 25 golpes para cada capa.

5. Terminando la compactación de todas las capas, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga en un espesor promedio de 1.5 cm como máximo.





- De lo contrario la prueba se repetirá utilizando de preferencia una nueva porción de prueba con masa ligeramente menor que la inicial, en caso de que no exceda dicho espesor, se enrasa el molde con un cuchillo y se pesa, registrándolo como: Peso del molde + suelo húmedo.
6. Se saca el material del molde, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una porción representativa para determinar su contenido de humedad.
 7. Se vacía el suelo húmedo a la primera cápsula de porcelana que se haya pesado, aproximadamente unos 200 grs. la cual se pesa.
 8. Las cápsulas se introducen al horno; se deja secar por unas 24 hrs., esto es con el fin de determinar el contenido de agua para este ensaye.
 9. Se reintegra al resto del material que se encuentra en la charola, se disgrega hasta dejarlo como estaba inicialmente.
 10. Se le hace el incremento de agua recomendado, que es de un 2% con respecto al peso inicial de la muestra (2 kg).
 11. Se distribuye la humedad en forma homogénea y se repite la compactación como se describió anteriormente; se compacta las veces necesarias hasta que el peso del molde + suelo húmedo de un valor igual o menor que el inmediato anterior.
 12. Es recomendable que esta prueba se logre en un mínimo de 4 ensayes y un máximo de 6, con el fin que se logre definir la parábola de forma completa.
 13. Después de las 24 hrs. las cápsulas son extraídas del horno y se pesan, registrándolas como peso seco y se procederá con los cálculos.





3.8 LÍMITES DE CONSISTENCIA

Se realizan de acuerdo a la norma M-MMP-1-07/07 (SCT). Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan las mallas No. 40. Estos resultados se utilizan principalmente para la identificación de los suelos.

3.8.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

1. En la preparación de la muestra para determinar los límites de consistencia y la contracción lineal, se emplean 250 gr de material previamente cribados por la malla Núm. 0.425 (Nº 40).
2. La muestra se coloca en un recipiente apropiado, se le agrega agua en cantidad necesaria para que el material quede saturado completamente (Figura 0-18) y se deja en reposo durante 24 horas aproximadamente, en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un trapo húmedo que mantenga la humedad a fin de reducir al mínimo las pérdidas de agua por evaporación.



Figura 0-18. Material saturado con agua, para su posterior reposo por 24 horas.





3.8.2 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. Se toma una muestra de 150 gr, aproximadamente, del material preparado de acuerdo a lo anterior explicado, este material se coloca en una cápsula de porcelana y se procede a homogeneizar la humedad con la espátula. (Figura 0-19).

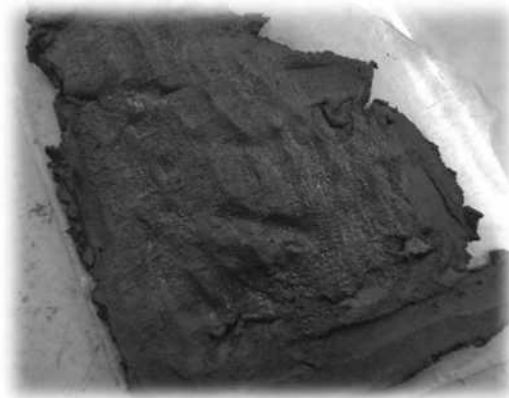


Figura 0-19. Muestra de arcilla después de homogeneizarla con la espátula.

2. Logrado lo anterior se coloca en la copa de Casagrande, previamente calibrada, una cantidad suficiente de material para que una vez extendido con la espátula se tenga un espesor de 8 a 10 milímetros en la parte central de la muestra colocada. Para extender el material se procede del centro hacia los lados, sin aplicarle una presión excesiva y con el número mínimo de pasadas de la espátula.
3. Se efectúa una ranura en la parte central del material que contiene la copa, con una pasada firme del ranurador, manteniéndolo siempre normal a la superficie del la copa. (Figura 0-20).
4. Se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa, a razón de 2 golpes por segundo y se registra el número de golpes necesarios para que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.





Figura 0-20. Material arcilloso en la Copa Casagrande después de pasarle el ranurador.

5. Una vez logrado lo anterior se toma aproximadamente 10 gr del material de la porción cerrada de la ranura y se coloca en un vidrio de reloj, para proceder de inmediato a pesarlo para obtener su contenido de agua.
6. A continuación y una vez que se ha tomado la muestra para la determinación de la humedad, se regresa a la cápsula de mezclado lo que contiene la copa, se lavan y secan tanto la copa como el ranurador.
7. En seguida se agrega agua con el cuenta gotas al material contenido en la cápsula, se homogeniza el material y se vuelven a realizar las etapas anteriores.
8. La cantidad de agua agregada al material deberá ser en tal forma que las cuatro determinaciones efectuadas, quedan comprendidas entre 10 y 35 golpes, siendo necesario obtener 2 valores arriba y 2 debajo de 25 golpes. Para consistencias menores de 10 golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada, por otra parte y para más de 35 golpes, se dificulta la ejecución de la prueba.





3.9 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO

3.9.1 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. Se toma una muestra de material preparado de acuerdo con la prueba de LL, a la cual se le da la forma de una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, que debe moldearse con los dedos para que pierda la humedad y se forma un cilindro manipulándolo sobre la palma de la mano, aplicando con los dedos la presión necesaria para tal fin.
2. A continuación, se rola el cilindro con los dedos de la mano sobre la placa de vidrio, dando la presión requerida para reducir su diámetro hasta que este sea uniforme en toda su longitud y ligeramente mayor de 3 mm, la velocidad de rodado debe ser de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por ciclo un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de la partida. (Figura 0-21).



Figura 0-21. Rollitos de arcilla de 3 mm de diámetro

3. Si al alcanzar dicho diámetro el cilindro no se rompe en varias secciones simultáneamente, su humedad es superior a la del límite plástico. En ese caso se debe juntar todo el material, se forma nuevamente una pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma.





4. Se repiten los pasos 1 hasta el 3 hasta lograr que el cilindro se rompa en varios segmentos precisamente en el momento de alcanzar el diámetro de 3 mm. Dicho diámetro se verifica comparándolo con el alambre de referencia.
5. En seguida se colocan en un vidrio de reloj todos los fragmentos en que se halla dividido el cilindro y se efectúa la determinación del contenido de humedad correspondiente. (Figura 0-22).



Figura 0-22. Fragmentos de los rollitos de arcilla.

6. Para mayor seguridad en los resultados de la prueba, se debe llevar a cabo por lo menos 3 determinaciones sucesivas del límite plástico, en cada muestra.
7. Los suelos con lo que no es posible formar cilindros del diámetro especificado, con ningún contenido de agua, se consideran como no plásticos.





3.10 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO

El índice plástico en suelo mide el intervalo de variación de la humedad dentro del cual el suelo presenta una consistencia plástica, de acuerdo con los conceptos expresados anteriormente.

Los límites líquido y plástico corresponden a las fronteras superior e inferior de dicha consistencia, respectivamente.

El índice plástico, se define como la diferencia aritmética entre los límites líquido y plástico, se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP= Es el índice plástico del suelo, en por ciento.

LL= Es el límite líquido del suelo, en por ciento.

LP= Es el límite plástico del suelo, en por ciento.





3.11 DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN LINEAL

1. Se agrega a la muestra agua o material menos húmedo tomando de la porción preparada, hasta lograr que la humedad sea la correspondiente a la del límite líquido, lo cual se certifica empleando la copa de Casagrande y cumpliendo con la condición de que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm precisamente a los 25 golpes.
2. Con el material preparado en las condiciones indicadas se procede a llenar el molde de prueba, al cual se le habrá aplicado previamente una capa delgada de grasa en su interior para evitar que el material se adhiera a sus paredes.

El llenado del molde se efectúa en 3 capas, utilizando la espátula y golpeándolo después de la colocación de cada capa contra una superficie dura; para esto último, se toma el molde por sus extremos, procurando siempre que el impacto lo reciba en toda su base, lo cual se logra conservando paralelismo entre dicha base y la superficie sobre la cual se golpea. (Figura 0-23). En cada caso las operaciones de golpeo deberán prolongarse lo suficiente para lograr la expulsión del aire contenido en la muestra colocada, lo que se pone de manifiesto cuando ya no aparecen burbujas en su superficie.

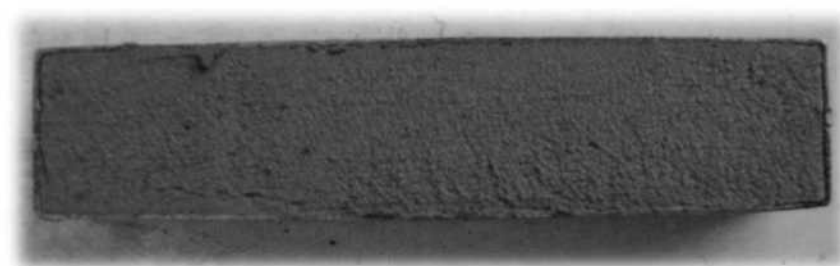


Figura 0-23. Material arcilloso en el molde llenado en 3 capas.





3. A continuación se enrasa el material en el molde utilizado con la espátula y se deja orear a la sombra hasta que cambie ligeramente su color, después de lo cual se pone a secar en el horno por un periodo de 18 horas, aproximadamente, a una temperatura de 105 ± 5 °C.
4. Se extrae del horno el molde con el espécimen, se deja enfriar a la temperatura ambiente y a continuación se saca del molde la barra. (Figura 0-24).



Figura 0-24. Especimen extraído del molde después de 18 horas en el horno.

5. Finalmente, se mide con el calibrador la longitud media de la barra del material seco y la longitud interior del molde, con aproximación de 0.01 cm.





3.12 DETERMINACIÓN DE LA CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA

3.12.1 PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. Recubrir el interior del molde con una capa delgada de lubricante (por ejemplo, vaselina o aceite de silicón para prevenir la adherencia de suelo al molde).
2. Colocar una porción de suelo húmedo de aproximadamente un tercio de la capacidad del molde en el centro de este y extenderlo hasta los bordes, golpeando el molde contra una superficie firme recubierta con papel secante o similar.
3. Agregar una porción similar a la primera y golpear el molde hasta que el suelo este completamente compactado y todo el aire atrapado suba a la superficie. (Figura 0-25).
4. Agregar material y compactar hasta que el molde este completamente lleno y con exceso de suelo sobre el borde.



Figura 0-25. Arcilla en el molde después de golpearlo varias veces para que el aire atrapado suba a la superficie.

5. Enrasar con la regla y limpiar posibles restos de suelo adherido al exterior del molde.





6. Inmediatamente de enrasado, pesar el molde con el suelo compactado. Restar el peso del molde determinando el peso del suelo húmedo (W_h). Registrar aproximando a 0.01 gr.
7. Dejar secar lentamente al aire hasta que la pastilla de suelo moldeado se desprende de las paredes del molde o hasta que cambie de color oscuro a claro.
Nota: Se recomienda efectuar el ensaye, hasta el inicio del secado, en cámara húmeda. Si no se cuenta con este dispositivo se deben tomar todas las precauciones necesarias para reducir la evaporación.
8. Secar en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante. (Figura 0-26).
Nota: El secado en horno a 110 ± 5 °C no entrega resultados fiables en suelos que contienen yeso u otros minerales que pierden fácilmente el agua de hidratación o en suelos que contienen cantidades significativas de materia orgánica. En estos casos es recomendable el secado en horno a aproximadamente 60 °C.



Figura 0-26. Espécimen obtenido después del secado al horno.

9. Pesar el molde con el suelo seco. Restar el peso del molde determinando el peso del suelo seco (W_s). Registrar aproximando a 0.01 gr. (Figura 0-27).





Figura 0-27. Molde y espécimen después de la prueba.

10. Determinar el volumen de la pastilla de suelo seco.
11. Llenar la taza con mercurio hasta que desborde, enrasar presionando con la placa de vidrio y limpiar los restos de mercurio adheridos al exterior de la taza.
12. Colocar la taza llena de mercurio sobre el plato de evaporación, colocar la pastilla de suelo sobre la superficie del mercurio y sumergirlo cuidadosamente mediante las puntas de la placa de vidrio hasta que ésta tope firmemente contra el borde de la taza (es esencial que no quede aire atrapado bajo la pastilla de suelo ni bajo la placa de vidrio).
13. En seguida, obtener el volumen de mercurio desplazado por la pastilla de suelo, para esto se pesa y se divide por la densidad del mercurio ($\gamma_{\text{Hg}} = 13.55 \text{ g/cm}^3$), registrarlo como volumen de la pastilla de suelo seco (V_s), aproximando a 0.01 cm^3 (0.01 ml).





3.13 PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN

Se realiza de acuerdo a la norma ASTM-D2435 (Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil).

3.13.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN

1. Reducir al máximo durante la preparación de la muestra alguna alteración en la estructura del suelo.
2. Preparar la muestra en un medio donde la muestra húmeda cambie en lo más mínimo su contenido de humedad (Cuarto húmedo).
3. Preparación de la probeta por tallado de una muestra inalterada: Se emplea el anillo con un borde cortante. Se prepara en la muestra una zona con la superficie horizontal de tamaño apreciablemente mayor que el diámetro interior del anillo, con la precaución de mantener la orientación que tenía la muestra en el terreno.
4. Se sitúa el anillo sobre la mencionada zona con el borde cortante en contacto con la muestra.
5. Utilizando como guía la pared interior del anillo, se talla un cilindro cuyo diámetro es aproximadamente el diámetro interior del anillo y de altura superior a este.
6. Se va introduciendo el anillo en la muestra, hasta que esta sobresalga por la parte opuesta del borde cortante, cortándola en seguida por debajo.
7. Se determina el peso inicial del anillo más el material húmedo, en gr.





