



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

**“MEJORAMIENTO DE SUELOS CON APLICACIÓN  
A UN CASO PRÁCTICO”**

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**Ingeniero Civil**

PRESENTA

**MARTÍN CRUZ LÓPEZ**

**ASESOR: Dr. RICARDO ORTIZ HERMOSILLO**

Naucalpan de Juárez, Edo. de Méx.

Enero 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIAS

Dedico humildemente éste esfuerzo a Dios Padre, por mantenerme siempre firme con fe y vivir con la esperanza de continuar proponiéndome para alcanzar metas y retos, del mismo modo por tomar de mi mano y convertirse en mí guía en todo momento. Gracias Dios por permitirme llegar hasta éste momento de mi vida y por tus bendiciones constantes.

A mis padres Sandra Luz López Domínguez y Martín Cruz Aguilar que son el mayor impulso que para mí existe sobre la faz de la tierra, con gran amor, por darme la vida, por su amor, por su tiempo, por darme mi formación basada en seguridad, cariño, paciencia y grandes valores, por sus lágrimas derramadas, por querer ver a mis hermanos y a mi ser felices, también por darme el ejemplo de superación, así como sus sabios consejos y apoyarme siempre hasta en mis más erróneas decisiones y sobre todo por ser mis amigos, los amo.

A mi hermano José Dolores Cruz López porque él me ha enseñado la fortaleza y el amor incondicional, al cual le agradezco su paciencia y comprender mis errores y mi deseo de seguir estudiando y preparándome, pues quiero con mi ejemplo demostrarle que seré un gran profesionista y sin desistir en mis propósitos.

A mis otros hermanos Sandra Patricia Cruz López y Gerardo Cruz López por su apoyo, amor y confianza brindada siempre, por los grandes momentos compartidos, por ser mis aliados y porque tienen mi admiración, los quiero mucho.

Dedico éste trabajo a mis abuelitos Flor de María Domínguez Medina, Luis Torres Canizales, Juan Cruz Lara, Fidelina Aguilar Zambrano, por su gran ejemplo de vivir la vida por más difícil que se les presente y también agradezco porque la distancia no ha sido obstáculo para saber que estamos juntos. Soy afortunado en disfrutar aún de su presencia y de su ternura.

Dedico este trabajo a Ismael Medina Saavedra un gran amigo que siempre ha estado en las buenas y en las malas, con quien he compartido momentos inolvidables en la Universidad y en los diferentes trabajos que hemos estado, y espero pronto logremos hacer cosas importantes en nuestras vidas, sin olvidar que es importante el crecimiento profesional pero también crecimiento personal.

Dedico con gran amor a las personas que fueron formando y criando durante mi infancia y camino, por haberme dado sus cuidados, su tiempo, amor, entereza y por haber sido mis compañeros: Reyna Torres Domínguez, Herminia Torres Domínguez, Gregoria Cruz Aguilar, Carmela Cruz Aguilar, Zenón Cruz Aguilar, Luz María Cruz Aguilar, Emmanuel Vázquez Cruz, Luis Alberto Vázquez Cruz, Olgalilia Vázquez Cruz, Joel Vázquez Cruz, Ofelia Carrera Martínez y familia e Ismael Medina Saavedra y familia.

---

A cada uno les dedico este fragmento de mi existir, pues cada una de ustedes ha forjado mi andar y consideren que dentro de nosotros tenemos un espíritu y ese es el que nos impulsa a ser mejores personas, a ir mas allá, a superarnos cada día más, porque la competencia hace que existan mejores profesionistas, gracias.

Le dedico amorosamente y con mucho respeto éste trabajo a una gran persona que llegó a mi vida en el momento perfecto Ofelia Carrera Martínez, por las palabras de motivación que me ha dado, por su confianza, por su apoyo incondicional, por su comprensión, por la amistad pura y sincera que me ha demostrado y sobre todo por existir. La quiero mucho.

**AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco profundamente a la mayor casa de estudios superiores de México y de América Latina conocida como la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de formar parte de ésta comunidad Universitaria, así como de tener la satisfacción y orgullo por siempre de ser egresado de ésta Institución.

Agradezco a las autoridades de la Facultad de Estudios Superiores Acatlán, a la División de Ingeniería y a la Facultad de Ingeniería, por ser mi alma mater, gracias por abrirme las puertas del conocimiento y hacer de mí una mejor persona.

Agradezco al ingeniero Alejandro Ortega Gómez por la facilidad que me brindó al completar el último capítulo para terminar este trabajo.

Al sínodo que me fue asignado conformado por: Padilla Correa Juan Víctor, Barrera Chávez Celso, Ortega Gómez Alejandro, Bravo Martínez Liborio Julián y Ortiz Hermosillo Ricardo Enrique.

Agradezco a todos los profesores que fueron partícipes de mi formación académica, por transmitirme sus conocimientos, experiencias, vivencias, consejos, principios, en especial a aquellos que se convirtieron en mis incondicionales amigos y siempre han tenido para mí palabras de aliento y motivación; a los Ingenieros: María Eugenia Espinosa Trejo, Ricardo Enrique Ortiz Hermosillo Manuel Gómez Gutiérrez, Héctor Arce Paz, Pablo Miguel Pavía Ortiz, Francisco Mejía Meza, Omar Ulises Morales Dávila, Ignacio Palomares Peña, Edith Figueroa García, Santacruz Chavando Iván y Leonardo Álvarez León.

Agradezco a la vez a todos mis compañeros y amigos con los cuales he compartido desde una banca de salón, hasta con los que he compartido momentos inmemoriales, grandiosas experiencias, y porque aún permanecen en amistad, con mucho cariño para ustedes: Mariano Medina Saavedra, Ángel Chavarría Beltrán, Mariel Toxcoyoa González, Verónica Monroy Ortiz, Dafne Cuervo González, Saida Belem Jiménez Escamilla, Rosario Rivas Rojas, Zulema Ayala Benítez, Víctor Hugo Sánchez Loredo, Hugo Ramírez Calzada, Hugo Enrique López Cruz, Iván Téllez Alvarez, Pérez Hernández David, Baltazar Olgún Ledesma, Jesús Mendoza Delgado, Laura Barajas Soriano, Humberto Salinas Palma, Eduardo Blanco García, Noemy León Flores y Sara Paredes González con gran afecto para ustedes por los esfuerzos de superación en los lapsos difíciles.

Agradezco a toda mi hermosa familia por estar constantemente a mi lado, al recuerdo de mi niñez, al recuerdo de la juventud y de la bendición que me dieron la cual llevo en mi pecho, en mi mente y en el corazón sin olvidarlos jamás.

---

# MEJORAMIENTO DE SUELOS CON APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

## ÍNDICE

OBJETIVO: En este trabajo se resumen algunos métodos que existen actualmente para el mejoramiento de los suelos, para mejorar sus propiedades y las ventajas que se obtienen al aplicarlos.

Introducción.....	1
-------------------	---

### CAPÍTULO 1 EL SUELO Y SU ORIGEN.

1.- Generalidades.....	2
1.1 Origen y procesos de formación de los suelos.....	3
Rocas ígneas.....	5
Rocas metamórficas.....	6
Rocas sedimentarias.....	7
1.2 Principales tipos de suelos.....	7
Gravas.....	8
Arenas.....	8
Limos.....	8
Arcillas.....	8
Loess.....	10
Tobas.....	10
Caliche.....	10
Gumbo.....	11
Diatomita.....	11
Suelos cohesivos, no cohesivos y friccionantes.....	11
1.3 Clasificación del suelo.....	11
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	12
Diámetro y tamaño de las partículas.....	13
Materia orgánica.....	13
Agua.....	14
Aire.....	14

### CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SUELO.

2.1 Generalidades.....	15
2.2 Forma, fases y esquemas del suelo.....	15
Forma.....	15
Fases.....	15
Esquema de una muestra de suelo.....	16
2.3 Estructuración de los suelos.....	17
Estructuración simple.....	17
Estructura panaloide.....	18
Estructura compuesta.....	18
Estructura dispersa.....	19
2.4 Granulometría.....	20
Clasificación del suelo por su tamaño.....	20

Gráfica granulométrica.....	22
2.5 Plasticidad.....	23
Límite líquido.....	24
Límite plástico.....	24
Índice de plasticidad.....	24
Límite de contracción.....	25
Carta de plasticidad.....	25
2.6 Propiedades mecánicas de los suelos... ..	26
Cohesión.....	26
Ángulo de fricción interna.....	27

### **CAPÍTULO 3 ALGUNOS MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.**

3.1 Introducción.....	28
3.2 Métodos Mecánicos.....	28
Compactación dinámica.....	29
Jet grouting.....	30
Rodillo pata de cabra.....	33
Rodillo liso.....	35
Rodillos vibratorios.....	37
3.3 Métodos Químicos.....	38
Mejoramiento del suelo con cal.....	39
Mejoramiento del suelo con cemento.....	42
Mejoramiento del suelo con asfaltos.....	45
3.4 Métodos Físicos.....	49
Geotextiles.....	49
Geomallas.....	52

### **CAPÍTULO 4 APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO.**

4.1 Introducción.....	56
4.2 Descripción del sitio.....	57
Recorrido geológico superficial.....	58
Características estratigráficas y físicas del suelo.....	58
4.3 Uso de la cal en suelos expansivos y arcillosos.....	59
4.4 Pruebas de laboratorio.....	60
4.5 Análisis de la cimentación.....	61
Estados límites de falla en condiciones estáticas.....	63
Estados límites de falla en condiciones dinámicas.....	64
Estado límite de servicio.....	65
4.6 Estabilización del suelo con cal.....	66
Excavaciones.....	67
Especificación de los materiales.....	69
Colocación del mejoramiento a base de cal.....	70
Colocación del material importado.....	73
Gráficas y figuras. ....	75
Conclusiones.....	98
Referencias.....	99

## INTRODUCCIÓN.

Cuando un suelo se mejora éste se somete a diferentes tratamientos para aprovechar mejor sus propiedades, de tal manera que puedan soportar las condiciones de carga y con ello rindan el tiempo de servicio adecuado que de ellos se espera.

Existen muchas técnicas para modificar las propiedades de un suelo, en éste trabajo se muestran algunos métodos de mejoramiento de suelos y su aplicación a un caso práctico.

En este trabajo se recopila la información necesaria para futuras consultas y se muestran los métodos más importantes.

El trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos.

El objetivo del primer capítulo es conocer el origen del suelo y los diferentes tipos de suelo para poder clasificarlos de una forma correcta. En este capítulo se muestra el origen, la formación y clasificación del suelo. Así como, los principales tipos de suelo de acuerdo al origen que éstos presentan como: las gravas, arenas, limos y arcillas. Se comenta también el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que es uno de los sistemas más utilizados en el país para clasificarlos.

El objetivo del segundo capítulo es conocer las características principales del suelo como: la forma, fases, esquema del suelo y las estructuras más importantes que presenta. También se expone la clasificación del suelo por el tamaño de sus partículas, sus propiedades índice como: plasticidad, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad y sus propiedades mecánicas como: la cohesión y el ángulo de fricción interna.

El objetivo del tercer capítulo es mostrar algunos métodos de mejoramiento de suelos. Se presentan los siguientes métodos de mejoramiento de suelos: Mecánico: compactación dinámica, jet grouting, pata de cabra, rodillo liso y rodillo vibratorio; Químico: cal, cemento, asfaltos y Físicos: geotextiles y geomallas, así como su proceso constructivo.

El objetivo del cuarto capítulo es presentar la aplicación de un mejoramiento de suelos. En este capítulo se describe un caso práctico de un mejoramiento de suelos a base de cal. Se muestra la descripción del sitio, las características estratigráficas y físicas del suelo, las pruebas de laboratorio que se realizaron, colocación del mejoramiento y material importado y el procedimiento constructivo.



## CAPÍTULO 1 EL SUELO Y SU ORIGEN.

### 1.- GENERALIDADES.

Uno de los mayores riesgos que pueden correrse en el campo de la ingeniería es realizar una construcción sin hacer un estudio de Mecánica de Suelos. Es incorrecto proyectar una cimentación sin conocer las características del suelo que se encuentran debajo de ella.

En este trabajo se muestran algunos métodos que se usan para mejorar el suelo y las diferentes alternativas que son útiles en el desarrollo profesional. Esta tesina es útil a todos los estudiantes de ingeniería que se interesen en el tema, así como para quienes proyectan, construyen o diseñan.

Sin embargo, se desea que ingenieros de otras áreas también puedan encontrar en éste documento información de utilidad.

En su trabajo práctico el ingeniero se encuentra con muy diversos e importantes problemas relacionados con el suelo. Uno de los principales problemas es el no encontrar el tipo de suelo con las propiedades adecuadas para el trabajo que se va a realizar, ya que éste en su estado natural no siempre cumple con las características de esfuerzo-deformación (resistencia) deseada.