8. Se determina el peso inicial del agua del material (W_i), en gr.
9. Se determina la altura inicial del espécimen (H_0), en cm.
10. Se calcula el volumen inicial del espécimen, con aproximación de 0.25 cm^3 .
11. Se determina el peso específico relativo del material (S_s), este parámetro es adimensional.

$$S_s = \frac{\gamma_{sol}}{\gamma_0}$$

3.13.2 PROCEDIMIENTO

1. Preparación de los discos porosos: La preparación de los discos y otros aparatos, depende de la muestra de suelo a la que se le aplicara la prueba. (Figura 0-28). Las diferentes partes del consolidómetro deben prepararse de tal forma que no ocasionen cambios en la humedad de la muestra de suelo. Los discos secos se usan para muestras muy expansivas, los discos húmedos para muestras parcialmente secas y los discos saturados, para muestras saturadas o materiales con una permeabilidad muy baja.

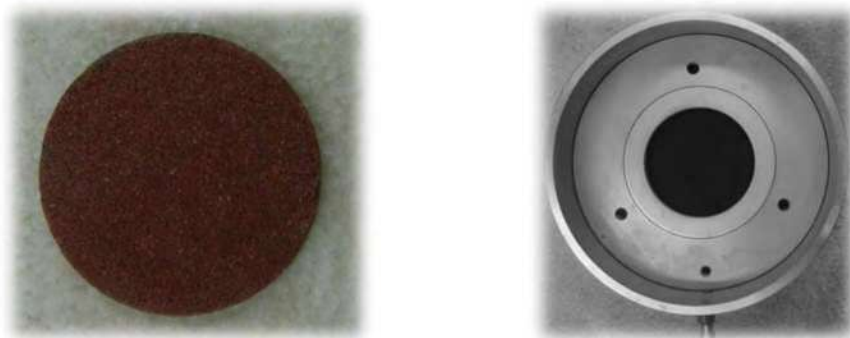


Figura 0-28. Discos porosos y base de la cápsula.

2. Al poner el material en el consolidómetro se coloca en el aparato de carga y se empieza a aplicar una presión de consolidación.





Inmediatamente después de aplicar este pre-esfuerzo, se debe ajustar el micrómetro digital y reiniciar el programa en ceros que tomará las lecturas. (Figura 0-29).



Figura 0-29. Equipos de consolidación.

3. Se aplica el primer incremento de carga, (Figura 0-30) y se inicia el programa para la captura de datos (Figura 0-31), mientras que el programa dibuja en tiempo real, la curva de consolidación, graficando en las abscisas tiempo (Logarítmico) y en las ordenadas la deformación lineal (Normal).



Figura 0-30. Placas aplicadas para la carga.





- Una vez que en la curva de consolidación se define claramente el tramo recto de consolidación secundaria, o se repite la lectura en el micrómetro dejando pasar un tiempo considerable se considera que la consolidación primaria se ha completado, y se procede entonces a aplicar el segundo incremento de carga y se procede de nuevo del paso 3 al 5.



Figura 0-31. Pantalla del programa de consolidación.

- Una vez aplicados todos los incrementos de carga necesarios, se procede a quitar las cargas en decrementos, de la misma manera que fueron aplicados. Se hacen lecturas en diferentes tiempos para cada carga actuante en el ciclo de descarga, dibujando las correspondientes curvas expansión análoga a las anteriores de consolidación. Es conveniente invertir la escala de las lecturas del micrómetro al dibujar las curvas.
- Después de retirar toda la carga permítase que la muestra se expanda durante 48 horas, o hasta que no se registre expansión en el micrómetro en un periodo de 24 horas.





7. Al terminar la prueba se desarma el consolidómetro. Se seca el agua del anillo y de la superficie de la muestra, se colocan dos placas de vidrio, previamente taradas, cubriendo la muestra y el anillo, y se pesa todo el conjunto (anotando el dato como: tara + suelo húmedo).

8. Se seca la muestra en el horno y se obtiene su peso seco (tara + suelo seco).

9. Con todos los valores obtenidos durante la prueba, se determinan los parámetros de consolidación.

10. Se dibuja la gráfica relación de vacíos contra esfuerzo aplicado, la cual sirve para determinar la carga de preconsolidación del suelo.





3.14 PRUEBA DE PRESIÓN DE EXPANSIÓN

Se realiza de acuerdo a la norma ASTM-D4546-03.

3.14.1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN

1. Reducir al máximo durante la preparación de la muestra alguna alteración en la estructura del suelo.
2. Preparar la muestra en un medio donde la muestra húmeda cambie en lo más mínimo su contenido de humedad (Cuarto húmedo).
3. Preparación de la probeta por tallado de una muestra inalterada: Se emplea el anillo con un borde cortante. Se prepara en la muestra una zona con la superficie horizontal de tamaño apreciablemente mayor que el diámetro interior del anillo, con la precaución de mantener la orientación que tenía la muestra en el terreno.
4. Se sitúa el anillo sobre la mencionada zona con el borde cortante en contacto con la muestra.
5. Utilizando como guía la pared interior del anillo, se talla un cilindro cuyo diámetro es aproximadamente el diámetro interior del anillo y de altura superior a este.
6. Se va introduciendo el anillo en la muestra, hasta que esta sobresalga por la parte opuesta del borde cortante, cortándola en seguida por debajo.
7. Se determina el peso inicial del anillo más el material húmedo, en gr y se determina el peso inicial del agua del material, en gr.





8. Se determina la altura inicial del espécimen, en cm y se calcula el volumen inicial del espécimen, con aproximación de 0.25 cm^3 .

3.14.2 PROCEDIMIENTO

1. Preparación de los discos porosos: La preparación de los discos y otros aparatos, depende de la muestra de suelo a la que se le aplicará la prueba.

Los discos secos se usan para muestras muy expansivas, los discos húmedos para muestras parcialmente secas y los discos saturados, para muestras saturadas o materiales con una permeabilidad muy baja.

2. Ya que se tiene labrado el material dentro del anillo se procede a tomar el peso inicial del material. (Figura 0-32).



Figura 0-32. Peso del material dentro del anillo.

3. Al poner el material en el anillo se coloca el papel filtro por ambos lados y las piedras porosas, después se coloca el conjunto adentro de la cápsula.





4. Ahora se coloca la cápsula dentro del aparato que registrara la carga, el micrómetro se ajusta para que quede en cero como en la Figura 0-33.



Figura 0-33. Aparato utilizado para la presión de expansión.

5. Ya colocado el material y el micrómetro en ceros se vierte el agua de inmediato hasta llenar la capsula y se comienzan a registrar las lecturas.
6. Se deja el material durante 24 horas, o cuando la expansión se detenga.
7. Al terminar la prueba se desmantela la cápsula con las piedras y se seca el agua del anillo de manera superficial con una franela.
8. Se colocan dos placas de vidrio, previamente taradas, cubriendo la muestra y el anillo, y se pesa todo el conjunto (anotando el dato como: tara + suelo húmedo).





9. Se coloca la muestra en el horno y se deja secar durante 24 hora (Figura 0-34) para obtener su peso seco, enseguida se saca del horno y se deja enfriar hasta peso constante (tara + suelo seco).



Figura 0-34. Muestra obtenida después de sacarla del horno en el que duró 24 horas.

10. Con todos los valores obtenidos durante la prueba, se determinan los parámetros para conocer la presión de expansión.

11. Como último paso, se dibuja la gráfica de tiempo contra deformación.





3.15 PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE

Se realiza de acuerdo a la norma ASTM-D2166.

3.15.1 PROCEDIMIENTO

1. Se labran los cilindros buscando que el diámetro de estos, sea de 3.3 cm y la altura sea de 2 a 2.5 veces el diámetro.
2. La muestra es medida y pesada y se anota en el registro correspondiente.
3. Se miden los diámetros: superior (D_s), central (D_c) e inferior (D_i).
4. De los diámetros anteriores se saca el promedio, el cual es multiplicado por 2.5, esto es para obtener la altura que tendrá el espécimen.
5. Se corta el espécimen a la altura media calculada, después de haberlo cortado, se toma la altura real del espécimen y es la que se anota como altura media (H_m).
6. Se coloca la muestra en la prensa, se le coloca la placa de aplicación de carga.
7. Se procede a aplicar la carga a la muestra, tomando lecturas de carga y deformación correspondiente a cada 15 segundos, hasta que el espécimen falle (Figura 0-35), esto es, que se registre el 20% con respecto a la altura inicial o que de una carga menor que la inmediata anterior.





Figura 0-35. Espécimen probado después de la prueba de compresión simple.

8. Se realizan los cálculos del registro y se obtiene el valor de la Cohesión del suelo con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{q_u}{2}$$

Donde:

C = Cohesión (Kg/cm²).

q_u = Esfuerzo máximo (Kg/cm²).





3.16 PRUEBA TRIAXIAL RÁPIDA

Se realiza de acuerdo a la norma ASTM-D2850-03.

3.16.1 PROCEDIMIENTO

1. Para esta prueba se requieren probar 3 especímenes a diferente presión de confinamiento.
2. Los especímenes se labran de 3.3 cm de diámetro como mínimo y de altura de 2 a 2.5 veces el diámetro. El diámetro de la probeta es de forma cilíndrica y de 5 veces mayor que el de la partícula de mayor tamaño.
3. Se miden los diámetros: superior (D_s), central (D_c) e inferior (D_i).
4. Las muestras se introducen a un recipiente hermético, o de preferencia en un plástico para que no pierdan humedad.
5. Se inicia con la muestra N°1, la cual es medida y pesada, anotándose estos datos en el registro correspondiente.
6. Se coloca la muestra en la base de la cámara triaxial, se le coloca el cabezal encima, se cubre la muestra con una membrana de látex, ligada perfectamente para evitar que penetre el agua, que se utiliza para dar confinamiento al suelo.
7. Se saca el vástago de carga y se coloca la cámara triaxial sobre la muestra, se ajustan los tornillos y se baja el vástago hasta que éste toque el cabezal.





8. Se coloca la cámara en la prensa (Figura 0-36), utilizando la manivela se sube la cámara hasta que el micrómetro que indica la carga se mueva una unidad y enseguida se introduce el agua que dará la presión confinante, con la cual se va a ensayar el primer espécimen. Teniendo cuidado de revisar la válvula que se encuentra en la parte superior de la cámara, la cual debe estar ligeramente abierta y cuando salga poca agua, esto indica que la cámara se llenó completamente de agua, por lo que se procede a cerrar esta válvula.



Figura 0-36. Equipo utilizado para las pruebas triaxiales.

9. Se coloca la manivela en la tercera muesca; esto es para que la prensa funcione por medio del motor a una velocidad constante (1.14 mm por minuto), se ajustan los 2 extensómetros (el que registra unidades de carga y el de unidades de deformación) en cero.





10. Se aplica la carga, tomándose lecturas de unidades de carga y unidades de deformación a cada 30 segundos o cada minuto, hasta que se registren 2 unidades de carga iguales. También se dejan de tomar lecturas o se suspende el ensaye, si la muestra de suelo presenta una deformación del 20% con respecto a la altura inicial.
11. Se elimina la presión de confinamiento y se saca el espécimen fallado (Figura 0-37), se hace un croquis de este y se somete a secado en el horno para obtener el contenido de agua.



Figura 0-37. Espécimen fallado después de la prueba.

12. Para los especímenes restantes se utiliza el mismo procedimiento, el único cambio es variar la presión de confinamiento.





ANÁLISIS DE RESULTADOS.





En este capítulo se verán y analizarán los resultados que se obtuvieron durante el periodo experimental, siguiendo la cronología que se tiene en el capítulo anterior.

4.1 MUESTREO DEL MATERIAL

El material seleccionado para las pruebas fue extraído de las instalaciones de la Unidad Posta Veterinaria.

Al llegar al sitio de muestreo, se realizó una inspección visual del terreno donde se observó que el suelo presentaba características plásticas y expansivas, debido a la clasificación de campo (ANEXO A.1), por lo cual se concluyó que este material era apto para probar en él los estabilizantes y ver si éstos podrían modificar sus características iniciales. Las muestras extraídas fueron:

- ♦ 1 muestra inalterada de arcilla.
- ♦ 3 costales de 40 kilos de material alterado arcilloso.

En la Tabla 0-1, se muestra la información de la exploración además de algunas características del material en estado natural.

Tabla 0-1. Características del material en estado natural.

DATOS GENERALES	
UBICACIÓN:	Unidad Posta Veterinaria, Km. 9 ½ carretera Morelia-Zinapécuaro, Tarímbaro, Mich.
TIPO DE MUESTEO:	Pozo a Cielo Abierto
ESTRATIGRAFÍA:	10 cm. Capa vegetal (despalme) 10 cm - 1.80 m. Estrato de arcilla negra
DESCRIPCIÓN:	Arcilla negra
MINERAL INFERIDO	Montmorillonita
% Contenido de Humedad	27.55
CLASIFICACIÓN	Arcilla de alta plasticidad CH





4.2 ANÁLISIS DEL AGUA

Una de las principales pruebas que se realizó dentro de esta investigación, es la medición del pH en la mezcla suelo-estabilizante. Para que estos resultados no presentaran alteraciones debido a que el agua de uso común contiene un pH menor de 7, se decidió emplear agua desionizada (destilada) ya que esta siempre mantiene un pH de 7, el cual es neutro. De esta manera las lecturas del pHmetro utilizado no se vieron alteradas.

4.3 DETERMINACIÓN DEL % DE ESTABILIZANTE EN LA RELACIÓN CAL-SUELO AGUA

Siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D6276 se realizaron las pruebas para determinar la proporción del suelo – estabilizante.

Estas pruebas se hicieron con cada uno de los estabilizantes para así determinar la proporción ideal de cada uno, a continuación se presenta la tabla Tabla 0-2 donde se muestran las lecturas de pH de la mezcla estabilizante – suelo – agua para cada uno de los porcentajes mencionados en la norma y son señaladas las lecturas del pH usadas en las pruebas.

Tabla 0-2. Relación % estabilizante – suelo (norma ASTM D6276 pH 12.4)

% DE ESTABILIZANTE AL		2%		3%		4%		5%		6%	
Estabilizante 1	pH	11.4	pH	12	pH	12	pH	12.3	pH	12.4	
Estabilizante 2	pH	11.8	pH	12.4	pH	12.6	pH	12.8	pH	12.8	
Estabilizante 3	pH	10.9	pH	12.4	pH	12.8	pH	12.9	pH	13.2	
Estabilizante 4	pH	9.1	pH	9.9	pH	10.6	pH	11	pH	11.7	

De los resultados obtenidos, se determinaron los porcentajes que dieron el pH de 12.4 o el más cercano. De esta manera, de la Tabla 0-3 se definió la proporción de estabilizante que se tomará para realizar las mezclas.





Con el estabilizante 1 se aplicó un 6% del peso total de la muestra de suelo. Con el estabilizante 2 y 3 se aplicó un 3%.

Para el estabilizante 4 se observó que ninguno de los porcentajes llega al 12.4 de pH, por lo que se tomó el porcentaje de pH más cercano a él, siendo este del 6% con un pH de 11.7. En la Tabla 0-3 se presentan los resultados finales.

Tabla 0-3. Porcentajes utilizados para cada estabilizante.

		pH	% del estabilizante
Estabilizante	1	12.4	6%
Estabilizante	2	12.4	3%
Estabilizante	3	12.4	3%
Estabilizante	4	11.7	6%

4.4 PRUEBAS ÍNDICE

Todos los resultados que se presentan a continuación, sirven para poder hacer la clasificación e identificación correcta del material y observar si el estabilizante modifica algunas de las características del suelo.

Los resultados se presentan en el siguiente orden, primero los valores como son límite líquido, límite plástico, índice plástico, contracción volumétrica y contracción lineal.

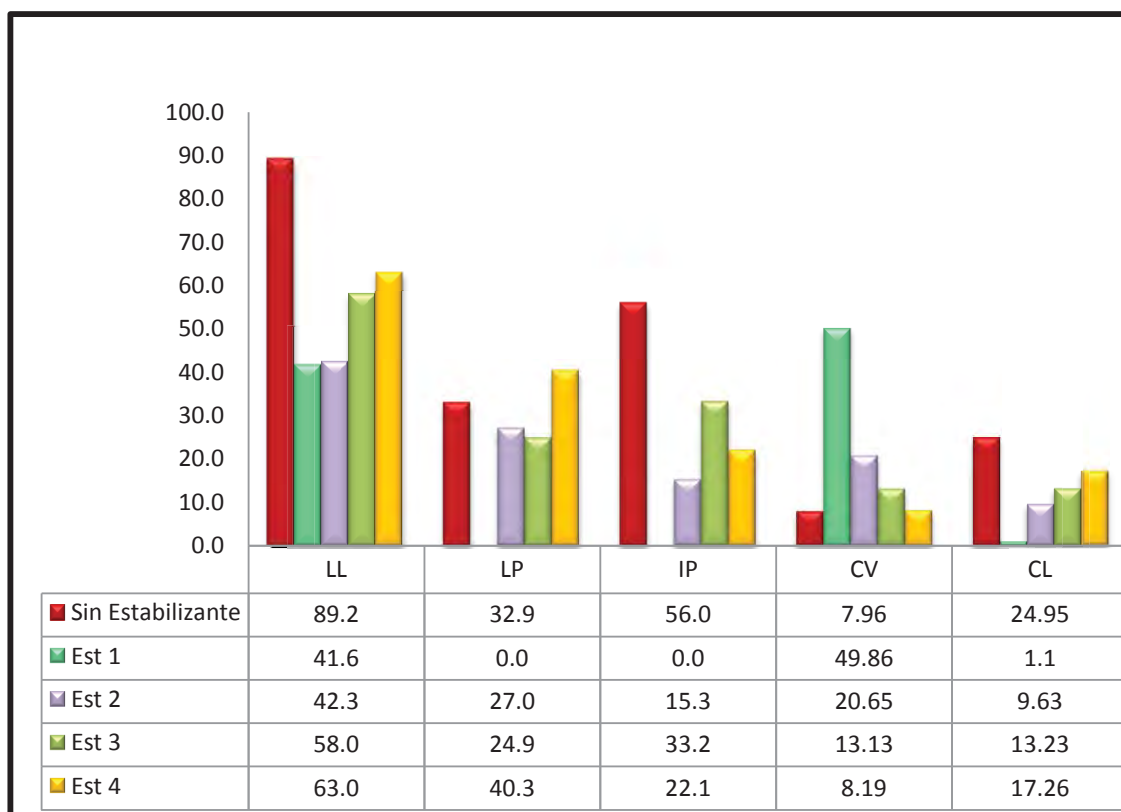
Haciendo una comparación entre el suelo en su estado natural (sin ningún estabilizante, Figura 4-1) y cada una de las mezclas realizadas para los diferentes estabilizantes, se observa en la Gráfica 0-1 que en el primer parámetro correspondiente al límite líquido, el estabilizante 1 y 2 bajaron su valor en un 50% y el estabilizante 3 y 4 en un 30%.





Figura 0-1. Contracción Volumétrica y Lineal del Suelo sin Estabilizante.

En el límite plástico se observa que para el estabilizante 1 se obtuvo un valor de cero, el cual significa que no se pudo obtener durante la prueba, esto indica que es inapreciable; el estabilizante 2 y 3 lograron bajar su valor un 15% y caso contrario con el estabilizante 4 que se incrementó en un 10%.



Gráfica 0-1. Resultados de Pruebas Índice

Ya obtenidos estos valores se puede determinar el índice plástico, donde se observa que para el estabilizante 1 el valor es de cero ya que se mencionó previamente que su límite plástico era cero.





Con los estabilizantes 2 y 4, sus valores bajaron considerablemente dando como resultado que su clasificación SUCS cambiara como se aprecia en la Figura 0-2. Es decir, el material en su estado natural se puede clasificar como una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH).

Para el estabilizante 1 y 2 su clasificación cambió a un limo inorgánico de baja plasticidad (ML) y el estabilizante 4 pasó de ser una arcilla a un limo inorgánico de alta plasticidad (MH). El estabilizante 3 conservó su misma clasificación aunque bajaron los parámetros de índice de plástico y límite plástico.

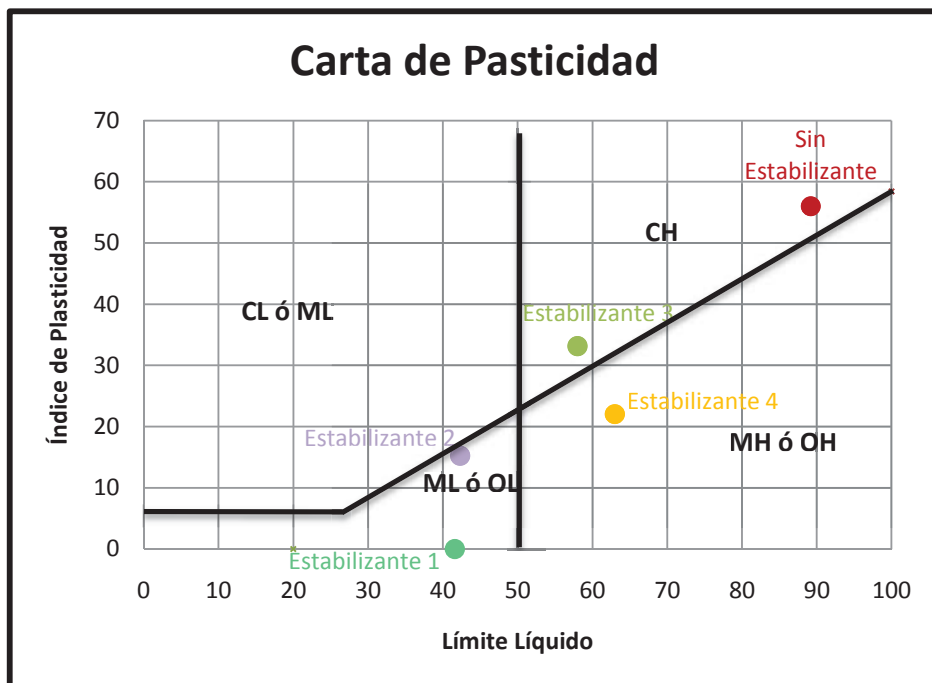


Figura 0-2. Clasificación de Atterberg.

Continuando con los resultados de la Gráfica 0-1, se aprecia que la contracción volumétrica que presentó el material con cada uno de los estabilizantes se incrementó, dando esto como resultado que su disminución de volumen de detuviera con un porcentaje mayor de contenido de agua, es decir, la contracción fue menor.





Cabe señalar que las contracciones no se presentaron de manera uniforme, ya que dependiendo del estabilizante, presentaron mayor o menor contracción.

En el parámetro de contracción lineal, se observa que todos los valores fueron menores que el material en su estado natural ya que no presentaron ningún cambio en el tamaño de la barra, es decir, se mantuvo su tamaño inicial.

4.5 PRUEBAS MECÁNICAS

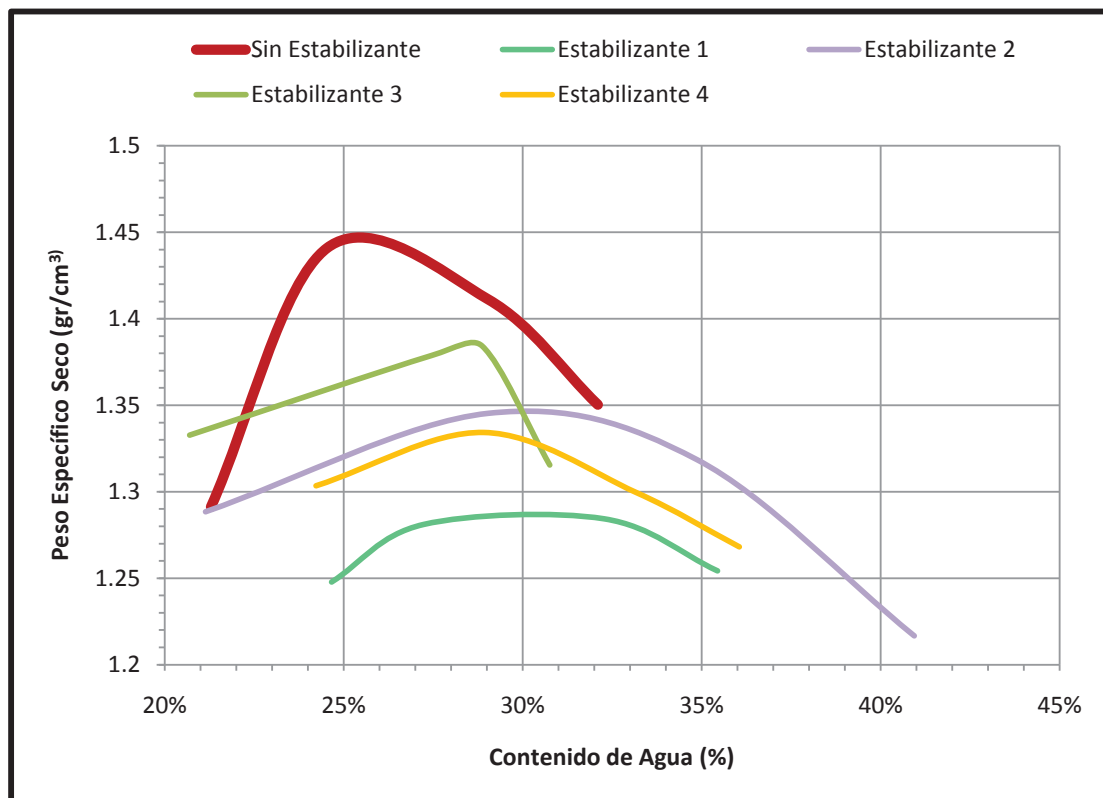
4.5.1 PRUEBA PROCTOR

De acuerdo al procedimiento que se mencionó en el capítulo anterior, que está basado en la norma M-MMP-1-09/06 (SCT), se presentan las figuras de **Peso Específico Seco Vs Contenido de Humedad Óptima** de cada una de las muestras en ANEXO A.2

De manera resumida, se presenta la gráfica del comportamiento de todas las muestras en la prueba Proctor (Gráfica 0-2).