En algunos casos el suelo se puede utilizar tal y como se encuentra en su estado natural, en otros casos puede ser eliminarlo y sustituirlo por otro que se considere que será de mejor calidad para los fines que se buscan, o bien modificar las propiedades de los suelos existentes y con ello cumplir con las características del material.

Se entiende por estabilización a todos los procedimientos que logran una mejoría en las propiedades de los suelos: aumentar la resistencia y rigidez dinámica de un suelo blando. Por lo general la estabilización se usa como un método para mejorar el suelo, en el caso de suelos blandos su objetivo es aumentar su resistencia y disminuir su compresibilidad, este objetivo se logra al reducir su relación de vacíos o al mezclar con un agente estabilizador. Generalmente los agentes que se usan son: cal viva, cemento o una mezcla de ambos.

La estabilización también se usa en áreas donde las capas del subsuelo con menor resistencia están situadas a poca profundidad, es decir a unos pocos metros del nivel del suelo.

Al enfrentar problemas de estabilización de suelos se requiere complementar la información con la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para determinar el tipo de material que contiene el suelo, dado que

dependen en forma directa la estabilidad volumétrica, cohesión y en especial la reacción de estabilizantes.

Más adelante se describen las propiedades de los suelos.

### **1.1 ORIGEN Y PROCESOS DE FORMACIÓN DE LOS SUELOS.**

La palabra suelo se deriva del latín solum que significa: suelo, tierra o parcela. Suelo es una capa delgada sobre la corteza terrestre que proviene de la desintegración física o química de las rocas y de los residuos de la actividad de los seres vivos que sobre ella habitan.

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos que constituyen la roca madre, la erosión la desintegra de tres formas: física, química y biológica.

a) Física: Es debida a cambios térmicos y la acción del agua. Estos tienden a romper la roca original y a dividirla en fragmentos pequeños que son separados de la roca por agentes activos (agua, viento y la gravedad) y llevados a otros puntos en los que continua la acción erosiva.

b) Química: Se origina por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación y cementación, esta acción tiende a disgregar como a cementar las partículas.

De los agentes químicos que participan en el proceso se mencionan como principales la oxidación, carbonatación y la hidratación.

La oxidación es la reacción química que ocurre en las rocas al recibir el agua de lluvia ya que el oxígeno del aire, en presencia de humedad, reacciona químicamente lo que genera el fenómeno de la oxidación, principalmente si las rocas contienen hierro.

La carbonatación es el ataque que el ácido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) provocan sobre las rocas que contienen hierro, calcio, magnesio, sodio o potasio.

Así, las rocas ígneas que contienen dichos elementos son descompuestas de ésta manera.

La hidratación es la acción y efecto de combinar un cuerpo con agua para formar hidratos es decir, compuestos químicos que contienen agua en combinación. El agua se absorbe y se combina químicamente formando nuevos minerales.

c) Biológica: Producidas por bacterias y materiales orgánicos que se mezclan con otras partículas de origen físico-químico.

El sol al actuar sobre las rocas calienta más su exterior que su interior, lo que provoca diferencias de expansión que genera esfuerzos muy fuertes y rompe la capa superficial. Este proceso se conoce como exfoliación.

Los cambios de temperatura producen más efecto en las rocas ígneas (granito, andesita, riolita) que en las rocas sedimentarias (caliza, travertino, dolomita).

Especialmente cuando las primeras son de grano grueso y se componen de diversos minerales.

El agua en movimiento es un elemento importante de erosión y al arrastrar los fragmentos angulosos de las rocas provoca la fricción de unos con otros haciéndolos redondeados como los cantos rodados de los ríos. También deja sentir sus efectos cuando cae en las superficies pétreas, llena sus cavidades, abre grietas y llena los espacios huecos de las rocas. Si se congela ejerce fuerte poder de fracturación en la roca y se produce la desintegración en un corto periodo de tiempo.

El viento también contribuye a la erosión del suelo cuando arrastra arenas como el caso de los médanos y los loess. Los taludes de los suelos arenosos son afectados por la acción del viento, al golpearlos continuamente desprende las partículas y luego las acarrea.

Los glaciares son depósitos de hielo en las altas montañas. Ejercen una gran acción abrasiva y de transporte de los materiales. Los efectos que provoca sobre la topografía son diferentes según si es glaciar de montaña o glaciar continental.

Todo ello da lugar a fenómenos de desintegración y transformación de la roca creándose así el perfil de meteorización. En éste perfil la roca madre ocupa la parte más baja y alejada de la superficie, y el suelo la más alta. Cuando el suelo permanece "in situ" sin ser transportado se le conoce como suelo residual, y cuando se transporta forma depósitos coluviales denominados suelos transportados.

La acción de los agentes de intemperismo anteriormente mencionados se conocen más comúnmente en el ambiente ingenieril como: meteorización y alteración, y dan origen a los suelos inorgánicos.

Los componentes primarios del suelo son:

- a) Compuestos inorgánicos no disueltos producidos por la meteorización y la descomposición de las rocas superficiales.
- b) Los nutrientes solubles utilizados por las plantas.
- c) Distintos tipos de materia orgánica, viva o muerta.
- d) Gases y agua requeridos por las plantas y por los organismos subterráneos.

La naturaleza física del suelo está determinada por la proporción de partículas de varios tamaños. Las partículas inorgánicas tienen tamaños que varían entre los trozos distinguibles de piedra y grava hasta los de menos de 1/40,000 centímetros.

Las grandes partículas del suelo, como la grava y la arena, son en su mayor parte químicamente inactivas; pero las pequeñas son partículas inorgánicas, componentes principales de las arcillas finas.

La parte orgánica del suelo está formada por restos vegetales y restos animales, junto a cantidades variables de materia orgánica llamada humus.

El componente líquido de los suelos, denominado por los científicos solución del suelo, es sobre todo agua con varias sustancias minerales en disolución, grandes cantidades de oxígeno y dióxido de carbono disueltos. Los principales gases contenidos en el suelo son el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono.

Todos los suelos tienen su origen, directa o indirectamente en las rocas sólidas que de acuerdo a su proceso de formación se clasifican de la siguiente manera:

### **ROCAS ÍGNEAS.**

Formadas por el enfriamiento del magma dentro o sobre la superficie de la corteza terrestre como: granito, basalto, dolerita, andesita, gabro, sienita y pórfido. Las más antiguas tienen al menos 3,960 millones de años, mientras que las más jóvenes apenas se están formando en estos momentos.

Están compuestas esencialmente por silicatos: plagioclasa, cuarzo, mica, biotita, olivino, anfíboles y piroxenos. Cada tipo de roca ígnea contiene distintas proporciones de estos minerales.

Se clasifican según la cantidad de sílice que contienen. También se agrupan por el tamaño de los cristales.

El tipo de magma, la forma en que viaja hasta la superficie y la velocidad de enfriamiento determinan la composición, el tamaño del grano, la forma de los cristales y el color de las rocas.

El tamaño del grano indica si una roca ígnea es intrusiva (de grano grueso) o extrusiva (de grano fino). Hay dos tipos de rocas ígneas que se distinguen porque en un caso el magma alcanza la superficie terrestre antes de enfriarse y endurecerse, y en el otro no. El magma que se cristaliza bajo tierra forma rocas ígneas intrusivas. El que alcanza la superficie antes de solidificarse forma las rocas ígneas extrusivas.

**ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS.**

Las rocas ígneas que se forman en la profundidad se enfrían más lentamente que las que se forman en la superficie, por lo que tienden a ser de grano más grueso y no contienen inclusiones gaseosas o de vidrio.

Los grandes cristales normalmente se empaquetan de forma compacta, confiriendo un aspecto granuloso a la roca. Las rocas ígneas intrusivas quedan expuestas a la superficie si las rocas que las cubren desaparecen por efecto de la erosión.

**ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS.**

Si el magma alcanza la superficie terrestre antes de enfriarse, forma rocas ígneas extrusivas de grano fino, también llamadas rocas volcánicas, ya que el magma surge por los volcanes. Las rocas ígneas extrusivas tienen formas fluidas y cristales de poco tamaño y suelen contener inclusiones de vidrio y de gas.

**ROCAS METAMÓRFICAS.**

Se forman por la modificación de rocas ya existentes a causa del calor extremo como: el mármol y la cuarcita, o bajo presiones muy altas como: pizarras y esquisto. Las rocas situadas cerca de un cuerpo de magma caliente se pueden transformar por la acción del calor. Las rocas que han sido enterradas a gran profundidad por la acción de las placas tectónicas convergentes pueden transformarse por el aumento de la presión y de la temperatura. Este cambio se denomina metamorfismo y es un proceso que modifica cualquier tipo de roca (sedimentaria, ígnea o metamórfica). Por ejemplo, la piedra caliza, que es sedimentaria, puede convertirse en mármol y el basalto, que es ígneo, también puede convertirse en una roca verde, anfibolita o eclogita.

Cuanto mayor sea la profundidad a la que esté enterrada una roca, mayor será el calor y la temperatura a la que está sometida. El metamorfismo tiene lugar a temperaturas de 250 a 800°C.

La orientación de los cristales indica si la roca se ha formado como consecuencia de un aumento de presión y de temperatura, o bien, sólo por un incremento de esta última. El tamaño de los cristales refleja el grado de calor y de presión al que se ha expuesto la roca. En general, cuanto más altas haya sido la presión y la temperatura, mayores serán los cristales.

Los procesos que inician la transformación de las rocas sólidas a suelos, se verifican en la superficie y dependen de los siguientes factores:

- a) Naturaleza composición de la roca madre.
- b) Condiciones climáticas, en especial temperatura y humedad.
- c) Condiciones topográficas y generales del terreno.
- d) Duración de las condiciones específicas prevalecientes.
- e) Interferencia de otros factores como terremotos y actividades humanas.
- f) Mecanismos y condiciones de acarreo natural.

### **ROCAS SEDIMENTARIAS.**

Se forman en capas acumuladas por el asentamiento de sedimentos en cuerpos de agua como: mares y lagos. Por ejemplo: caliza, arenisca, lodolita, esquisto y conglomerados.

Normalmente, la roca se fragmenta y se disuelve por acción de la meteorización y la erosión, las partículas se sedimentan y los minerales disueltos se cristalizan con el agua y forman sedimentos. El proceso que convierte los sedimentos no consolidados en roca se denomina litificación.

Las rocas sedimentarias se forman cerca de la superficie terrestre, con presiones y temperaturas relativamente bajas. Los sedimentos más antiguos quedan enterrados bajo las nuevas capas y se van endureciendo gradualmente por la compactación y la cementación. La apariencia de una roca sedimentaria queda determinada por las partículas que contiene.

El tamaño de los granos de las rocas sedimentarias varía mucho, desde grandes cantos hasta las minúsculas partículas de arcilla. La forma de los granos que integran las rocas sedimentarias depende de cómo éstos se han transportado.

### **1.2 PRINCIPALES TIPOS DE SUELOS.**

De acuerdo con el origen de sus elementos los suelos se clasifican en dos amplios grupos: suelos inorgánicos cuyo origen se debe a la descomposición física o química de las rocas y los suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

El color es uno de los criterios más simples para calificar las variedades de suelo.

Los suelos oscuros son más fértiles que los claros. La oscuridad suele ser resultado de la presencia de grandes cantidades de humus, sin embargo, los suelos oscuros o negros deben su tono a la materia mineral o a la humedad excesiva; en estos casos, el color oscuro no es un indicador de fertilidad.

Los suelos orgánicos se forman en el sitio. Muchas veces la cantidad de materia orgánica es tan alta con relación a la cantidad de suelo orgánico, que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas.

Esto es muy común en las zonas pantanosas en los cuales los restos de la vegetación acuática llega a formar depósitos de gran espesor conocidos como turbas, la *turba* es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

A continuación se describen los suelos con los nombres que se utilizan en la Ingeniería civil.

### **GRAVAS.**

Las gravas son acumulaciones de fragmentos de roca que tienen más de 2 mm de diámetro. Las gravas ocupan grandes extensiones, pero casi siempre se encuentran con una mayor o menor porción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas.

### **ARENAS.**

Arena es el nombre que se le da a los materiales de grano fino procedentes de la trituración natural o artificial y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro. Su origen es igual que el de las gravas, suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene porciones relativamente grandes de grava y arcilla, las arenas limpias son materiales que no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que la arcilla y si se aplica una carga en su superficie se comprimen instantáneamente.

### **LIMOS.**

Los limos son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad, pueden ser limos inorgánicos como el producto de canteras o limos orgánicos como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. Su diámetro está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Su color varía desde muy claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta.

### **ARCILLAS.**

Las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es cristalina y complicada. Se puede decir que hay dos tipos de tales láminas; una de tipo silícico y otra de tipo aluminico.