En la Gráfica 0-2 se muestran todos los resultados de manera conjunta, así se observa el comportamiento que presentó el material con cada uno de los estabilizantes.





Gráfica 0-2. Resumen de Pruebas Proctor.

Un dato importante que se observa, es que al aplicar los estabilizantes al suelo, el peso específico seco disminuyó y el contenido de agua se incrementó.

De manera individual se vio que la disminución del material en estado natural con el estabilizante 1 fue de 50% menor y el incremento de humedad que presentó fue de un 5%.

Si se compara ahora el material en estado natural con el estabilizante 2, también se presentó el mismo fenómeno que se mencionó con el estabilizante anterior bajando en 30% el peso específico seco y el contenido de humedad óptimo también incrementó en 5%.

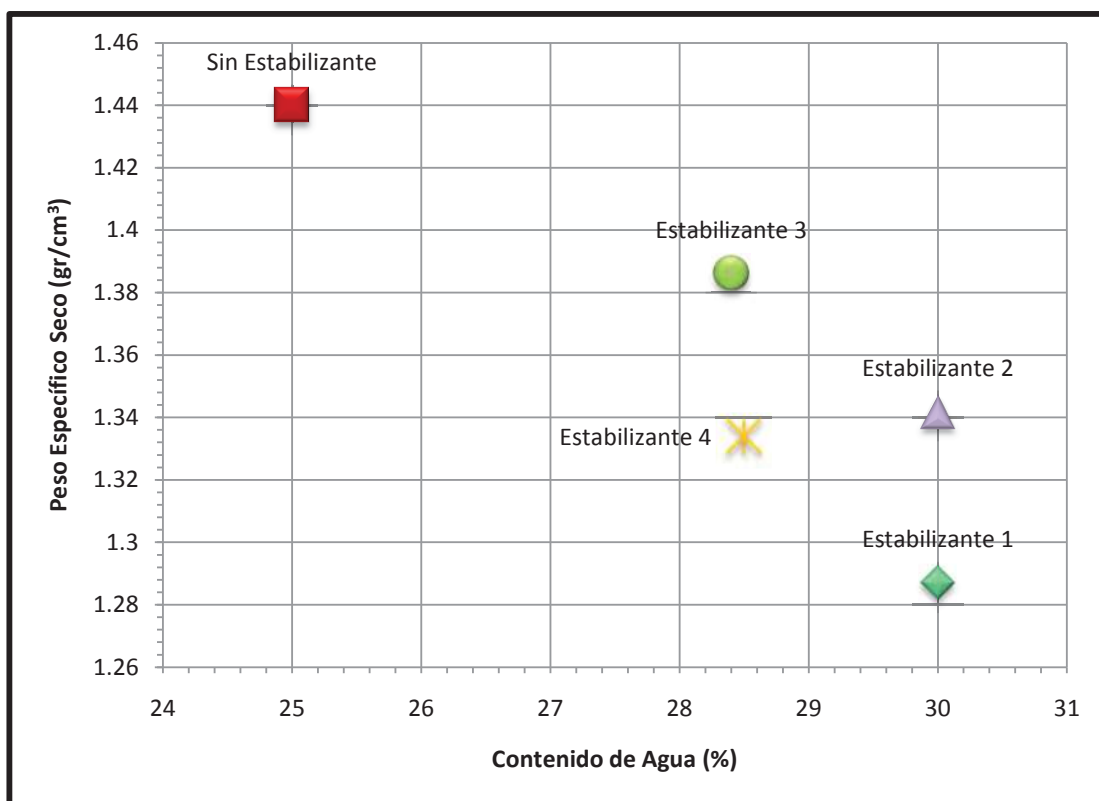
Para el estabilizante 3 se tiene una disminución del peso específico seco en un 15% y se tuvo un incremento de la humedad óptima en un 3%.





Para el estabilizante 4 se observa que presenta las mismas características que se han mencionado anteriormente, es decir, bajó el peso específico seco en 32% y se incrementó la humedad en un 3%.

En la Gráfica 0-3 se presentan los resultados del peso específico seco con su humedad óptima de cada uno de los estabilizantes y de la muestra en estado natural.

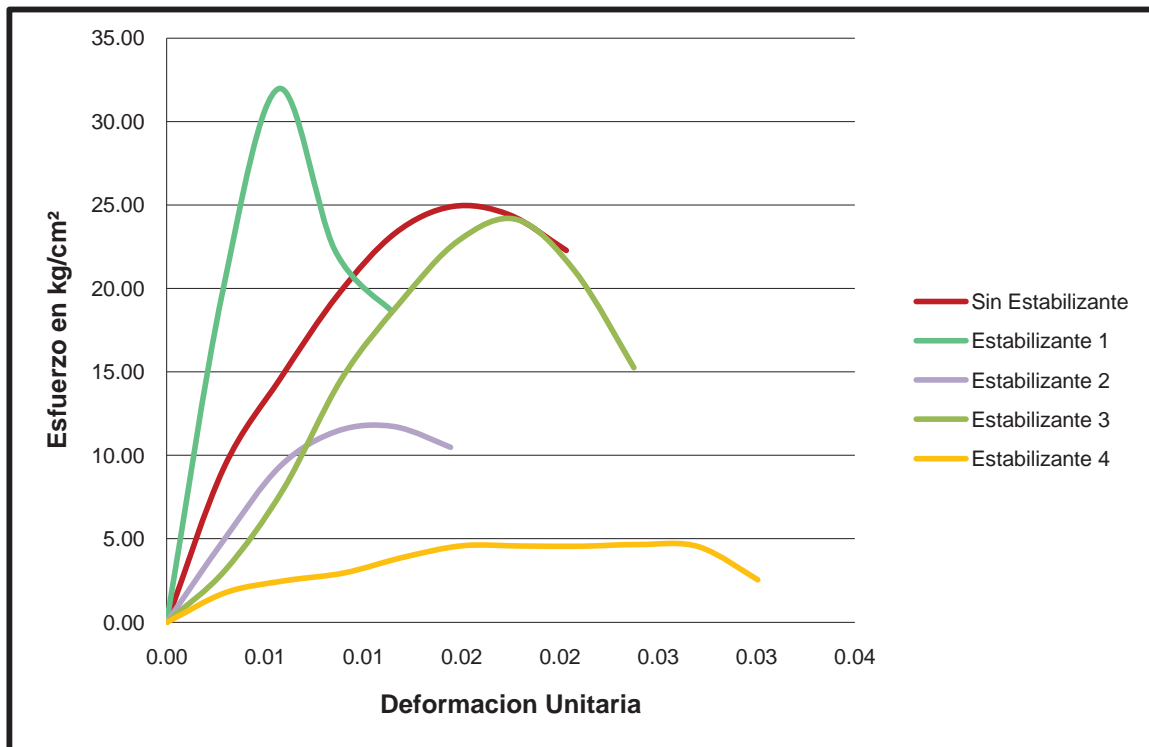


Gráfica 0-3. Peso Específico Seco – Humedad Óptima.

4.5.2 COMPRESIÓN SIMPLE

En la prueba de compresión simple se busca conocer la resistencia del suelo así que se analizará la Gráfica 0-4 donde se muestra el comportamiento que presentó el material en estado natural así como con cada uno de los estabilizantes.





Gráfica 0-4. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Compresión Simple.

Tabla 0-4. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. Compresión Simple.

	Esfuerzo desviador (Kg/cm ²)	Humedad (w%)
Sin Estabilizante	24.91	23.87%
Estabilizante 1	31.97	32.01%
Estabilizante 2	11.72	28.60%
Estabilizante 3	24.13	30.26%
Estabilizante 4	4.65	32.48%

Claramente se puede ver que el estabilizante 1 generó un incremento en la rigidez del material, como consecuencia se tuvo que la resistencia a carga axial incrementó.

Comparando ahora la muestra en estado natural con el estabilizante 3, se puede ver que su comportamiento es semejante, su resistencia a carga axial fue un poco menor que el suelo en estado natural.





Ahora comparando con el estabilizante 2 se observa que su resistencia bajó hasta un 50% y que además no tuvo mucha deformación.

Si se compara el estabilizante 4, se observa que su resistencia a carga axial fue muy baja, pero tuvo una mayor deformación por lo que presentó una falla por deformación (falla de barril).

4.5.3 PRUEBAS TRIAXIALES RAPIDAS

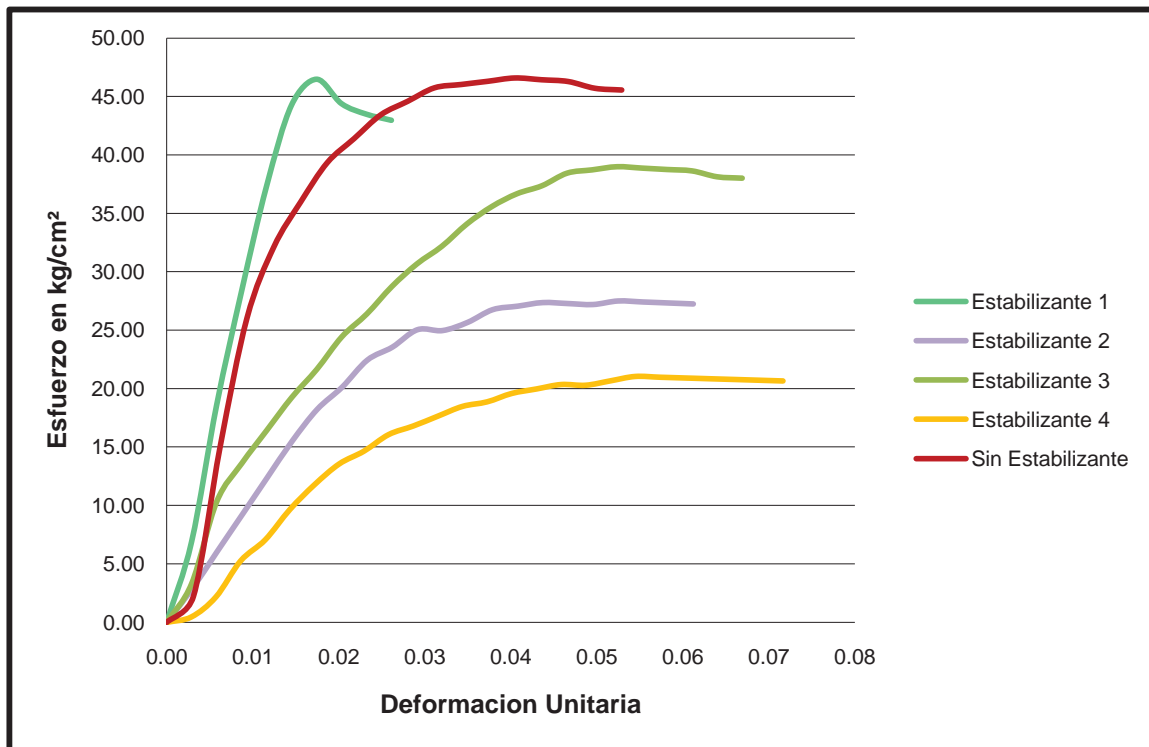
Estas pruebas se realizaron con una presión de confinamiento de 0.3, 0.6 y 0.9 kg/cm². Más aparte, su contenido de humedad se procuró que fuera el óptimo.

En la Gráfica 0-5 se tiene la primera prueba que se realizó con un confinamiento de 0.3 de kg/cm². En esta gráfica se pueden comparar los resultados obtenidos ya que se muestra que el estabilizantes 1 tuvo mayor rigidez que todos los demás pero su esfuerzo desviador fue igual que el material en estado natural tal y como se muestra en la Tabla 0-5. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.3 \text{ Kg/cm}^2$. Tabla 0-5.

Con los estabilizantes 2 y 4 el esfuerzo desviador bajó un 45% con respecto a la muestra en estado natural y también su rigidez bajó.

Con el estabilizantes 3 se tiene que bajó la rigidez y su esfuerzo desviador bajó en un 20%.





Gráfica 0-5. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.3 \text{ Kg/cm}^2$.

Tabla 0-5. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.3 \text{ Kg/cm}^2$.

	Esfuerzo desviador (Kg/cm ²)	Humedad (w%)
Sin Estabilizante	46.58	22.59%
Estabilizante 1	46.47	31.82%
Estabilizante 2	27.50	28.36%
Estabilizante 3	38.98	29.51%
Estabilizante 4	21.05	33.11%

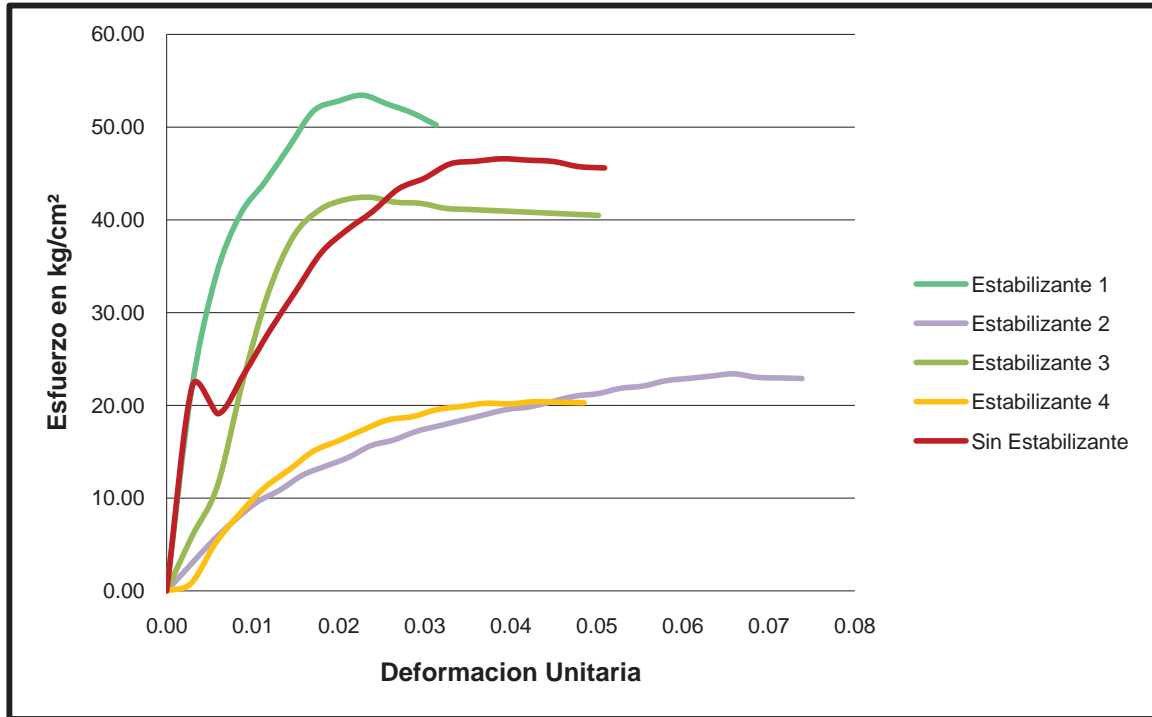
La Gráfica 0-6 presenta los resultados de la prueba Triaxial con un confinamiento de 0.6 kg/cm^2 , aquí se puede ver que el estabilizante 1 siguió manteniendo una mayor rigidez y un esfuerzo desviador mayor que la muestra en estado natural (Tabla 0-6).

Los otros tres estabilizantes siguieron manteniendo su tendencia como se ha observado con las pruebas anteriores, disminuyendo el esfuerzo desviador.





Las mezclas con los estabilizantes 1 y 4 tuvieron una mayor deformación y el estabilizante 3 mantuvo su comportamiento muy semejante al material en estado natural.



Gráfica 0-6. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.6 \text{ Kg/cm}^2$.

Tabla 0-6. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.6 \text{ Kg/cm}^2$.

	Esfuerzo desviador (Kg/cm ²)	Humedad (w%)
Sin Estabilizante	46.58	23.47%
Estabilizante 1	53.42	31.32%
Estabilizante 2	23.40	27.84%
Estabilizante 3	42.43	28.70%
Estabilizante 4	20.42	33.41%

La Gráfica 0-7 presenta el comportamiento de la prueba Triaxial con un confinamiento de 0.9 kg/cm^2 , aquí se puede ver que el estabilizante 1 siguió manteniendo una mayor rigidez y un esfuerzo desviador mayor que la muestra en estado natural. (Tabla 0-7).

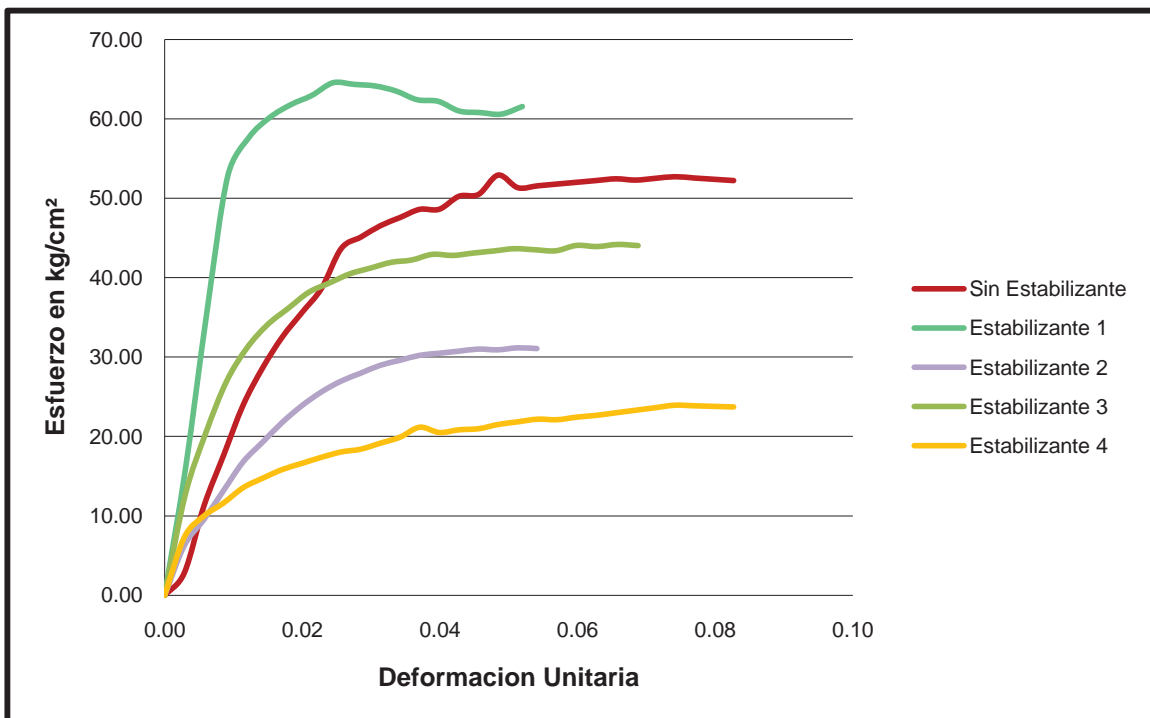




Los otros tres estabilizantes siguieron manteniendo su tendencia como se ha observado con las pruebas anteriores, disminuyendo el esfuerzo desviador.

Las mezclas con los estabilizantes 1 y 4 tuvieron una mayor deformación así como una menor resistencia a la carga axial.

Algo importante a resaltar es que el estabilizante 3 se comportó muy parecido durante todas las pruebas, al material sin estabilizante.



Gráfica 0-7. Gráfica Esfuerzo – Deformación. Prueba Triaxial $\sigma_3 = 0.9 \text{ Kg/cm}^2$.

Tabla 0-7. Esfuerzo desviador y porcentaje de humedad. $\sigma_3 = 0.9 \text{ Kg/cm}^2$.

	Esfuerzo desviador (Kg/cm ²)	Humedad (w%)
Sin Estabilizante	52.92	23.39%
Estabilizante 1	64.53	31.66%
Estabilizante 2	31.17	28.43%
Estabilizante 3	44.17	29.33%
Estabilizante 4	23.92	32.03%





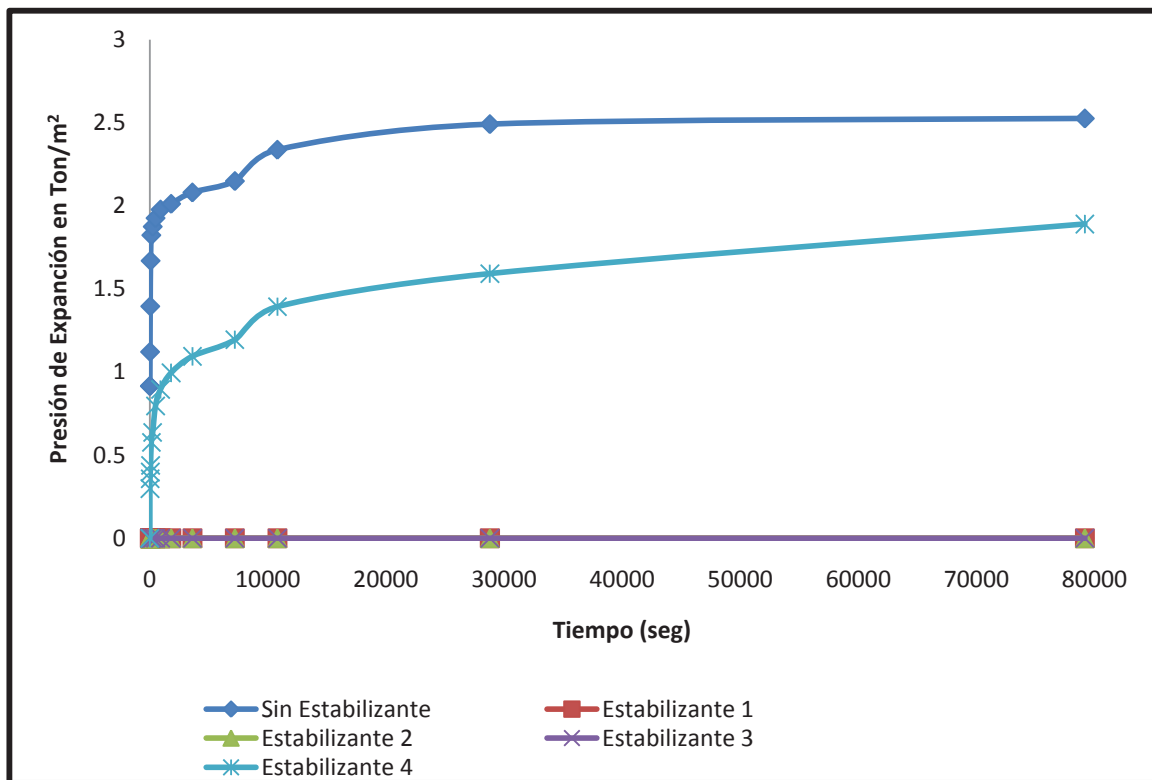
4.5.4 PRUEBA DE PRESIÓN DE EXPANSIÓN

En los resultados de la

Gráfica 0-8 se puede observar que la muestra de suelo sin estabilizante así como la muestra que contiene el estabilizante 4, presentaron expansión

Los estabilizantes 1, 2 y 3 se mantuvieron en cero indicando esto que el material no tendió a expandirse.

El estabilizante 4 presenta expansión, pero se observa que esta es a la mitad del material en estado natural con lo que se demuestra, que si se presenta un efecto de estabilización en el material.



Gráfica 0-8. Presión de Expansión.



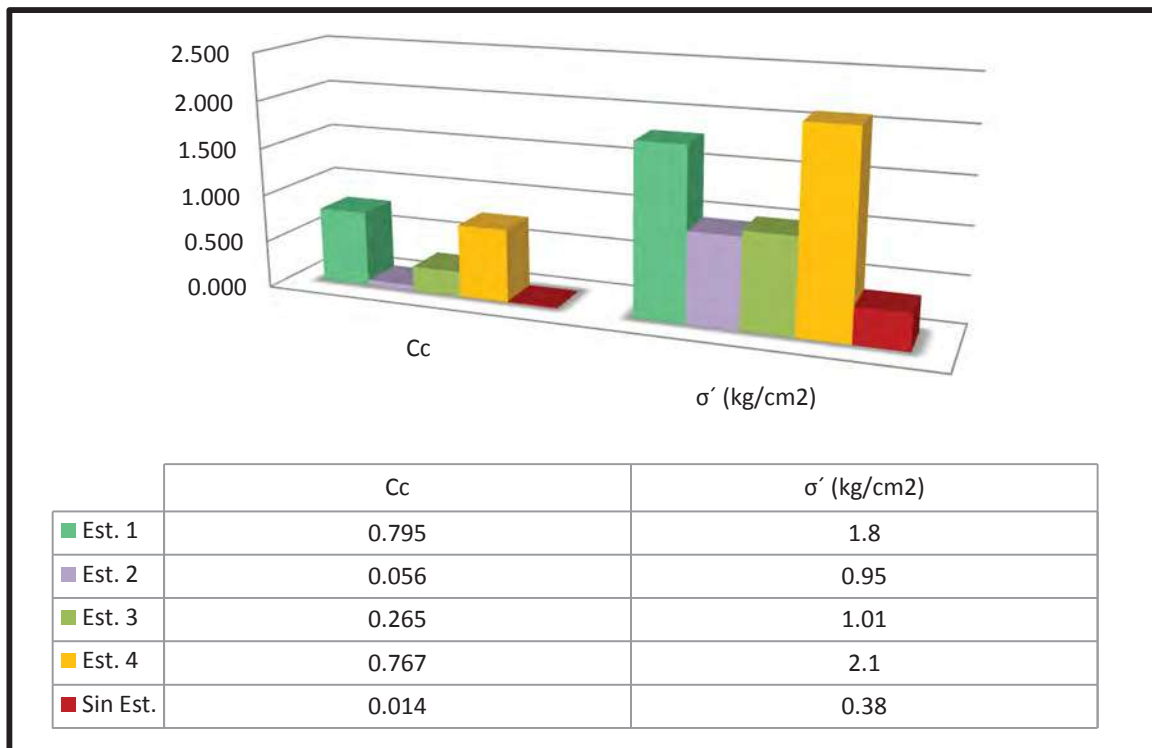


4.5.5 PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN

En este apartado solo se presentan de manera muy resumida los resultados más importantes de la consolidación. La Gráfica 0-9 presenta los valores de índice de compresibilidad (C_c) y el esfuerzo de preconsolidación (σ').

En los resultados mostrados en la Gráfica 0-9 se observa que los valores del índice de compresibilidad de las muestras con estabilizante, varían con respecto a la de la muestra de material en estado natural, por lo tanto, se puede definir que mientras más grande es este valor, su compresibilidad será mayor ya que esto representa la pendiente que existe en el tramo virgen (ANEXO A.3).