De acuerdo con su arreglo reticular los minerales de arcilla se pueden clasificar en 3 grandes grupos: CAOLINÍTICO, MONTMORILONÍTICO E ILÍTICO.

Caolínítico (del nombre chino Kau-ling), procede de la carbonatación de la ortoclasa (feldespato potásico). Están formadas por una lámina sílica y una aluminica, y una unión entre sus retículas que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas; pues produce una capa neutral, lo que induce a que estas arcillas sean bastante estables en presencia del agua.

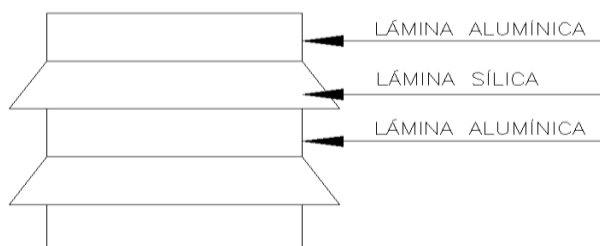


Figura 1.1 Arcilla caolínítica (Crespo, 1993).

Montmorilonítico (debe su nombre a Montmorillon, Francia). Se forman por la superposición indefinida de una lámina aluminica entre dos láminas silíceas, pero con una unión débil entre sus retículas lo que hace que el agua penetre en su estructura con facilidad. Estas arcillas en contacto con el agua sufren expansión provocando inestabilidad entre ellas. A este tipo de material pertenecen las bentonitas.

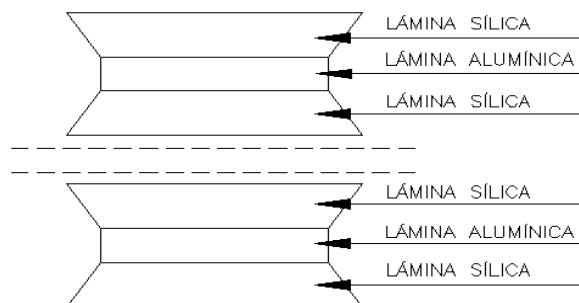


Figura 1.2 Arcilla montmorilonítica (Crespo, 1993).

Ilítico (debe su nombre a Illinois, USA), son el producto de la hidratación de las micas y presenta un arreglo reticular similar al de las montmoriloníticas, pero con la tendencia a formar grumos por la presencia de iones de potasio, por lo que reduce el área expuesta al agua y por lo mismo no son tan expansivas como la arcillas montmoriloníticas.

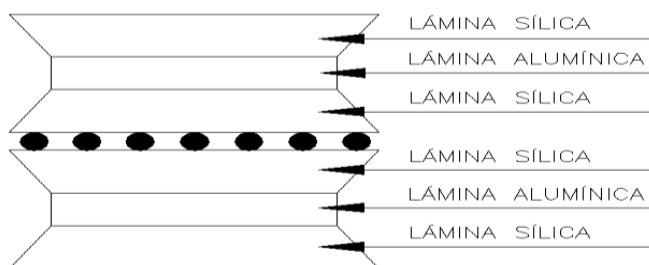


Figura 1.3 Arcilla ilítica (Crespo, 1993).



En general las arcillas son plásticas, se contraen al secarse, son compresibles y al aplicarles una carga en su superficie se comprimen lentamente. Otra característica interesante, desde el punto de vista de la construcción, es que la resistencia perdida por el remoldeo se recupera parcialmente con el tiempo. Este fenómeno se conoce como tixotropía y es de naturaleza físico-química.

Además de los suelos indicados con anterioridad se encuentran otros suelos que a continuación se indican.

### **LOESS.**

Los loess son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos. Esta cohesión se debe a un cementante del tipo calcáreo y su color es generalmente castaño claro. El diámetro de las partículas está comprendido entre 0.01 mm y 0.05 mm. Los loess se distinguen porque presentan agujeros verticales que han sido dejados por raíces extinguidas. Los loess modificados son aquellos que han perdido sus características debido a procesos geológicos secundarios, tales como inmersión temporaria, erosión y formulación de un nuevo depósito, debido a su contenido calcáreo los cortes hechos en los loess se mantienen casi verticales.

### **TOBAS.**

Es un material pulverulento, de color café claro o café oscuro; compuesto de arcilla, limo y arena en proporciones variables, es un material, con un cementante que puede ser la misma arcilla o el carbonato de calcio. Según el componente predominante la toba se suele llamar arcillosa, limosa o arenosa, según sea el caso.

La mayoría de las veces la toba debe su origen a la descomposición y alteración de ceniza volcánica basáltica. Pueden encontrarse dentro de la toba capas o lentes de arena y cenizas basálticas que no tuvieron tiempo de intemperizarse cuando fueron cubiertas por una capa que sí se alteró. También suelen encontrarse lentes de piedra pómez dentro de la toba.

### **CALICHE.**

El termino caliche se aplica a ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonatos calcáreos. Parece ser que para la formación de los caliches es necesario un clima semi-árido. La marga es una arcilla con carbonato de calcio, más homogéneo que el caliche y generalmente muy compacto de color verdoso.

**GUMBO.**

Es un suelo arcilloso fino, generalmente libre de arena y que parece cera a la vista, es pegajoso, muy plástico y esponjoso. Es un material difícil de trabajar.

**DIATOMITA.**

Las diatomitas son depósitos de polvo silíceo, generalmente de color blanco compuesto total o parcialmente por residuos de diatomeas. Las diatomeas son algas unicelulares microscópicas de origen marino o de agua dulce que presentan en las paredes de sus células características silíceas.

**SUELOS COHESIVOS, NO COHESIVOS Y FRICCIONANTES.**

Una característica que hace distintos a diferentes tipos de suelos es la cohesión. Debida a ella los suelos se clasifican en cohesivos y no cohesivos.

Los suelos cohesivos son los que poseen cohesión, es decir la propiedad de atracción intermolecular como las arcillas. Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación como la arena y la grava.

Los suelos friccionantes tienen un ángulo de fricción interna representado por la letra Griega  $\phi$  (fi), que es un parámetro de resistencia característico de los suelos gruesos (gravas y arenas).

**1.3 CLASIFICACIÓN DEL SUELO.**

La clasificación se basa en la composición del suelo, con énfasis en las propiedades que se pueden ver, sentir o medir por ejemplo, la profundidad, el color, la textura, la estructura y la composición química. La mayoría de los suelos tienen capas características, llamadas horizontes; la naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también es importante en la identificación y clasificación de los suelos.

Uno de los sistemas más utilizados es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se basa en la clasificación de un suelo como grava, arena, limo, arcilla o suelo orgánico y en la identificación del porcentaje de finos y de su plasticidad.

**SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.**

Es el más usado en la actualidad y consiste en lo siguiente:

Tabla 1.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Lambe y Whitman, 1981).

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7,6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)				Simbolo del grupo	Nombres típicos				
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz N.º 200	Gravate-más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N.º 4	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>GW</b>	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos				
	Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Fración fina no plástica (para la identificación ver el grupo ML más abajo)	<b>GM</b>	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)	<b>GC</b>	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla				
	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios	<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
	Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Finos no plásticos (para identificación ver el grupo ML más abajo)	<b>SM</b>	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)	<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas				
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N.º 40								
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N.º 200  (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Limos y arcillas con límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)				
Nula a ligera						Rápida a lenta	Nula	<b>ML</b>	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad
Media a alta						Nula a muy lenta	Media	<b>CL</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
Ligera a media						Lenta	Ligera	<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
Limos y arcillas con límite líquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	<b>MH</b>	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, suelos limosos			
					Alta a muy alta	Nula	Alta	<b>CH</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas
	Media a alta				Nula a muy lenta	Ligera a media	<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta	
Suelos altamente orgánicos			Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa	<b>Pt</b>	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., GW-GC, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.

**SÍMBOLOS:**

G= Grava. Inferior a 76 mm y superior a 6 mm de diámetro.

S= Arena. Inferior a 6 mm de diámetro, pero suficientemente grande para poder verla.

M= Limos. Suelos de granulometría fina, partículas individualizadas.

C= Arcillas. Inferior a 0.002 mm de diámetro.

W= Bien graduados. Contienen partículas grandes, medianas y pequeñas.

P= Mal graduados. Contienen partículas de tamaños uniformes.

Por lo que al afrontar problemas de estabilización de suelos será necesario complementar la clasificación proporcionada por el SUCS con información adicional, como la que a continuación se presenta.

**DIÁMETRO Y TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.**

La mayoría de los suelos consisten en mezclas de partículas de minerales inorgánicas, cada una con un mineral específico y una gran variedad de tamaños desde grava hasta arcilla, cuando algunos suelos contienen mezclas de diversos minerales, un gran número de estos se están formando. Por conveniencia se dividen en dos grandes grupos: de grano grueso y de grano fino.

a) Los de grano grueso son aquellos que tienen tamaño de partículas mayores a 0.05 mm de diámetro, es decir GRAVAS Y ARENAS. Sus granos son redondeados y angulares y en general están constituidos por fragmentos de rocas, cuarzo o jaspe, con presencia de óxido de hierro, calcita y mica.

b) Los de grano fino tienen sus partículas menores que 0.05 mm de diámetro y tienen forma típicamente escamosa como los LIMOS y las ARCILLAS. En el contexto de la ingeniería la palabra escamosa se refiere a la forma y textura que presentan las partículas del suelo que puede ser redondeado, regular, irregular, angular y alargado.

**MATERIA ORGÁNICA.**

La materia orgánica proviene de restos de vegetales o animales cuyo producto final, conocido como el *humus*, es una mezcla compleja de compuestos orgánicos. La materia orgánica es una de las características del suelo superficial que se presenta como tierra vegetal con 0.5 m de espesor.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la materia orgánica tiene propiedades indeseables, por ejemplo es altamente compresible y absorbe grandes cantidades de agua de tal manera que el contenido de agua produce cambios considerables en su volumen, lo que provoca serios problemas de asentamientos.

La materia orgánica tiene una resistencia muy baja al esfuerzo cortante y en consecuencia baja capacidad de carga, la presencia de materia orgánica afecta al fraguado del cemento por lo que presenta dificultades en la fabricación del concreto y estabilización de suelos.

### **AGUA.**

El agua es parte fundamental de los suelos naturales y de hecho su efecto sobre las propiedades ingenieriles es el más pronunciado de todos los constituyentes. El desplazamiento del agua debe estudiarse con gran detalle en especial los problemas de infiltración y permeabilidad.

El agua tiene resistencia al corte, depende de la velocidad de la aplicación de la carga, no es compresible y por consiguiente transmite la presión directamente, razón por la cual las condiciones de drenaje en un suelo tienen gran importancia al estudiar su resistencia al corte. Además, el agua puede disolver y acarrear en solución un gran número de sales y compuestos.

### **AIRE.**

Desde el punto de vista práctico se puede considerar que los suelos están perfectamente secos o completamente saturados, sin embargo, para ser exactos estos extremos no se presentan en la realidad.

En los suelos considerados como “secos” habrá vapor de agua presente, mientras un suelo “completamente saturado” puede contener hasta el 2% del aire atrapado.

Los principales gases que hay en el suelo son: el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. El oxígeno es importante para el metabolismo de las plantas porque su presencia es necesaria para el crecimiento de las bacterias y de organismos responsables de la descomposición de la materia orgánica.

El contenido de nitrógeno es mucho más alto que el de oxígeno y el dióxido de carbono es varias veces más alto que el que se encuentra en la atmósfera. El aire del suelo no es continuo, se localiza en los poros separados por los sólidos del suelo. Esto explica la variabilidad en la composición del aire de un sitio del suelo.



## **CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SUELO.**

### **2.1 GENERALIDADES.**

Las propiedades del suelo se modifican si éste es sometido a un tratamiento adecuado. Por ejemplo, una arena suelta se transforma en densa si se vibra adecuadamente, por eso el comportamiento de los suelos en el terreno depende no sólo de las propiedades significativas de los granos de su masa, si no también depende de aquellas propiedades que tienen su origen en el acomodo de las partículas dentro de ella.

De ahí resulta conveniente dividir las propiedades del suelo en dos clases: propiedades de los granos del suelo y propiedades de los agregados del suelo.

Las principales propiedades de los granos del suelo son: la forma y el tamaño; y las principales propiedades de los agregados del suelo son: para los suelos sin cohesión, la densidad relativa; y para los suelos cohesivos, la consistencia.

### **2.2 FORMA, FASES Y ESQUEMA DEL SUELO.**

#### **FORMA.**

La forma que presentan las partículas del suelo es de suma importancia ya que determina su comportamiento mecánico. Una de las formas características del suelo es la equidimensional, donde las tres dimensiones de la partícula son de gran magnitud.