Lo mencionado anterior mente se puede comprobar con el siguiente valor graficado, ya que se observa que el suelo volvió a comportarse de la misma manera, confirmando que la compresibilidad que presenta el material es mucho menor que sin estabilizante.



Gráfica 0-9. Índice de Compresibilidad e Esfuerzo de Preconsolidación de Preconsolidación.



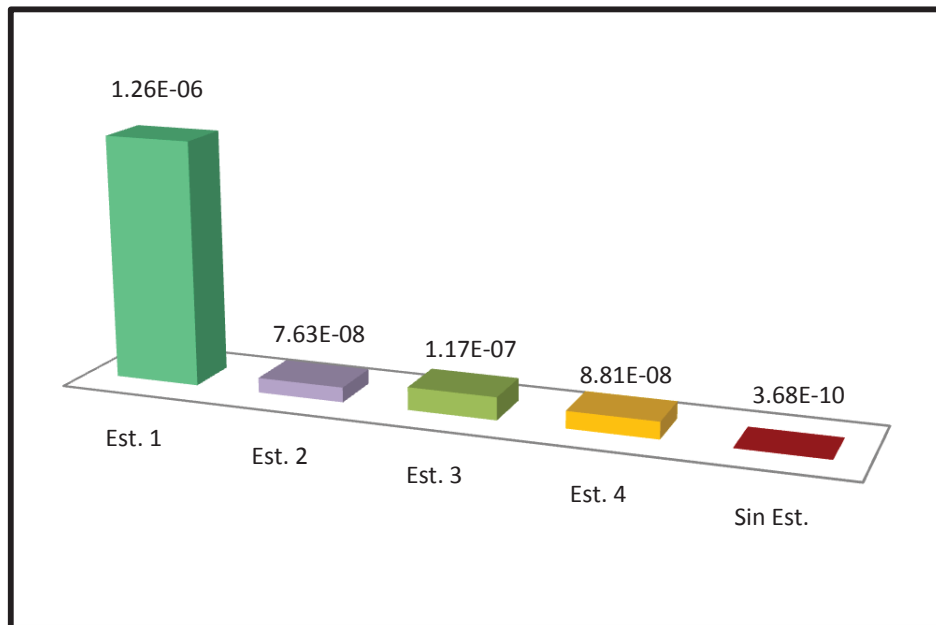


Los resultados de la Gráfica 0-10 muestran la permeabilidad tomada de manera indirecta dentro de la prueba de consolidación, en esta gráfica se observa que la muestra en estado natural presenta una permeabilidad mucho menor que cuando se le aplica el estabilizante.

El estabilizante 1 es el que presenta una permeabilidad mayor que los demás, indicando esto que su porosidad es mayor permitiendo que el flujo del agua sea mayor en menos tiempo.

Con los estabilizantes 2, 3 y 4 se tiene que también hay un incremento en la porosidad del suelo con respecto a la muestra sin estabilizante, permitiendo que estas muestras se vuelvan más permeables que la muestra en estado natural.

Para la obtención del t_{50} y las gráficas de presión efectiva vs relación de vacíos se pueden consultar las gráficas del ANEXO A.3.



Gráfica 0-10. Permeabilidad.





CONCLUSIONES.





5.1 Conclusiones del Estabilizante 1

Durante todas las pruebas realizadas se observó como este estabilizante mejoró algunas propiedades del suelo, es decir, como modificó totalmente su comportamiento.

A pesar que este estabilizante fue uno de los que se empleo en mayor porcentaje, se observa que fue el que modificó en mayor parte las propiedades de la arcilla bajando su límite plástico a cero y como consecuencia el material se convirtió en un limo arenoso, otro punto importante a mencionar es que con este estabilizante las contracciones fueron muy pequeñas siendo esto muy favorable.

Con las pruebas de resistencia se tuvo como resultado que el estabilizante 1 incrementó en 25% su resistencia en compresión simple, que presentó una rigidez mucho mayor que todas las muestras y que su presión de expansión fue de cero a pesar de que el material se mantuvo saturado.

Para la prueba de consolidación este estabilizante fue el que arrojó mejores resultados, ya que como se ha mencionado, las propiedades del material fueron cambiadas radicalmente y se hicieron presentes en esta prueba bajando su compresibilidad y haciendo más permeable al material y con esto disminuir sus cambios volumétricos.





5.2 Conclusiones del Estabilizante 2

Durante todas las pruebas realizadas se notó como este estabilizante tuvo diferentes comportamientos con el suelo, mejorando algunas propiedades.

Una aspecto importante es que el porcentaje estabilizante empleado disminuyó en un 50% con respecto al anterior. Este estabilizante fue otro de los que cambió completamente su clasificación, ya que de ser una arcilla de alta plasticidad pasó a ser un limo de baja plasticidad.

Este cambio no representó un gran mejoramiento dentro de la comparación con los demás estabilizantes. Un claro ejemplo fue en los resultados de compresión simple donde este material fue uno de los que presentó más baja resistencia al igual que una deformación muy pequeña, siendo similar su comportamiento dentro de las pruebas triaxiales.

Dentro de la prueba de presión de expansión, el estabilizante se comportó de excelente manera evitando que el material se expandiera, es decir, durante las 24 horas de prueba, mantuvo una presión de expansión igual a cero.

En la consolidación fue el que tuvo menor éxito comparado con los demás estabilizantes, pero si se observó una mejoría ya que tuvo una pequeña e incrementar la porosidad.





5.3 Conclusiones del Estabilizante 3

Durante todas las pruebas realizadas se observó como este estabilizante tuvo diferentes comportamientos con el suelo, mejorando algunas propiedades.

Este estabilizante fue uno de los que se trabajaron, junto con el estabilizante 2, a menor porcentaje ya que sólo se requirió del 3% y además fue el que presentó mejores resultados dentro de las pruebas índice porque no hubo un cambio en su clasificación, es decir, se mantuvo como una arcilla de alta plasticidad aunque si bajaron sus parámetros.

Dentro de las pruebas de resistencia su comportamiento fue muy parecido al del material en estado natural, realmente el esfuerzo desviador que se presentó fue muy parecido a la muestra sin estabilizante.

Fue casi similar en las pruebas triaxiales ya que el material tuvo un comportamiento muy parecido a la muestra en estado natural, es decir, siempre presentando valores por debajo de este pero superiores con respecto al estabilizante 2.

Dentro de la prueba de presión de expansión, el estabilizante se comportó de excelente manera evitando que el material se expandiera, es decir, durante las 24 horas de prueba, mantuvo una presión de expansión igual a cero.

Lo que se puede decir con la consolidación es que en esta prueba el material no presentó un comportamiento parecido al de la muestra en estado natural, aquí si se vio un mejoramiento bajando la compresibilidad del suelo e incrementando su permeabilidad.





5.4 Conclusiones del Estabilizante 4

Durante todas las pruebas realizadas se vio como este estabilizante tuvo diferentes comportamientos con el suelo, mejorando algunas propiedades.

Este estabilizante fue el único en presentación líquida así como también se observó que durante las pruebas de determinación de la cantidad de estabilizante, no alcanzó el ph de 12.4. De esta manera se tomó la decisión de tomar el porcentaje más alto pero a pesar de eso, el estabilizante reflejó un buen desempeño con la arcilla.

En las pruebas índices modificó su clasificación ya que de ser una arcilla de alta plasticidad, pasó a ser un limo de alta plasticidad, pero sus contracciones volumétricas se asemejan al material en estado natural.

En los resultados de las pruebas de resistencia mecánica se tiene que fue el que menor resistencia presentó y en la prueba de expansión también fue el único que presentó expansión, pero en una proporción menor que el material en estado natural.

Dentro de la prueba de consolidación si se notó la afectación en el suelo, el estabilizante logró bajar la compresibilidad de suelo y también logró bajar la permeabilidad haciendo al material más permeable.





5.5 CONCLUSIONES GENERALES

Llegando al final de esta investigación, se debe concluir de manera general que si se analizan todos los resultados, se puede decir que el mejor comportamiento que se tiene de las mezclas suelo-estabilizante es con el estabilizante 1, ya que mejoró de un 70 a 95 % todas las propiedades índice y mecánicas del suelo.

El empleo del estabilizante 1 se puede usar desde el mejoramiento del suelo para una cimentación, una plataforma o hasta para las capas de un pavimento, teniendo siempre en cuenta que la proporción del estabilizante dependerá de los volúmenes a utilizar.

Hablando de los demás estabilizantes, se puede llegar a la conclusión de que abren un gran campo de estudio para continuar con esas investigaciones ya que se puede seguir modificando la composición química de estos para tener mejores resultados y seguir perfeccionando el estabilizante 1 para mejorar su comportamiento.





BIBLIOGRAFIA.





1. Asociación Americana de Constructores de Carreteras (1982), Manual de Construcción para estabilización con cal, Editorial Anfagal.
2. Fernández Loaiza, C. (1982), "Mejoramiento y Estabilización de Suelos", Editorial Limusa, México.
3. Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (2006), "Fundamentos de la Mecánica de Suelos", Editorial Limusa, México.
4. Lawrence W. (1965), "Clay-Water Systems", State University of New York College of Ceramics.
5. Das M. B. (2001), "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Editorial Thompson Learnin.
6. Del Castillo, R. (2008), "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres 1: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas", Editorial Limusa, México.
7. Olivera Bustamante, F. (2006), "Estructuración de Vías Terrestres", Editorial CECOSA, Segunda Edición, Octava reimpresión, México.
8. Valdez Guzmán, C. (2008), "Estudio comparativo de estabilización de un suelo arcilloso altamente expansivo, utilizando un co-polimero multienzimático", Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH.
9. Domínguez J. M. y Issac Schifter (1995), "Las Arcillas: El barro noble", Editorial Fondo de Cultura Económica, México.





10. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-01/03, Muestreo de Materiales para Terracerías, México.
11. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-03/03, Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras, México.
12. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-04/03, Contenido de Agua, México.
13. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-05/03, Densidades relativas y Absorción, México.
14. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-07/03, Límites de Consistencia, México.
15. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Normativa para la Infraestructura del Transporte, Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales, M.MMP-1-09/03, Compactación AASHTO, México.
16. http://cmcguillermos.blogspot.com/2009_10_01_archive.html
17. <http://www.oncnosis.com/images/nanotecnologia.jpg>
18. <http://axxon.com.ar/rev/110/c-110Nanotecnologia.htm>





ANEXO A





A.1. Pruebas de Campo

A.1.1. Dilatancia

Se toma una porción de aproximadamente 10 cm³ y se deposita en la mano donde se le agrega agua en cantidad tal que, al amasarla se obtenga una mezcla de consistencia suave que no presente flujo. Si al efectuar esta operación se excede la cantidad de agua agregada, la mezcla se extiende en la mano y se forma con ella una capa delgada que permita la pérdida por evaporación del exceso de agua.

Una vez que la mezcla ha obtenido la consistencia deseada, se forma con ella una pastilla. Con la palma de la mano ligeramente contraída se sujeta suavemente la pastilla y se sacude en dirección horizontal, golpeando varias veces y en forma vigorosa la mano que la contiene contra la otra mano, a fin de provocar la salida del agua a la superficie, lo cual queda de manifiesto cuando dicha superficie toma una apariencia lustrosa. Al ocurrir esto, se presiona ligeramente la pastilla con los dedos para provocar que el agua desaparezca de la superficie y ésta pierda su lustre.

Se estima la rapidez con que la superficie de la pastilla toma la apariencia lustrosa al golpear, así como la rapidez con que desaparece ese lustre al presionarla. Se reporta la dilatancia como:

- ♦ Rápida
- ♦ Lenta
- ♦ Nula

Una dilatancia rápida es típica de arena fina y de arena limosa (SM) no plástica, así como de algunos limos inorgánicos (ML). Una dilatancia extremadamente lenta o nula es típica de la arcilla (CL o CH).





A.1.2. Tenacidad

De la pastilla a que se formó en la prueba anterior, se toma una porción y se rola con la mano hasta formar un pequeño rollo de aproximadamente 3 mm. de diámetro. Se reamasa el material y se forma nuevamente el rollo, repitiéndose esta operación varias veces para que el material pierda el exceso de agua y el rollo se fragmente, lo que indica que el suelo ha alcanzado un contenido de agua similar al del límite plástico.

Se estima el tiempo necesario para que el material alcance el contenido de agua correspondiente al límite plástico, así como la resistencia que opone a ser comprimido el rollo. La tenacidad se reporta como:

- ♦ Nula (tiempo corto y resistencia muy pequeña).
- ♦ Media (tiempo medio y resistencia media).
- ♦ Alta (tiempo largo y resistencia alta).

Una tenacidad alta es típica de la arcilla (CL o CH), mientras más alta es la tenacidad, el material será más compresible. Una tenacidad media o nula es típica de limo y limo orgánico.

A.1.3. Resistencia en estado seco

Se toma una porción de material, y se forma una pastilla de aproximadamente 4 cm de diámetro y 1 cm de espesor.

La pastilla se coloca en un medio adecuado para que pierda lentamente su contenido de agua, hasta que se aprecie visiblemente seca; posteriormente se rompe y se desmorona con los dedos. Si al romper la pastilla se observa que aún contiene agua, se continúa con el secado del material y posteriormente se rompen y desmoronan las fracciones.