Podemos encontrarlo en cuatro formas principales: redondeada, subredondeada, subangulosa y angulosa. La forma redonda es la esférica, mientras que las angulosas presentan aristas por el efecto de la abrasión mecánica.

En los suelos finos las partículas son planas, por lo que los minerales de arcilla son de forma laminar es decir, dos de sus dimensiones son mayores que la tercera; pero también se da el caso de que una dimensión sea mayor que las otras dos.

#### **FASES.**

Un suelo presenta tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas del suelo, la fase líquida está formada por el agua y la fase gaseosa está formada por el aire.

Las fases líquida y gaseosa constituyen el volumen de vacíos ( $V_v$ ), mientras que la fase sólida, el volumen de los sólidos ( $V_s$ ).

Cuando en un suelo todos sus vacíos están ocupados por el agua se dice que es totalmente saturado y por lo tanto únicamente presenta dos fases: la sólida y la líquida. Cuando un suelo presenta tres fases se dice que es parcialmente saturado.

### ESQUEMA DE UNA MUESTRA DE SUELO.

En la figura 2.1 se muestra el esquema de un suelo, en ella se muestran las tres fases del suelo y los símbolos que se utilizan para conocer sus relaciones volumétricas y gravimétricas.

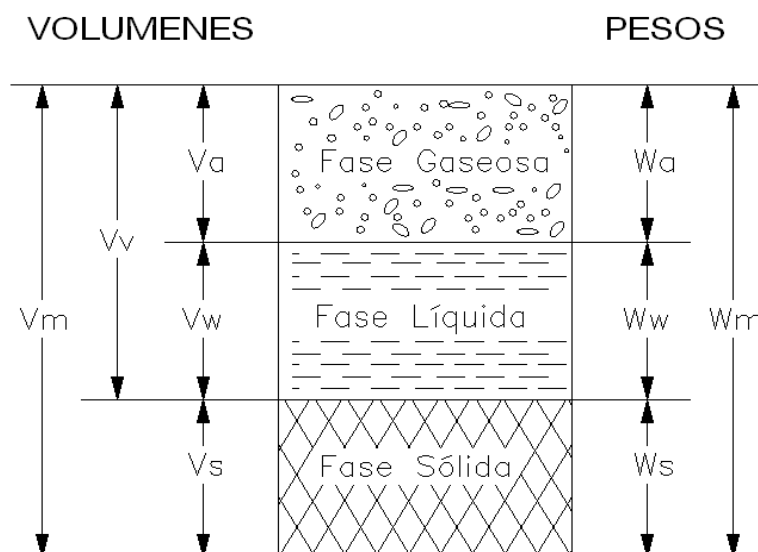


Figura 2.1 Esquema de una muestra de suelo.

El significado de cada símbolo se describe a continuación:

$V_m$  = Volumen total de la muestra de suelo.

$V_v$  = Volumen de vacíos de la muestra de suelo.

$V_s$  = Volumen de la fase sólida de la muestra de suelo.

$V_w$  = Volumen de la fase líquida de la muestra de suelo.

$V_a$  = Volumen de la fase gaseosa de la muestra de suelo.

$W_m$  = Peso total de la muestra de suelo.

$W_s$  = Peso de la fase sólida de la muestra de suelo.

$W_w$  = Peso de la fase líquida de la muestra de suelo.

$W_a$  = Peso de la fase gaseosa de la muestra de suelo.

Para comprender mejor las propiedades del suelo se requieren conocer las relaciones siguientes, ya que con éstas se tendrá un panorama más amplio para entender su comportamiento físico.

a) Se denomina relación de vacíos a la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de los sólidos de un suelo:

$$e = V_v / V_s$$

La relación puede variar teóricamente de 0 a infinito. En la práctica no suelen hallarse valores menores de 0.25 (arenas muy compactas con finos) ni mayores de 15 (arcillas altamente compresibles).

b) Se llama porosidad de un suelo a la relación entre su volumen de vacíos y el volumen total de la muestra y se expresa en porcentaje:

$$n(\%) = ( V_v / V_m ) 100$$

Puede variar de 0% a 100%. Los valores reales se encuentran entre el 20% y el 95%.

c) Se le llama grado de saturación de un suelo a la relación entre su volumen de agua y su volumen de vacíos. Se expresa en porcentaje y varía de 0% a 100%.

$$G_w = (\%) = ( V_w / V_v ) 100$$

Donde:

$G_w = 100$  % suelo saturado.

$G_w < 100$  % suelo parcialmente saturado.

d) Se conoce como contenido de agua de un suelo a la relación entre el peso del agua contenida en él mismo y el peso de su fase sólida, se expresa en porcentaje. Su valor en teoría, varía entre 0% a infinito.

$$W(\%) = ( W_w / W_s ) 100$$

### **2.3 ESTRUCTURACIÓN DE LOS SUELOS.**

Se le llama así al acomodo que adquieren las partículas minerales del suelo, donde sus partículas se encuentran siempre en forma organizada. La estructuración del suelo es de suma importancia en su comportamiento. A continuación se describen las estructuras más importantes del suelo.

#### **ESTRUCTURACIÓN SIMPLE.**

Es aquella que se produce cuando la fuerza de la gravedad predomina en la posición y acomodo de éstos. Es típica de los suelos gruesos (gravas y arenas limpias). En estas estructuras las partículas se apoyan unas sobre otras.



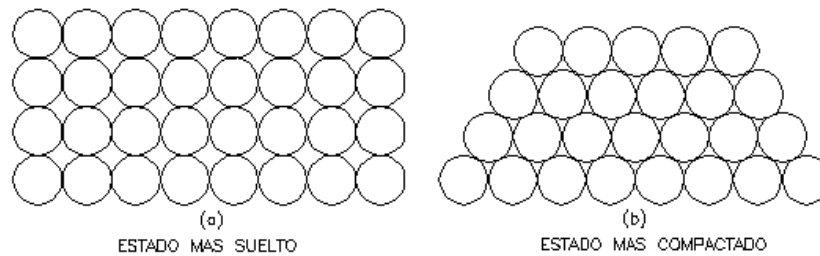


Figura 2.2 Estructura simple (Badillo, 2005).

Si se analiza su comportamiento existen dos formas principales de visualizarlo: la compactación y la orientación. La compactación es el grado de acomodación de las partículas. La orientación es la permeabilidad que presenta el suelo y aumenta si el suelo contiene un porcentaje alto de partículas laminares.

### **ESTRUCTURA PANALOIDE.**

Se presenta en suelos con granos pequeños (0.002 mm) que se depositan en un medio continuo por efecto de la gravedad. Cuando las partículas son muy pequeñas existen otros efectos, como el Browniano. El movimiento Browniano es un movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas microscópicas de un fluido, se debe a las desproporcionalidades en las fuerzas ejercidas por las pequeñas moléculas líquidas sobre ella. Las fuerzas de adherencia causantes de dichas estructuras son las fuerzas superficiales de las partículas y pueden neutralizar el peso de las mismas.

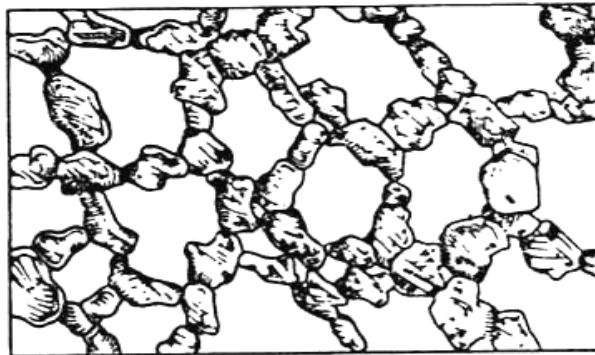


Figura 2.3 Estructura panaloide (Badillo, 2005).

### **ESTRUCTURA COMPUESTA.**

Cuando un suelo se forma con dos o más de las estructuras antes mencionadas recibe el nombre de estructura compuesta. En estas se define un esqueleto formado por granos gruesos y masas coloidales de flóculos que proporcionan nexos entre ellos. La sedimentación comprende partículas de todos los tamaños y tipos.

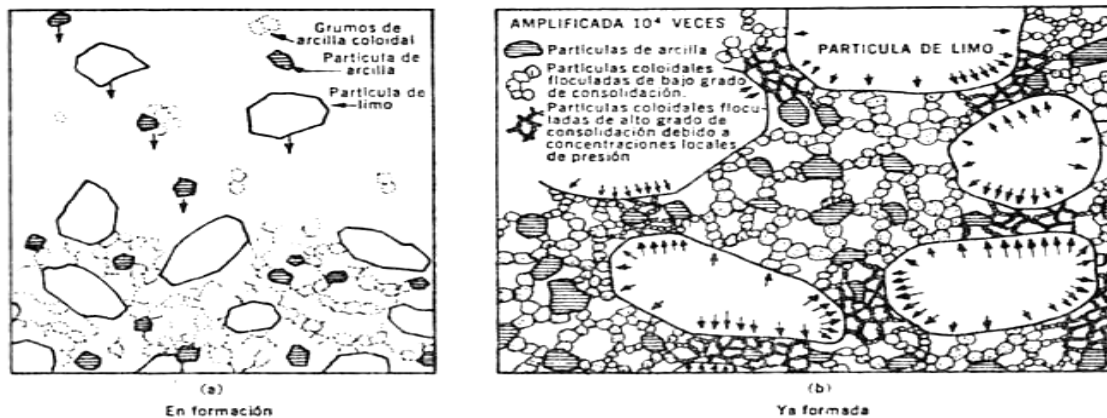


Figura 2.4 Estructura compuesta según A. Casagrande (Badillo, 2005).

**ESTRUCTURA DISPERSA.**

Cualquier perturbación de las fuerzas osmóticas en la estructura anterior disminuye los ángulos entre las láminas y provoca mayor espaciamiento. Ésta perturbación forma lo que se conoce como estructura dispersa. Las presiones osmóticas provocan la separación de las partículas y por ello presentan la posición mostrada en la figura 2.5.

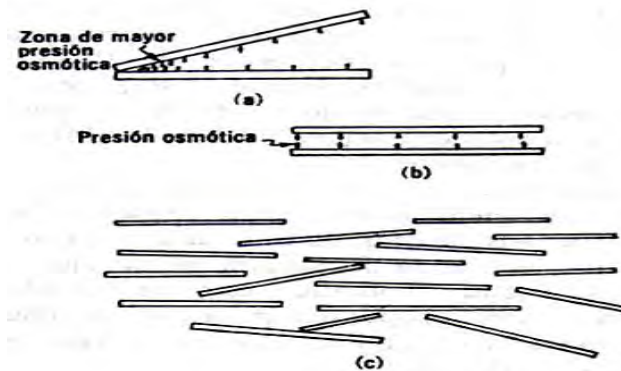


Figura 2.5 Estructura dispersa (Badillo, 2005).

**PROPIEDADES TIXOTROPICAS DE LAS ARCILLAS.**

En las partículas de arcilla existen fuerzas debido a las ligaduras físico-químicas que se manifiestan en sus respectivas películas envolventes de agua. Un amasado energético de las arcillas puede llegar a romper estas ligaduras por un sólo momento ya que la mayoría de las arcillas vuelven a sus propiedades originales, a esto se le conoce con el nombre de tixotropía.

Terzaghi midió la tixotropía a través de la sensibilidad de las arcillas. La sensibilidad es la relación entre la resistencia y la compresión simple

correspondiente a los estados inalterado y remoldeado. Propuso que su valor oscila entre 2 y 4. En los casos en que esta propiedad se manifiesta fuertemente llega a 8 o más.

## **2.4 GRANULOMETRÍA.**

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. La prueba de granulometría de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaño las partículas que lo forman, la obtención de los tamaños y distribución de las partículas de un suelo se obtiene por el método de cribado por mallas y por el análisis de una suspensión del suelo con el hidrómetro (densímetro).

Las partículas con tamaño superior a 0.075 mm se determinan mediante una serie de mallas normalizadas. Para partículas menores que 0.075 mm, su tamaño se determina por medio de la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión de densidad y viscosidad conocidas.

Los suelos bien graduados tienen comportamiento ingenieril más favorable y su comportamiento mecánico e hidráulico se define por la compacidad de los granos y su orientación.

## **CLASIFICACIÓN DEL SUELO POR SU TAMAÑO.**

En las clasificaciones basadas en las características granulométricas de los suelos se distinguen diversas fracciones, por el nombre de algunos tipos de suelos como: grava, arena fina, arena gruesa, limo medio, etc. Las divisiones entre cada uno corresponden a los cambios importantes en las propiedades de los suelos.

Este sistema se basa en el de Aeropuertos y puede decirse que es el mismo pero con ligeras modificaciones. El sistema cubre los suelos gruesos y los suelos finos distinguiéndose a través de la malla número 200. Las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas son menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas y fino, si más de la mitad de sus partículas son finas.

Con la técnica del cribado se dibujan curvas granulométricas que agrupan partículas de suelo en diferentes tamaños.

Los límites de tamaño que constituyen al suelo ofrecen un criterio para obtener una mejor clasificación. Dicho criterio nos muestra algunas de las siguientes clasificaciones:

Tabla 2.1 Clasificación M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology).

<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>TAMAÑO (mm)</b>
<b>Arena</b>	Gruesa	2.0 a 0.6
	Mediana	0.6 a 0.2
	Fina	0.2 a 0.06
<b>Limo</b>	Grueso	0.06 a 0.02
	Mediano	0.02 a 0.006
	Fino	0.006 a 0.002
<b>Arcilla</b>	Gruesa	0.002 a 0.0006
	Mediana	0.0006 a 0.0002
	Fina (coloides)	0.0002

Tabla 2.2 Esta clasificación se usa desde 1936 en Alemania y se basa en una proposición original de Kopecky.

<b>MATERIAL</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>TAMAÑO (mm)</b>
<b>Piedra</b>	-----	mayor de 70 mm
<b>Grava</b>	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	Fina	2 a 5
<b>Arena</b>	Gruesa	1 a 2
	Mediana	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
<b>Polvo</b>	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
<b>Limo</b>	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
<b>Arcilla</b>	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
<b>Ultra-Arcilla</b>	-----	0.00002 a 0.0002

**GRÁFICA GRANULOMÉTRICA.**

La gráfica granulométrica se dibuja en porcentajes en el eje de las ordenadas y el tamaño de las partículas en el eje de las abscisas. La representación en escala semi logarítmica muestra mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, proporciona un amplio espectro granulométrico y se observan pequeñas diferencias o desviaciones en máximo/mínimo alrededor de la curva ideal. No obstante es conveniente aproximarse tanto como sea posible para alcanzar los valores ideales en cada punto y sobretodo minimizar las desviaciones en la parte que corresponde a los limos (0.05 a 0.005mm).

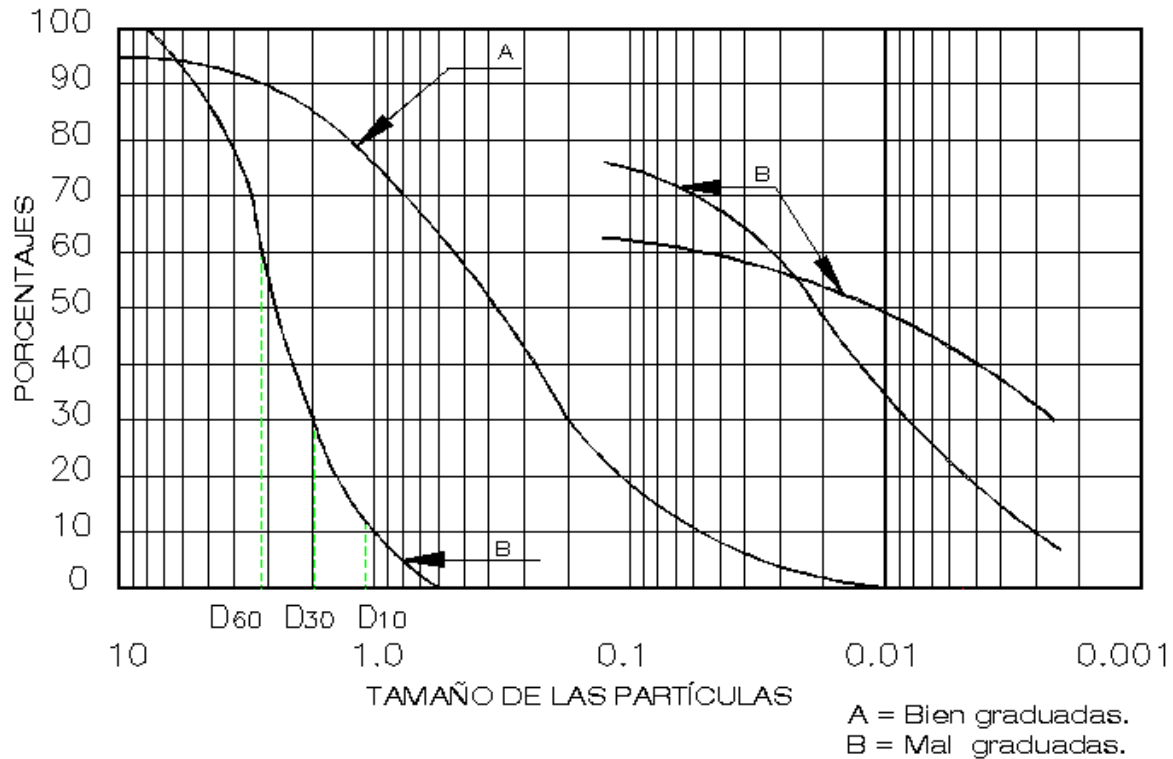


Figura 2.6 Curvas granulométricas (Badillo, 2005).

La forma de la curva granulométrica del suelo está representada por una curva que indica la variedad de tamaños, ver figura 2.6.

Como una medida simple del coeficiente de uniformidad de un suelo, se propone el coeficiente de uniformidad como:

$$Cu = D60 / D10$$

Donde:

D60: Tamaño tal que el 60%, en peso, del suelo sea igual o menor.

D10: Tamaño tal que el 10%, en peso, del suelo sea igual o mayor.

Como dato complementario necesario para definir la uniformidad se define el coeficiente de curvatura del suelo con la siguiente expresión:

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$$

Donde:

D<sub>30</sub> se define análogamente a D<sub>10</sub> y D<sub>60</sub>.

Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados es decir, es un suelo con amplio margen de tamaños de partículas y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

## **2.5 PLASTICIDAD.**

La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos finos para deformarse hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos finos.

Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg o estados de consistencia.

## **ESTADOS DE CONSISTENCIA.**

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos presentes en la naturaleza se encuentran en diferentes estados en función de su contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en estado sólido, semi-sólido, plástico, semi-líquido o líquido. La arcilla por ejemplo, al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con el que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de contenido de agua, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico es decir, acepta deformaciones sin romperse.

Según su contenido de agua en forma decreciente, un suelo plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia definidos por Atterberg:

- 1.- Estado líquido. El suelo tiene las propiedades y apariencias de una suspensión.
- 2.- Estado semi-líquido. El suelo tiene las propiedades de un fluido viscoso.
- 3.- Estado plástico. El suelo se comporta plásticamente.
- 4.- Estado semi-sólido. El suelo tiene la apariencia de un sólido pero disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- 5.- Estado sólido. El volumen del suelo no varía con el secado.

El orden de los estados se observa en la figura 2.7 en función del contenido de agua.

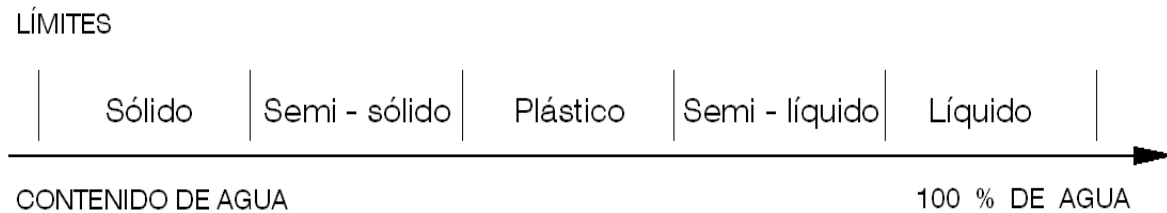


Figura 2.7 Límites de Atterberg.

En los ensayos siempre se utiliza material que pasa por las aberturas de la malla No. 40, pues se considera que éstas son partículas activas de un suelo.

Ningún otro ensayo, por más complejo que sea, puede decir tanto de los suelos finos como los límites de Atterberg, los cuales además son de sencilla realización.

### **LÍMITE LÍQUIDO.**

En este límite el contenido de agua en la película de agua se hace tan gruesa que la cohesión decrece y la masa del suelo fluye por acción de la gravedad. Se expresa en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado semi-líquido al estado plástico. La cohesión de un suelo en el límite líquido es nula.

En el límite líquido, el suelo pierde la facilidad para fluir, por lo que conserva la forma en que se le abandone. Constituye la posición intermedia entre los estados semi-líquido y plástico.

### **LÍMITE PLÁSTICO.**

Al alcanzar el límite plástico definido como la línea divisoria entre los estados plásticos y semi-sólido, el suelo abandona sus cualidades plásticas, desmoronándose cuando se moldea. La prueba correspondiente busca el contenido de agua que produce la rotura de un cilindro de 3 mm de diámetro y tiene la finalidad de cuantificar en una muestra de suelo el contenido de agua, en el que pierde sus propiedades plásticas y se agrieta cuando se remoldea.

### **ÍNDICE DE PLASTICIDAD.**

Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo. Se obtiene por la diferencia entre el límite líquido y límite plástico:

$$\begin{aligned} IP = LL - LP > 10 & \quad \text{plástico.} \\ IP = LL - LP < 10 & \quad \text{no plástico.} \end{aligned}$$

Valores menores de 10 indican baja plasticidad y valores cercanos a 20 señalan suelos muy plásticos.

Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo; sin embargo, el índice plástico depende de la cantidad de arcilla del suelo.

### **LÍMITE DE CONTRACCIÓN.**

El límite de contracción es la frontera entre los estados semi-sólido y sólido, se define como el contenido de agua mínimo para el cual el suelo no retrae su volumen aun cuando pierda o se evapore agua.

### **CARTA DE PLASTICIDAD.**

La carta de plasticidad es muy útil para clasificar suelos finos. Esta carta maneja parámetros que definen la plasticidad en un modo simple, rápido y económico.

Además es un elemento básico en la identificación y clasificación de los suelos. En la carta de plasticidad hay seis zonas claramente diferenciables. Estas zonas se encuentran delimitadas por tres líneas denominadas A, B y C. La línea A se define por la ecuación  $IP = 0.73 * (LL - 20)$ . Los suelos que se encuentran por encima de la línea A se clasifican como arcillas inorgánicas. Los suelos que se encuentran por debajo de la línea A se clasifican como limos inorgánicos.

Las líneas B y C se encuentran paralelas al eje de las ordenadas en los puntos 30 y 50% del eje de las abscisas, respectivamente. Estas líneas dividen la carta en tres franjas verticales que corresponden, de izquierda a derecha, a materiales de baja, mediana y alta plasticidad. Las zonas II y III, tienen el inconveniente de que clasifican también limos orgánicos y arcillas orgánicas respectivamente.

De esta manera, se definen seis zonas de la siguiente forma:

- I: Limo inorgánico de baja plasticidad.
- II: Limo inorgánico de mediana plasticidad o limo orgánico.
- III: Limo inorgánico de alta plasticidad o arcilla orgánica.
- IV: Arcilla inorgánica de baja plasticidad.
- V: Arcilla inorgánica de mediana plasticidad.
- VI: Arcilla inorgánica de alta plasticidad.



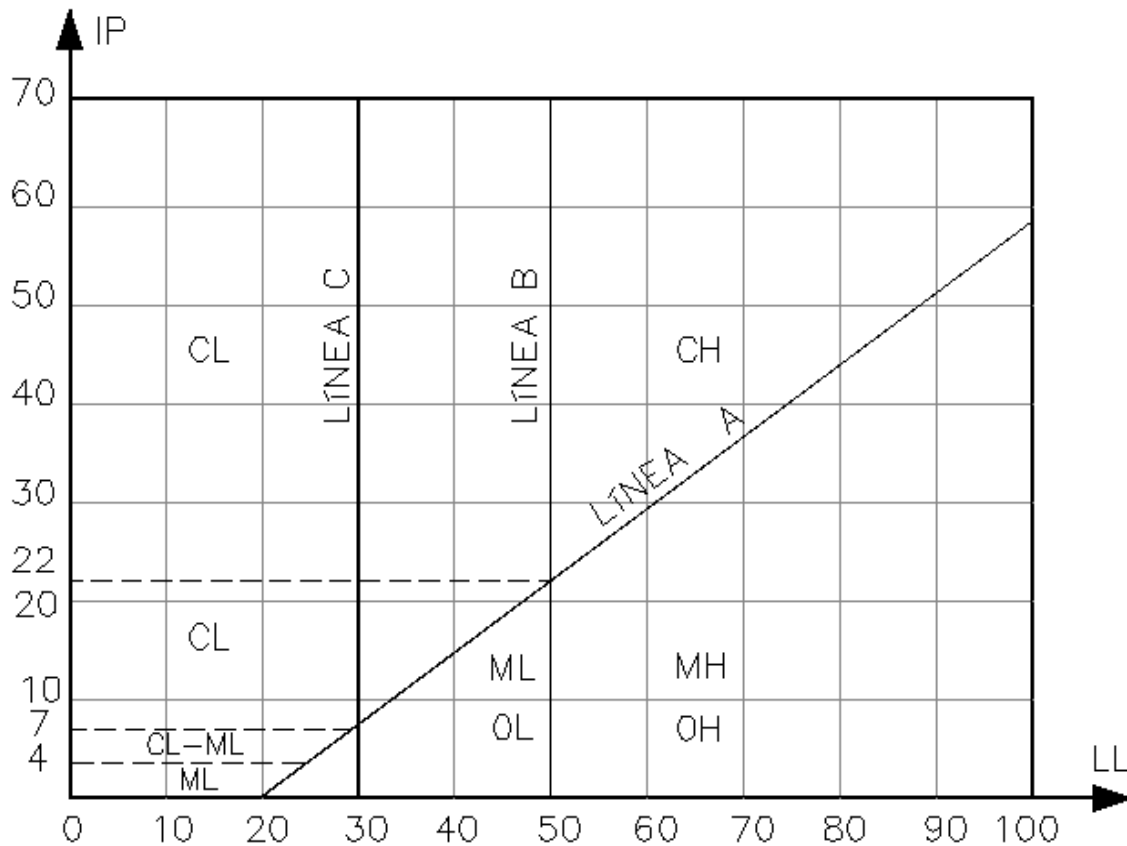


Figura 2.8 Carta de plasticidad.