Se estima la dificultad que presenta la pastilla a romperse y desmoronarse; de acuerdo con lo anterior se reporta la resistencia en estado seco como:

- ♦ Nula.
- ♦ Media.
- ♦ Alta.

Una alta resistencia en estado seco es característica de una arcilla de alta plasticidad (CH). Una resistencia en estado seco nula es típica de un limo (ML o MH).

A.1.4. Color

El color del suelo suele ser un dato útil para diferenciar los distintos estratos y para identificar tipos de suelo, cuando se posee experiencia. Existen algunos criterios relativos al color, por ejemplo, el color oscuro suele ser indicativo de la presencia de materia orgánica o de su naturaleza básica (ferro magnesiano), y los colores claros y brillantes son más bien propios de suelos ácidos (sílices).

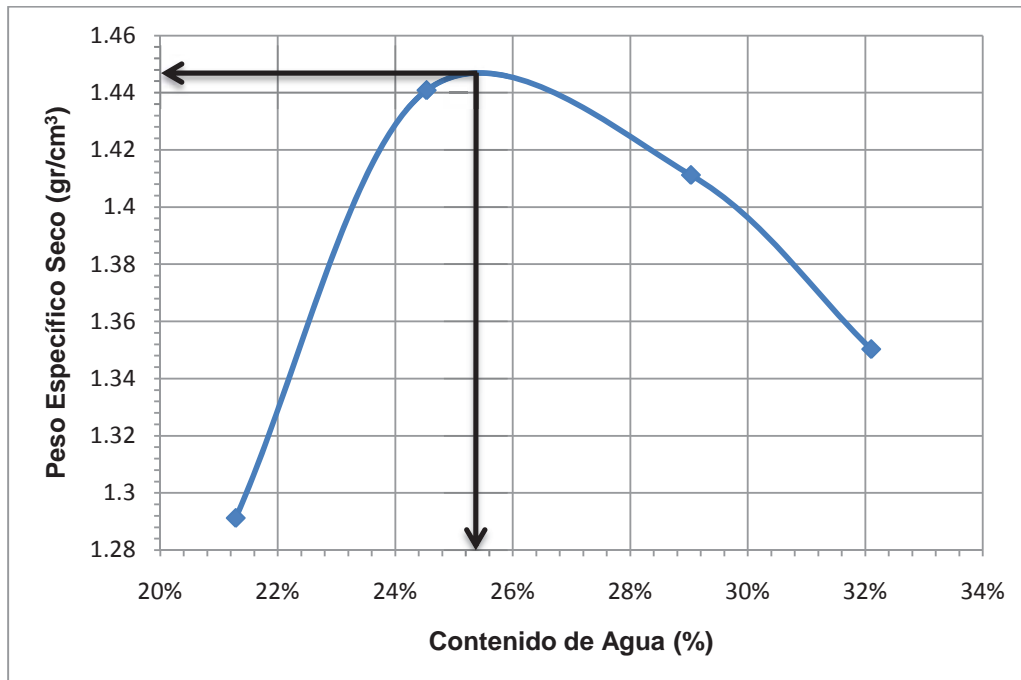
A.1.5. Olor

Los suelos orgánicos (OL y OH) tienen por lo general un olor distintivo, que puede usarse para su identificación. El olor es particularmente intenso si el suelo está húmedo y disminuye con la exposición al aire, aumentando, por lo contrario, con el calentamiento de la muestra húmeda. Los suelos altamente orgánicos (Turba) prenden estando secos





A.2. Prueba Proctor.



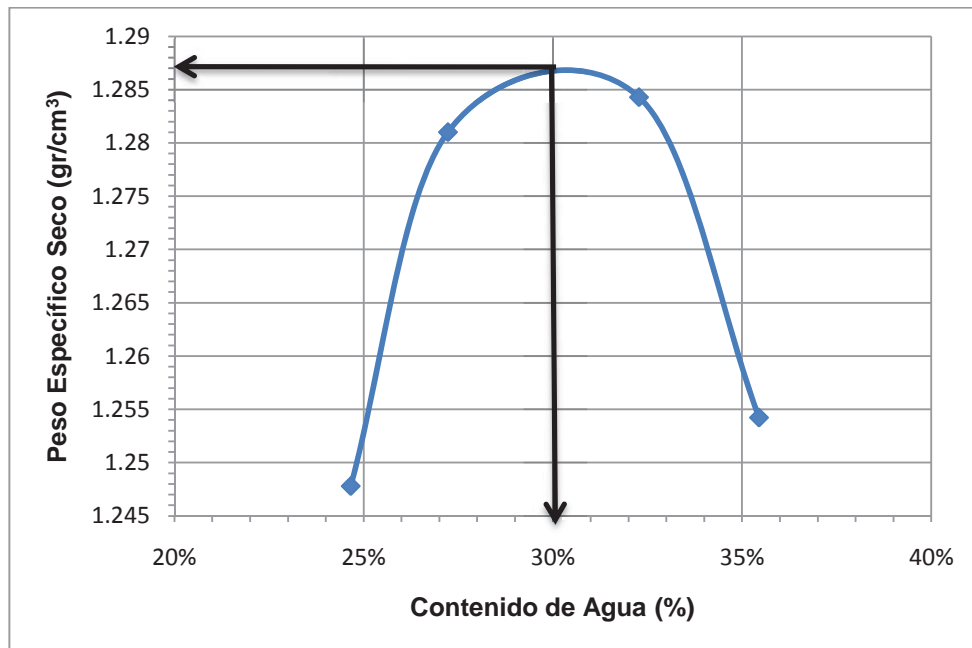
A.2.1. Prueba proctor sin estabilizante

A.2.2. Prueba proctor sin estabilizante.

Tabla de Resultados

W %	25.5
Peso Específico γ (gr/cm ³)	1.445



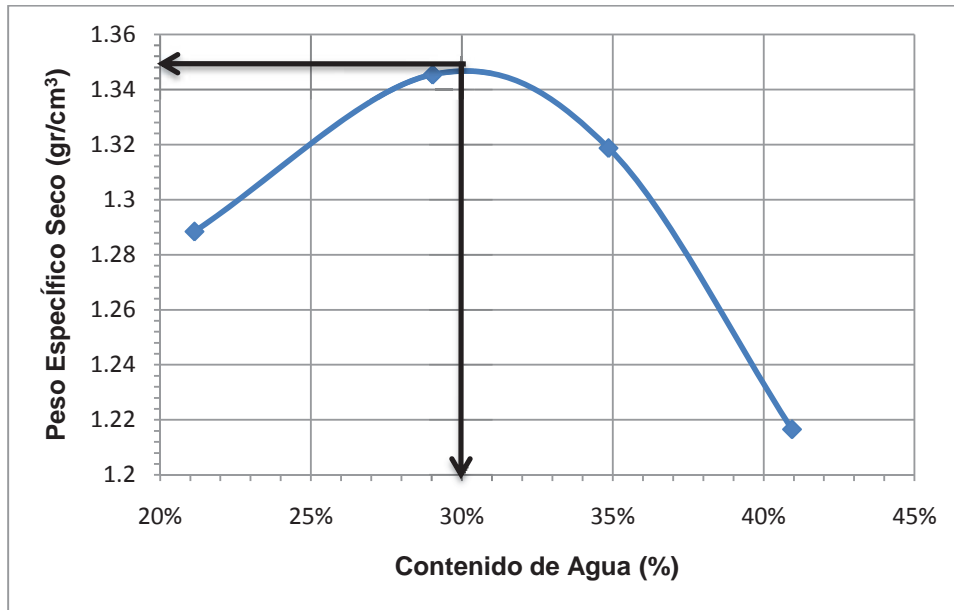


A.2.3. Gráfica de Prueba proctor estabilizante 1

A.2.4. Tabla de Resultados de Prueba proctor estabilizante 1.

Tabla de Resultados	
W %	30
Peso Específico γ (gr/cm ³)	1.287



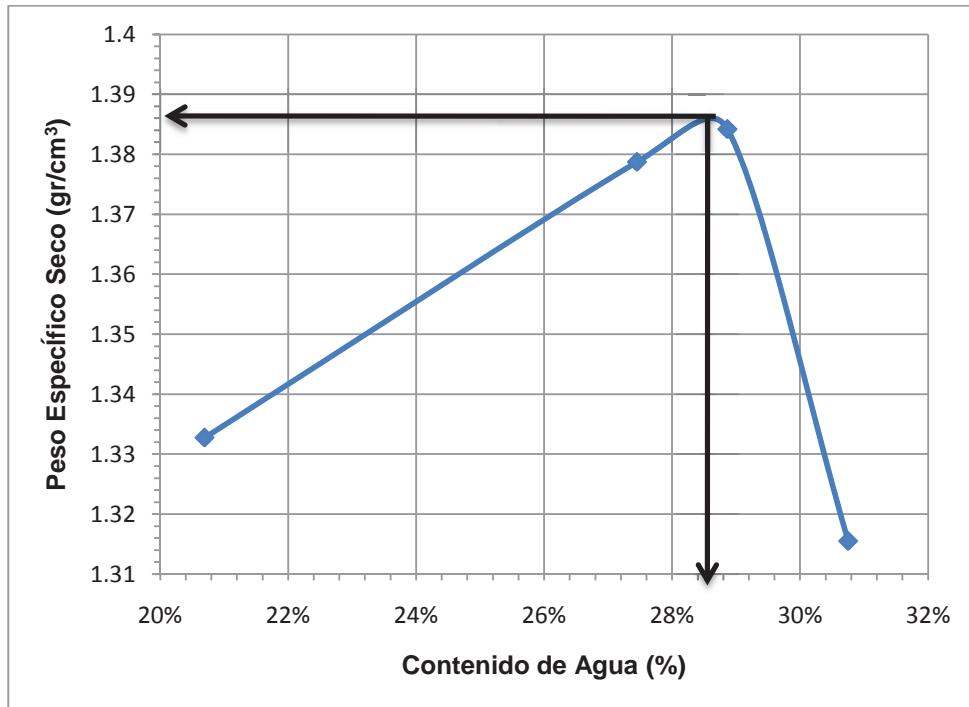


A.2.5. Gráfica de Prueba proctor estabilizante 2

A.2.6. Tabla de Resultados de Prueba proctor estabilizante 2

Tabla de Resultados	
W %	30
Peso Específico γ (gr/cm ³)	1.342



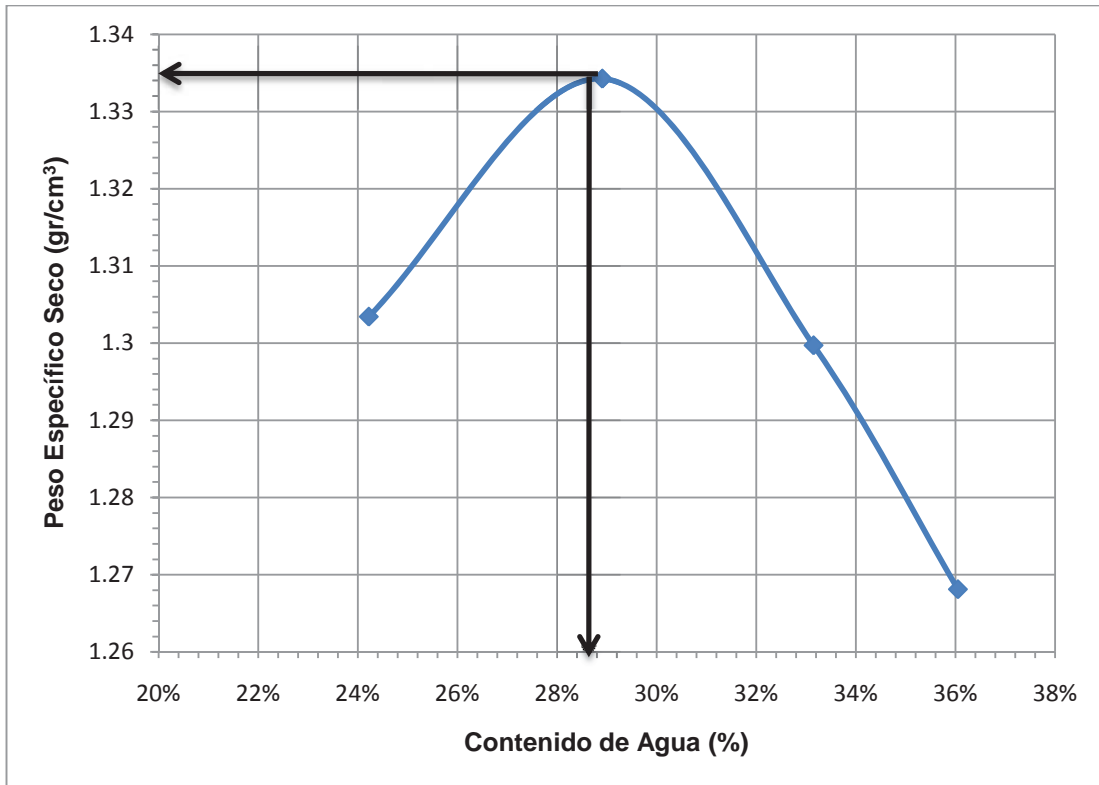


A.2.7. Gráfica de Prueba proctor estabilizante 3

A.2.8. Tabla de Resultados de Prueba proctor estabilizante 3

Tabla de Resultados	
W %	28.4
Peso Especifico γ (gr/cm ³)	1.386





A.2.9. Gráfica de Prueba proctor estabilizante 4

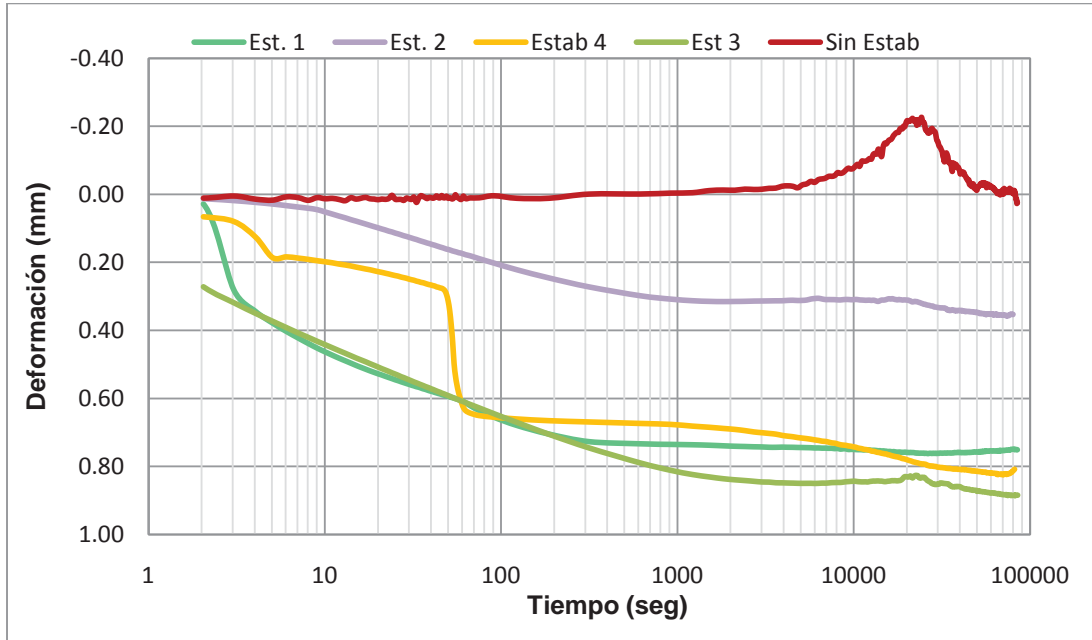
A.2.10. Tabla de Resultados de Prueba proctor estabilizante 4

Tabla de Resultados	
W %	28.5
Peso Específico γ (gr/cm ³)	1.334

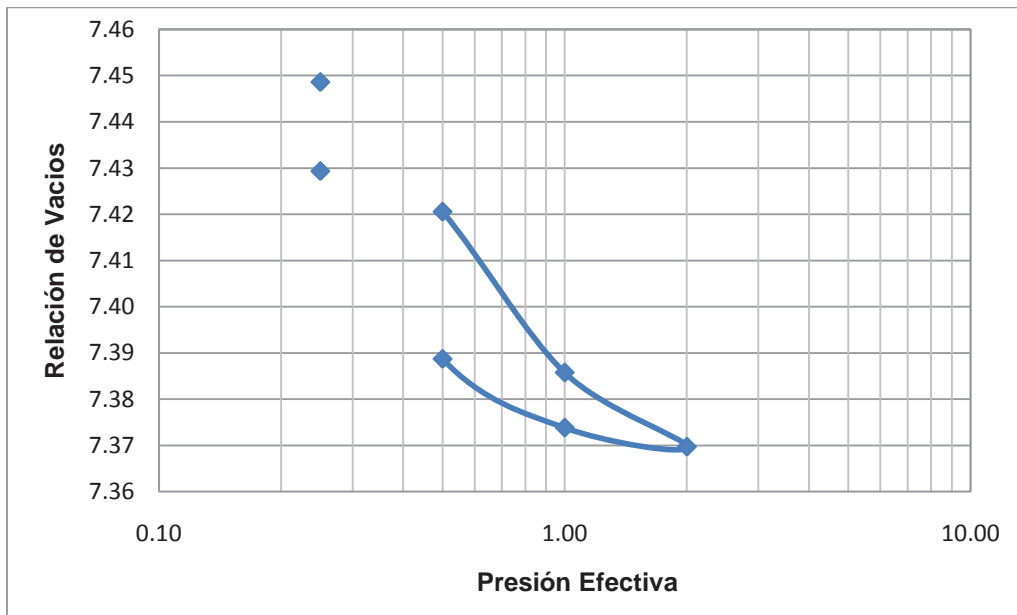




A.3. Prueba de Consolidación.

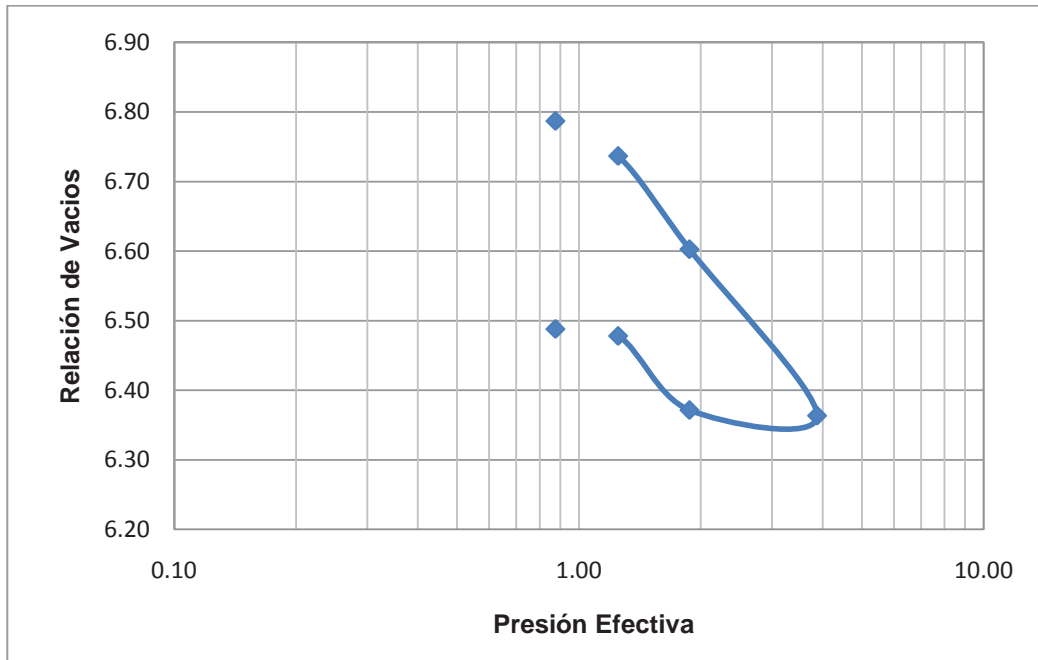


A.3. 1. Gráfica de Deformación vs Tiempo

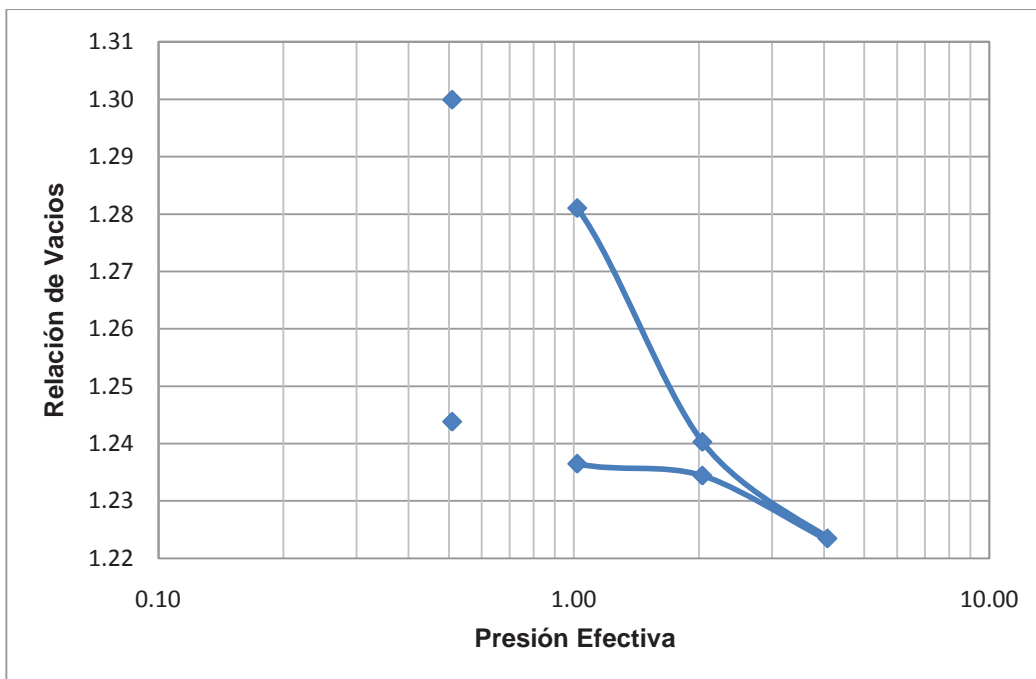


A.3. 2. Graficas de Presión Efectiva Vs Relación de Vacíos. Sin Estabilizante.



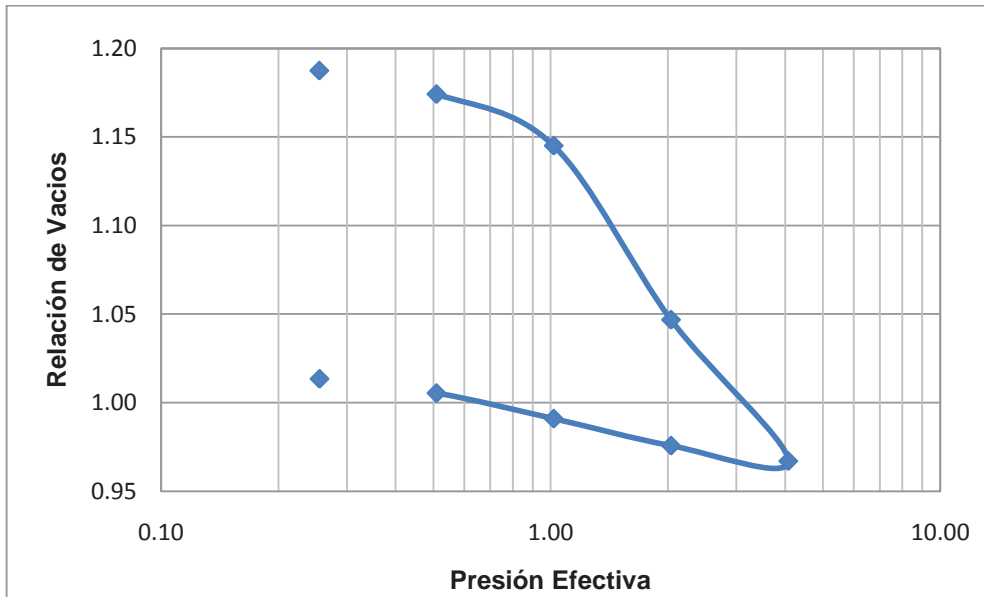


A.3. 3. Graficas de Presión Efectiva Vs Relación de Vacíos. Estabilizante 1.

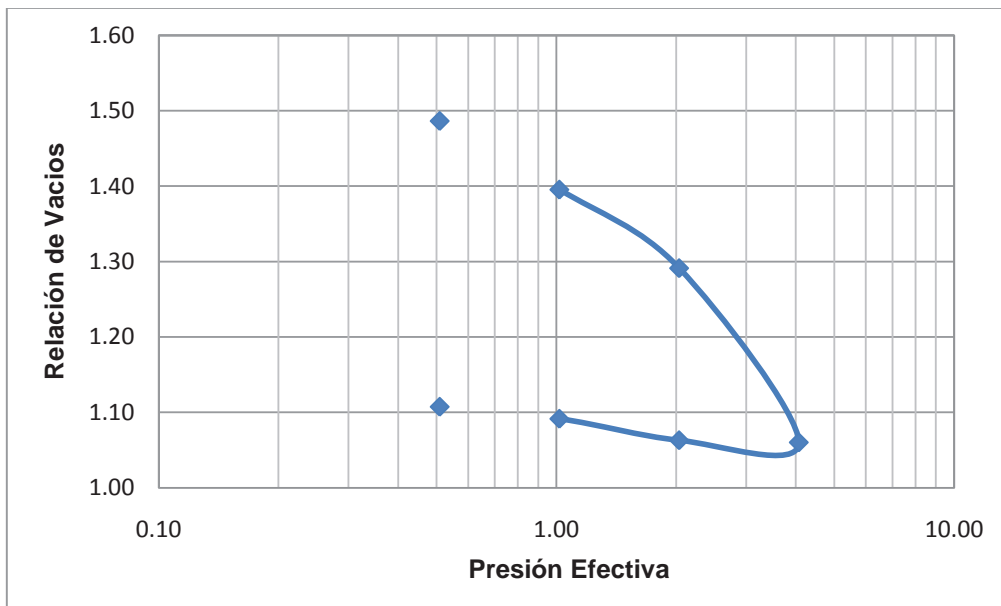


A.3. 4. Graficas de Presión Efectiva Vs Relación de Vacíos. Estabilizante 2.





A.3. 5. Graficas de Presión Efectiva Vs Relación de Vacíos. Estabilizante 3.



A.3. 6. Graficas de Presión Efectiva Vs Relación de Vacíos. Estabilizante 4.