## 2.6 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS.

### COHESIÓN.

Es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. Se representa con la letra C y es un parámetro de resistencia característico de los suelos finos (arcillas y limos).

Por lo tanto, la cohesión de un suelo varía si cambia su contenido de humedad.

La cohesión se mide en  $\text{kg/cm}^2$ . Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de  $0.25 \text{ kg/cm}^2$  a  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ . Los suelos limosos tienen muy poca cohesión y en las arenas la cohesión es prácticamente nula.

$C = 0, \phi = 0$  suelo friccionante. ( arena o grava).

$C \neq 0, \phi = 0$  suelo cohesivo. ( limo o arcilla).

$C \neq 0, \phi \neq 0$  suelo cohesivo – friccionante.

**ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA.**

Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Se expresa en grados y su valor depende de los siguientes factores:

- 1.- Gama de las partículas que conforman el suelo.
- 2.- Grado de acomodo de las partículas.
- 3.- Forma de las partículas.
- 4.- El confinamiento de las partículas.

La fricción interna de un suelo, está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento a lo largo de un plano y la fuerza normal "p" aplicada a dicho plano.

Los valores de éste ángulo llamado "ángulo de fricción interna" varían de 0° para arcillas plásticas, cuya consistencia está próxima a su límite líquido y hasta 45° o más para gravas y arenas secas compactas, y de partículas angulares. Generalmente, el ángulo para arenas es de 30°.

## **CAPÍTULO 3 ALGUNOS MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS.**

### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se describen algunos de los métodos de mejoramiento de suelos. Los métodos que se describen en este trabajo, se dividen en tres tipos: Mecánico, Químico y Físico.

Los métodos mecánicos a su vez se dividen en: compactación dinámica, jet grouting, pata de cabra, rodillo liso y rodillo vibratorio.

El mejoramiento químico utiliza: cal, cemento y asfaltos. El método físico consiste en utilizar geotextiles y geomallas.

En los métodos mecánicos de mejoramiento de suelos se resumen las características, pesos y capacidad de carga de la maquinaria que se utiliza en una compactación dinámica.

En el método del jet grouting se describen tres sistemas: de barra simple, de barra doble y de barra triple.

También se especifican las dimensiones y tamaños de los rodillos pata de cabra, rodillo liso y rodillo vibratorio.

Dentro de los métodos de mejoramiento de suelos químicos se describen las características de los materiales a estabilizar, el procedimiento constructivo y los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales a estabilizar con cal, cemento y asfaltos que establecen las Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Finalmente, en la descripción de los métodos de mejoramiento de suelos físicos se explican el uso, la función, las características y las propiedades de los geotextiles y geomallas.

La elección del método apropiado depende de los siguientes factores:

- a) Tipo y uso de la estructura.
- b) Condiciones del suelo (resistencia, deformación).
- c) Costos

### **3.2 MÉTODOS MECÁNICOS.**

Existen diferentes métodos mecánicos para mejorar el suelo como la compactación dinámica, jet grouting, pata de cabra, rodillo liso y rodillo vibratorio. A continuación se describen las principales características de cada uno de ellos.

### 3.2.1 COMPACTACIÓN DINÁMICA.

Este método consiste en dejar caer una masa repetidamente desde una cierta altura. La reacción del suelo ante la compactación dinámica depende del tipo de suelo y de la energía que le sea impartida por los impactos que tienen un arreglo predeterminado. La energía está en función de la masa, altura de caída, espaciamiento de cuadrícula y número de caídas en cada punto. Las masas son bloques de concreto, bloques de acero o una serie de placas de acero sujetas entre sí.

La compactación dinámica es una técnica cuyo fin es el de mejorar las propiedades mecánicas del suelo a grandes profundidades. Este método puede emplearse en suelos granulares y cohesivos, capas de gran espesor, rellenos de procedencia rocosa, arenas y gravas sueltas, suelos con bajo contenido de agua y en suelos saturados bajo el nivel freático o en fondos marinos.

Se utilizan masas de 6 a 20 toneladas con una altura de caída de 20 m; sin embargo, pueden utilizarse masas de más de 30 toneladas y alturas de 30 m.

El uso de grúas montadas sobre orugas, diseñadas para ejecutar la compactación dinámica, permite que la energía de los impactos se incremente y con ello se obtengan mejores resultados.

En proyectos donde se requiere compactar suelos que se encuentran a gran profundidad se fabrican trípodes con alturas de caída de hasta 40 m con masas de 200 toneladas.



Figura 3.1 Grúa montada sobre oruga de 110 toneladas de capacidad de carga.

El subsuelo que se mejora con este método está constituido por tres capas. La capa más profunda se mejora con una primera serie de apisonamientos. La capa intermedia se mejora con una segunda serie de apisonamientos y por último, la capa superficial se mejora aplicando una tercera serie de apisonamientos, en esta capa superficial se utiliza una masa menos pesada y más plana, con mayor superficie de contacto.

En los suelos saturados se genera una carga instantánea al momento del impacto con la superficie, la cual causa un exceso de presión de poro, por lo tanto requieren un mayor número de pasadas con un nivel de energía más bajo.

La compactación que se obtiene en espesores de arcilla es despreciable, cuando el terreno se expande el efecto de densificación es mínimo. Además se deben tener tiempos de disipación del exceso de presión de poro entre cada pasada de impacto para lograr densificar al suelo.

Los procedimientos que se utilizan para llevar a cabo el control de calidad del método de compactación dinámica son los siguientes:

- a) Profundidad del cráter, de 2 a 3 m.
- b) Monitoreo de la elevación de la superficie.
- c) Consolidómetro. Aparato que se usa para medir la expansión.
- d) Velocidad de onda de corte.
- e) Monitoreo de la presión de poro.

Antes de iniciar la fase de compactación dinámica se recomienda ejecutar el método en un área de prueba para establecer la altura de caída, el número de impactos y el espaciamiento adecuado.

La principal limitación de este método es el daño potencial que causa a estructuras vecinas debido a vibraciones, ruido y a la posible voladura de escombros; también es limitante el tamaño de las grúas disponibles.

Es recomendable realizar el mismo tipo de pruebas antes y después del mejoramiento para determinar la verdadera efectividad del método. Debe dejarse un tiempo de espera de al menos tres días antes de realizar las pruebas y después de la compactación, para permitir la disipación de la presión de poro.

### **3.2.2 JET GROUTING.**

Consiste en inyectar un material dentro del suelo con el fin de cambiar y mejorar sus propiedades. El método mezcla, corta y excava el material in situ a través de energía hidráulica de alta velocidad y lo reemplaza con una mezcla de suelo-cemento.

Inicialmente las inyecciones de jet grouting se emplearon en Francia con el propósito de mejorar la capacidad de carga del suelo bajo un canal. Su uso continuó durante el siglo XIX, pero su aplicación fue concentrada a estructuras civiles como: canales, puentes y muelles. A partir de 1864 se utilizó como herramienta de mejoramiento de suelos en la construcción de túneles.

Mediante la técnica del jet grouting, se crea una mezcla de suelo y lechada de cemento estable con el propósito de mejorar las propiedades físicas de la formación y actúa a modo de estabilización, con lo que se modifican las características mecánicas del suelo tratado.

Se conocen tres sistemas de jet grouting, cuya implementación está en función del suelo. Cada uno de estos sistemas inyecta una lechada de cemento a alta presión que corta y mezcla el suelo en el lugar para formar columnas y paneles de suelo-cemento.

A continuación se presenta una breve descripción de los tres sistemas Jet Grouting:

#### **SISTEMA JET GROUTING DE BARRA SIMPLE (SISTEMA S).**

Es la forma más simple, aquí la lechada se inyecta por una o varias boquillas con presiones de alrededor de 40 MPa, simultáneamente cortan el suelo y lo sustituyen por lechada. El proceso continua con la extracción y rotación de la barra de inyección o monitor, a una relación constante en cualquier estrato para crear una columna de suelo-cemento.

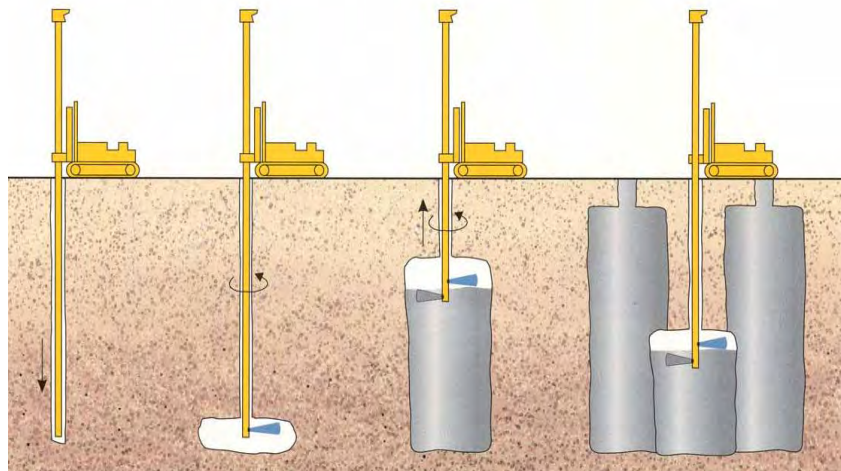


Figura 3.2 Sistema jet grouting de barra simple.

**SISTEMA JET GROUTING DE BARRA DOBLE (SISTEMA D).**

Es una forma más avanzada en la cual los efectos erosivos del jet grouting son mayores por la adición de un chorro de aire comprimido, con presiones que varían entre 0,2 y 1,5 MPa, en éste caso se tienen dos sistemas alternos de barras para separar el suministro de lechada y aire, donde la función de la lechada es erosionar y mezclar el suelo, y la del aire es incrementar el poder erosivo, este sistema es más efectivo en suelos cohesivos.

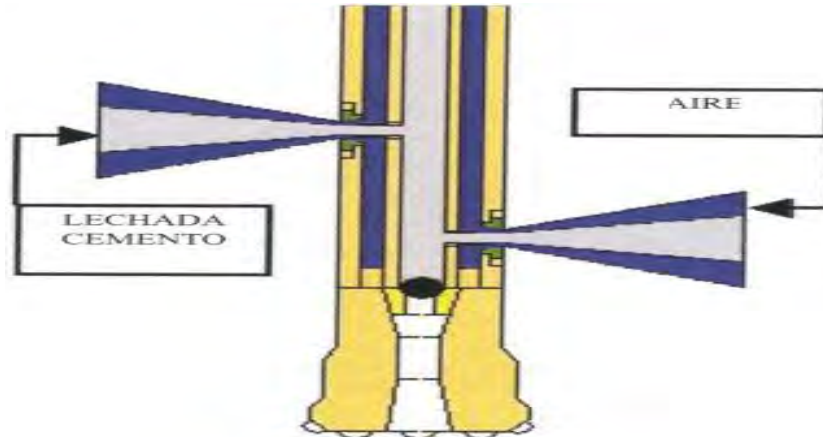


Figura 3.3 Sistema jet grouting de barra doble.

**SISTEMA JET GROUTING DE BARRA TRIPLE (SISTEMA T).**

Este sistema usa un chorro de aire y agua para el corte del suelo y está separado de la boquilla de inyección de la lechada. Este arreglo necesita tres tubos para separar las diferentes fases: agua, aire y lechada. La presión y la relación de flujo lechada, agua y aire pueden variar para dar la geometría deseada y la mezcla de suelo-cemento requerida.

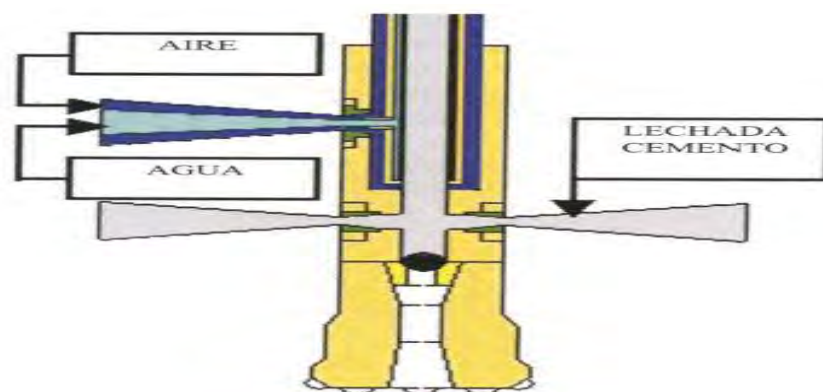


Figura 3.4 Sistema jet grouting de barra triple.

El procedimiento constructivo inicia con una perforación que varía de 100 a 150 mm de diámetro y a una profundidad establecida de acuerdo a los parámetros requeridos, las dimensiones de la perforación y la estabilidad de sus paredes se mantienen antes de insertar el monitor.

Posterior al proceso de excavación, continúa la etapa de inyección durante la cual se corta el material y se reemplaza por lechada, en ésta etapa se utilizan cualquiera de los tres sistemas antes mencionados.

Adicionalmente, se determina la geometría de la columna del suelo-cemento y se rota la tubería de inyección a una velocidad controlada. De ésta manera se erosiona el material y se reemplaza la cavidad por la lechada de abajo hacia arriba. El suelo, el agua y la lechada excedente escapan hacia la superficie, a través del espacio entre la tubería y la perforación.

Una vez que la masa de suelo cemento se formó en la profundidad de interés, el monitor de inyección se traslada a otra posición de la columna.

Se recomienda que antes de iniciar el procedimiento constructivo se construyan columnas de prueba de suelo-cemento a escala real para verificar la calidad y la geometría, ya que es difícil preestablecer la forma y resistencia final de las columnas de suelo-cemento. También se recomienda llevar un registro de los siguientes parámetros:

- a) Diámetro de la perforación.
- b) Velocidad de rotación y extracción del monitor.
- c) Monitor: dimensiones de la boquilla de inyección, ángulo y número de boquillas.
- d) Inyección: volumen y precisión para todos los componentes inyectados.
- e) Material: método de mezcla, materiales componentes y sus concentraciones.

### **3.2.3 RODILLO PATA DE CABRA.**

Este equipo de compactación consta de un cilindro en el cual hay piezas que sobresalen conocidas con el nombre de patas de cabra que tienen forma piramidal.

El cilindro está hueco y se puede llenar con arena, agua o ambas para aumentar su peso. La longitud de las patas varía entre 18 y 23 cm, y están distribuidas sobre el tambor de tal manera que haya un determinado número de patas a lo largo de una misma generatriz.

Estos compactadores concentran su peso sobre la superficie de las puntas cónicas colocadas en el rodillo, ejercen presiones estáticas muy grandes en los puntos en que las partes mencionadas penetran en el suelo.



Conforme pasa el rodillo pata de cabra, el material se compacta, dichas partes profundizan cada vez menos en el terreno y llega un momento en el que no se aprecia ya ninguna penetración. Sin embargo, la superficie en una profundidad de 6 centímetros siempre quedará distorsionada.

Al pasar el rodillo pata de cabra sobre la nueva capa de material, se compacta perfectamente esa superficie distorsionada de la capa anterior. Este tipo de compactador trabaja bien en suelos cohesivos, en capas de 20 cm con humedad adecuada. Se consiguen resultados satisfactorios entre 8 y 10 pasadas.



Figura 3.5 Rodillo pata de cabra.

Debido a su alta presión específica y a los efectos de amasado que producen las partes, se compactan bien los suelos altamente plásticos con poco contenido de agua e incluso pobres de aire y de vacíos. Como se trata de una máquina muy sencilla y robusta, el rendimiento que se obtiene es bueno. La masa de estos compactadores oscila entre 1 y 8 toneladas, se pueden acoplar en paralelo o en varias unidades para obtener mejores rendimientos.

Estos rodillos fueron diseñados para trabajar en suelos cohesivos y en particular en los terrenos arcillosos, pues al concentrar las fuerzas estáticas y dinámicas sobre áreas pequeñas, es más fácil conseguir la energía necesaria y suficiente para romper las fuerzas de cohesión entre sus partículas.

Las patas de estos rodillos producen una acción mezcladora y rompedora muy beneficiosa, sobre todo si el terreno no es homogéneo. También favorecen la unión entre los diferentes estratos.

El número máximo de patas por metro cuadrado a lo largo de un tambor es de 12, la forma de las patas varía con los diferentes modelos de rodillos para evitar que las patas, al salir del terreno durante la compactación, lo aflojen.

Los rodillos de patas de cabra se fabrican en 2 tipos: ligeros y pesados.

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS RODILLOS LIGEROS:**

Diámetro del tambor sin patas	1,0 m.
Longitud del tambor	1,2 m.
Longitud de la patas	0,18 m.

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS RODILLOS PESADOS:**

Diámetro del tambor sin patas	1,5 m.
Longitud del tambor	1,5 m.
Longitud de la patas	0,23 m.

#### **PRESIÓN QUE TRANSMITEN AL TERRENO LOS RODILLOS DE PATA DE CABRA:**

Con tambor vacío	de 10 a 21 kg/cm <sup>2</sup> .
Con tambor lleno de agua	de 17 a 34 kg/cm <sup>2</sup> .
Con tambor lleno de arena	de 30 a 42 kg/cm <sup>2</sup> .

#### **REGLAS PRÁCTICAS RECOMENDABLES PARA COMPACTAR CON RODILLOS PATA DE CABRA.**

- El material con la humedad óptima se extiende en la capa con el espesor especificado. En la primera pasada la pata penetra totalmente.
- Cada pasada sucesiva compacta más al material.
- Las patas del rodillo cuando quedan sin entrar indican la densificación.
- El apisonado posterior no aumenta la compactación.
- Durante la compactación es necesario traslapar 30 cm a cada lado del área para mejores resultados.
- La parte compactada se afina para borrar las huellas de las patas y se le da una recompactada con rodillo liso.

#### **3.2.4 RODILLO LISO.**

En estos equipos de compactación, la característica más importante es la presión que ejercen sobre el terreno. El área de contacto se considera en función del diámetro de los rodillos, el peso de la máquina y el tipo de suelo a través del cual se transmite la presión estática.

En estas máquinas su efecto de compactación alcanza muy poca profundidad en suelos cohesivos. En los suelos no cohesivos, causan grietas en la superficie transversal en dirección de la marcha y destruyen parte de su propio trabajo. Son útiles para el planchado y sellado de superficies regadas con emulsiones asfálticas.

El espesor que se recomienda para compactar con humedad óptima y con rodillos lisos, es el peso total en toneladas más el 25% de ese peso. Este tipo de rodillo tiene la ventaja de que cubre por completo el área por donde pasan los rodillos motrices, se fabrican en diferentes tamaños, con masas de 5 a 12 toneladas.



Figura 3.6 Rodillo liso.

Las aplanadoras tandem deben su nombre a la disposición de los rodillos en línea o en tandem. Pueden tener dos o tres rodillos y se fabrican en diversos tamaños, anchos y diámetros de rodillos con masas que varían de 3 a 14 toneladas.

El sistema de compactación empleado con los rodillos lisos consiste en iniciar la misma a bajas velocidades, primero se cubre toda el área y después se traslapan las rodadas de los rodillos traseros o motrices hasta obtener la compactación deseada.

En la siguiente tabla se muestran las masas de diferentes rodillos de acuerdo al tipo de suelo:

Tabla 3.1 Masas de rodillos de acuerdo al tipo de suelo.

TIPO DE SUELO	MASA DEL EQUIPO
Grupo intermedio de turbas arcillosas y suelos arcillosos con baja plasticidad (menor de 10).	De 1,27 a 1,63 toneladas.
Arenas bien graduadas con la cantidad suficiente de finos para actuar como relleno y aglutinante.	De 1,8 a 2,2 toneladas.
Suelos arcillosos con media o alta plasticidad.	De 1,8 a 2,2 toneladas.

La compactación debe iniciarse de las orillas hacia el centro del camino en las tangentes y de la parte interior a la exterior en las curvas.

### 3.2.5 RODILLOS VIBRATORIOS.

Hoy día es quizá la máquina más utilizada. En los últimos años ha sido tal el número de tipos y marcas disponibles en el mercado que resulta casi imposible conocerlas todas.

Entre los rodillos vibratorios se tienen diferentes clases, los hay con ruedas metálicas, con llantas neumáticas y además con auto-propulsión o de remolque.

El rodillo vibra con frecuencia baja mediante la acción de un motor independiente, este tipo de equipo produce una compactación muy buena en materiales arenosos.

Para variar la amplitud, se aumentan o disminuyen los contrapesos excéntricos, así como también la presión de inflado de los neumáticos. Otra característica que se debe tomar en cuenta con las máquinas vibratorias es la de su peso estático, ya que el efecto vibratorio sobre el suelo está en función del peso estático de la máquina y del movimiento vertical y horizontal de la misma.

Se emplean en la compactación de toda clase de suelos sin distinción: bases granulares, sub-bases, suelo-cemento, rellenos rocosos, asfaltos, arcillas, arenas, etc. y el éxito ha sido variable.



Figura 3.7 Rodillo vibratorio.

Hay un rango de resonancias suelo-vibrador para las cuales el efecto de ordenación granular y compactación da mejores resultados.

La amplitud y la frecuencia de la vibración influyen grandemente en los rendimientos.

Para cada tipo de suelo y el mismo contenido de agua, existen diferentes equipos de compactación, con amplitudes y frecuencias distintas. En general, se observa que en materiales con cierto contenido de arcilla, éstas se compactan mejor con frecuencias bajas y amplitudes altas.

También resulta claro que los materiales granulares no cohesivos bien graduados se compactan mucho mejor con frecuencias altas y amplitudes bajas. La variación de frecuencia se consigue con una caja de cambios que va unida a la del tractor. Éste varía de 1,0 a 1,8 r.p.m.

### **3.3 MÉTODOS QUÍMICOS.**

Para mejorar el suelo también existen diferentes sustancias químicas como la cal, el cemento Pórtland, asfaltos y otras sustancias. A continuación se describen las principales características de algunos de ellos.

### **3.3.1 MEJORAMIENTO DEL SUELO CON CAL.**

La estabilización con cal se utiliza para incrementar la resistencia de los suelos y disminuir su plasticidad debido a los cambios de humedad. La mezcla de suelo, cal y agua, reduce el índice plástico en forma considerable.

Cuando las arcillas presentan alta plasticidad, ésta se puede disminuir así como los cambios volumétricos por los contenidos de agua, con el sólo hecho de agregarle una pequeña proporción de cal.

La cal presenta tres cualidades que son importantes durante la construcción de una obra civil:

- a) La cal es un aditivo que se integra a los finos del suelo y cambia sus propiedades físicas al aumentar su volumen.
- b) Produce una cohesión entre las partículas del material.
- c) La cohesión se incrementa lentamente con el tiempo a una temperatura normal de 20°C, pero a temperaturas mayores de 40°C, aumenta en intensidad y velocidad y requiere cierto grado de humedad.

La cal presenta resistencia a la erosión. En suelos muy plásticos la contracción y la resistencia a la compresión se reducen. Las variaciones de humedad pueden destruir la cohesión producida con cal; sin embargo, mediante la compactación se incrementa la cohesión entre las partículas y aumenta la resistencia del material.

En muchos casos la cal además de cambiar las propiedades de los suelos, causa en ellos efectos aglutinantes y aumenta su resistencia debido a que el calcio que presenta la cal se combina con la sílice y la alúmina del suelo, formando silicatos de calcio y de alúmina que poseen grandes propiedades cementantes.

### **CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES A ESTABILIZAR.**

Los materiales que se utilizarán para terracerías, bases, sub bases, revestimientos se estabilizarán con cal si su índice plástico es superior a 10% y contengan 7% o más de partículas finas que reaccionen con la cal.

La cal viva y la cal hidratada que se utilice en la estabilización deben cumplir con la composición química que se muestran en las tablas 3.2 y 3.3.

La cal viva debe pasar por una malla de abertura de 25 milímetros y será retenida en la malla de 6,3 milímetros. Debe tener una elevación de temperatura mínima de 30°Celsius en 20 minutos y no debe presentar más del 15% del residuo en la malla número 50.

Tabla 3.2 Composición química de la cal viva para estabilizaciones.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR %</b>
Oxidos de calcio (CaO) y Magnesio (MgO) calculado sobre la muestra calcinada, mínimo.	60
Contenido de Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) cuando la muestra se toma en el lugar de fabricación, máximo.	3
Silice (SiO <sub>2</sub> ), Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y Óxidos de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), máximo.	8

Cuando se utilice cal hidratada se debe adicionar agua para producir una lechada que se adicionará al material por estabilizar, mediante los aspersores del equipo de estabilización y alcanzar un contenido de agua ligeramente superior al contenido de agua óptimo de compactación para facilitar el mezclado uniforme de la cal.

La cal hidratada producto de la calcinación de calizas, con menos del 5% de carbonato de Magnesio (MgCO<sub>3</sub>) no contendrá más del 3% de partículas retenidas en la malla número 100 y no más del 10% retenida en la malla número 200.

Tabla 3.3 Composición química de la cal hidratada para estabilizaciones.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR %</b>
Oxidos de calcio (CaO), bases no volátiles, mínimo.	80
Oxido de magnesio (MgO), máximo.	5
Contenido de Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ), máximo:	
1.- Si la muestra es tomada en el lugar de fabricación.	10
2.- Si la muestra es tomada en otro lugar diferente a la fabricación.	12
Agua libre, en la muestra original, máximo.	3
Óxido de Calcio (CaO) libre (sobrecalcinado) en la cal hidratada, máximo.	3



Se debe evitar la presencia de grumos al momento de la compactación. Para verificar que no haya ningún grumo se debe voltear la mezcla con espátulas largas y en intervalos largos.

Para que la cal sea aceptada por la S.C.T. el contratista de obra o el proveedor entregará a ésta un certificado de calidad por cada lote en donde se garantice el cumplimiento de los requisitos, según el tipo de cal establecida en el proyecto.

La S.C.T. puede verificar la calidad de la cal suministrada de acuerdo con lo que establece la Norma N-CMT 4-03-001 cal para estabilizaciones, en muestras obtenidas y mediante los procedimientos de prueba contenidos en los métodos indicados en dicha Norma.

Será motivo de rechazo el incumplimiento de alguno de los requisitos establecidos en las Normas.

### **PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.**

La capa inferior que se va a estabilizar debe estar totalmente terminada. El mezclado se realiza en una planta o en campo. En el primer caso se obtienen mejores resultados. La cal se agrega en forma de lechada, a granel o en seco.

Cuando se efectúa el mezclado a granel, el material que se va a mejorar debe estar disgregado, es decir se abre una parte y se le agrega el estabilizador distribuyéndose en el suelo. Para hacer un mezclado en seco se recomienda agregar una ligera cantidad de agua para evitar que se levante el polvo. Después de esto se agrega el agua necesaria y se extiende la mezcla y se le da un curado de 48 horas.

Se recomienda no estabilizar cuando amenace lluvia o cuando la temperatura ambiente sea menor a 5°C, además se recomienda que la superficie mejorada se abra al tránsito vehicular en un tiempo de 24 a 48 horas.

La percolación es un proceso dinámico que imita el desplazamiento de un fluido por otro dentro de un medio poroso. Las fuerzas capilares dominan las fuerzas viscosas y la dinámica es determinada por el radio de poro. La teoría de percolación ha sido aplicada con éxito en el estudio de reservas de petróleo, fracturamiento de macizos rocosos y a la predicción de propiedades mecánicas en suelos; por lo que se aplica a la modelación del comportamiento de inyecciones agua-cal en suelos.

El medio poroso representa al suelo, las inyecciones están constituidas por mezclas de agua-cal y el fluido desplazado, es el aire. El modelo permite a los ingenieros constructores y diseñadores de terraplenes hacer un cálculo óptimo de sistemas constructivos basados en lechadas de materiales estabilizantes.



En la figura 3.8 se muestra la estabilización de una carretera con cal, se aprovechan todas las tierras afectadas por el trazo y se nivela el firme del camino que se construye.



Figura 3.8 Estabilización con cal.

### **TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO.**

La cal para la estabilización de suelos debe ser transportada en cisternas presurizadas y dotadas de medios neumáticos o mecánicos para el traslado rápido de su contenido a los silos de almacenamiento o a los equipos que alimentan a las máquinas de extendido. Los silos de almacenamiento serán estancados y estarán provistos de sistemas de filtros. En el transporte, almacenamiento y manejo se tendrán en cuenta las normas indicadas en las fichas de seguridad para diferentes tipos de cal.

### **3.3.2 MEJORAMIENTO DEL SUELO CON CEMENTO.**

Al mejorar un material con cemento se piensa en aumentar su resistencia, pero también en disminuir su plasticidad, para que se logren estos efectos es importante que el material a mejorar tenga un porcentaje máximo de materia orgánica del 34%. Debe estudiarse el material que se encuentra a lo largo del camino o cantera ya que cada tipo de suelo requiere una cantidad adecuada para su estabilización.

Los suelos arenosos requieren del 7% al 10% en volumen de cemento y los suelos arcillosos requieren del 12% al 16% en volumen o más en algunos casos.

Se pueden utilizar todos los tipos de cementos, pero en general se emplean los de fraguado y endurecimiento normales. En algunos casos, para contrarrestar los efectos de la materia orgánica son recomendables los cementos de alta resistencia y si las temperaturas son bajas se puede recurrir a cementos de fraguado rápido o al cloruro de calcio como aditivo.

Existen dos métodos para estabilizar con cemento, uno llamado estabilizaciones del tipo flexible, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1% al 4%, con esto sólo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo. Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como estabilización rígida, en ella el porcentaje de cemento varía del 6% al 14%, este tipo de mejoramiento es muy común en las bases.

La estabilización de la tierra con cemento da lugar al llamado suelo-cemento, para lograr la estabilización se establecen 2 requisitos:

- 1) Incrementar la resistencia a la compresión al aumentar la cantidad de cemento.
- 2) Pasar la prueba de durabilidad, índice del comportamiento del material a largo plazo.

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

- a) Contenido apropiado de cemento.
- b) Contenido apropiado de humedad.
- c) Compactación adecuada.

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

De acuerdo con las Normas de la S.C.T. para estabilizar un suelo con cemento Pórtland, éste debe cumplir con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-2-02-001 Calidad del cemento Portland.

Cuando el material ya esté modificado con cemento Portland debe cumplir con el límite líquido, el índice plástico, el Valor de Soporte de California (CBR) y el Desgaste los Ángeles que correspondan entre los indicados en la Norma N-CMT-4-02-003 Materiales para bases tratadas.

La resistencia a la compresión simple del material estabilizado con cemento Pórtland determinada en especímenes cilíndricos, será la establecida en el proyecto o la que indique la Secretaría pero nunca inferior a 25 kg/cm<sup>2</sup>.

Los materiales estabilizados con cemento Pórtland se compactarán al 100% respecto al peso volumétrico seco máximo obtenido mediante la prueba AASHTO modificada.

### **PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.**

La zona de trabajo debe limitarse de acuerdo con la disponibilidad de equipos de compactación, debido a que cada tramo debe terminarse antes de que la mezcla comience a ganar resistencia.

Se despeja la zona del camino de piedras grandes, plantas y materia orgánica, se excava hasta encontrar terreno firme que servirá de apoyo a la base.

Si el suelo es arcilloso, presentará resistencia a pulverizarse, por lo que será necesario romper los terrones antes de pulverizarlo; si está muy húmeda se formará una masa pastosa difícil de mezclar lo que encarecerá el proceso; y si es arenoso conviene humedecerlo antes de agregarle el cemento.

La distribución del cemento se puede hacer mecánicamente, pero la forma más adecuada para lograr una distribución uniforme es manualmente. Conviene comenzar la distribución del cemento con una temperatura ambiente no inferior a los 5°C y que vaya en aumento; se hará de tal modo que la cantidad de cemento por unidad de superficie responda a la dosificación establecida.

La mezcla debe ser homogénea y para lograrlo se debe pasar varias veces el escarificador hasta la profundidad deseada, también se usarán discos rotatorios de arado hasta que se determine un mezclado total.

Hay dos tipos de mezcla: mezcla en seco y mezcla húmeda. La mezcla seca consiste en una vez distribuido el cemento se procede a mezclarlo con el suelo hasta lograr la homogeneidad requerida. La mezcla húmeda es la más usada y es en la que a la mezcla se le adiciona agua.

El agua es un elemento esencial para hidratar el cemento y para facilitar la compactación, al entrar en contacto con el cemento provoca una reacción química y desprendimiento de calor, de modo que para mantener la humedad óptima de compactación se agregará un 3% de agua adicional al porcentaje obtenido en laboratorio para cada tipo de suelo.

Posteriormente comienza la compactación de la capa formada hasta lograr una densidad igual. Durante la compactación debe mantenerse el contenido de agua dentro de los límites, como casi siempre los suelos que se estabilizan son finos, el compactador adecuado es el pata de cabra. Cuando el suelo que se estabiliza es grava-arena, entonces el rodillo adecuado es aquel que cuenta con un vibrador y llantas en el eje motriz.

Como el cemento debe contener la suficiente cantidad de agua para que pueda endurecer, es necesario mantener el contenido de humedad de la mezcla durante la fase principal de endurecimiento, por lo que las estabilizaciones deben curarse durante siete días como mínimo para lograr una resistencia satisfactoria.

La elección de mejorar un suelo con cemento o con cal depende del tipo de suelo a mejorar y del costo, se recomienda mejorar con cemento aunque es más costoso, sin embargo si no se cuenta con la inversión suficiente la cal puede ser una segunda opción.

### **3.3.3 MEJORAMIENTO DEL SUELO CON ASFALTOS.**

El material asfáltico que se emplea para mejorar un suelo puede ser el cemento asfáltico o bien una emulsión asfáltica, el primero es un producto de la destilación del petróleo y la emulsión asfáltica es una dispersión de asfalto en agua en forma de pequeñas partículas con diámetros entre 3 y 9 micras.

En las estabilizaciones, las emulsiones asfálticas son las más usadas ya que éste tipo de productos pueden emplearse con materiales pétreos húmedos y no se necesitan altas temperaturas para hacerlo trabajable; además, en las emulsiones se emplea un emulsificante que puede ser sodio o cloro, para darle carga a las partículas y evitar que se unan dentro de la emulsión; cuando se emplea sodio, se obtiene una emulsión aniónica con carga negativa y las que tienen cloro son las emulsiones catiónicas que presentan una carga positiva.

Si se mezcla un suelo con un producto asfáltico que le proporcione suficiente cohesión se logra estabilizarlo adecuadamente, todos los productos asfálticos son pegajosos y cohesivos por lo que pueden ser empleados para proporcionar la cohesión necesaria a los suelos naturales que carezcan de ésta propiedad.

El tipo de suelo más fácil de estabilizar es aquel que contiene material grueso con más de 6 mm de diámetro.

De acuerdo con las Normas de la S.C.T. al estabilizar un suelo con asfalto éste debe cumplir con los requisitos de calidad que se establecen en la Norma N-CMT-4-05-001 Calidad de materiales asfálticos.

Para estabilizar los materiales no plásticos, como las arenas se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesaria para obtener una estabilidad mínima de 0,64 kilo Newton determinada por el método de resistencia a la extrusión de Hubbard Field.

Para estabilizar los materiales plásticos que tengan valores de límite líquido y equivalente de arena fuera de los límites indicados en la Norma N-CMT-4 02-003

Materiales para bases tratadas, se mezclarán con la cantidad de producto asfáltico necesarias para cumplir con los requisitos de calidad indicados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Requisitos de calidad de los materiales estabilizados con productos asfálticos.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>
Estabilidad: kg mínimo	180
Expansión: % máximo	2
Absorción: % máximo	5

Cuando en la elaboración de la base de mezcla asfáltica se utilice cemento asfáltico, la mezcla se hará a una temperatura baja, que permita obtener una mezcla y cubrimiento del material pétreo uniforme. En general la temperatura de mezclado debe corresponder a una viscosidad Saybolt Furol de 85 más menos 10 segundos.

Cuando en la elaboración de la mezcla asfáltica se utilice emulsión asfáltica se debe utilizar una de rompimiento lento o medio y cuando se utilice asfalto rebajado, éste debe ser de fraguado rápido. La temperatura de las emulsiones asfálticas al momento de mezclado será de 5 a 40 grados Celsius, en el caso de asfaltos rebajados será de 60 a 80 grados Celsius.

Tabla 3.5 Vacíos en el agregado mineral ( VAM ) para bases de mezcla asfáltica diseñadas mediante el método Marshall.

<b>Tamaño máximo del material pétreo utilizado en la mezcla.</b>		<b>Vacíos en el agregado mineral (VAM) % mínimo.</b>
<b>mm</b>	<b>Designación</b>	
4,75	No. 4	18
6,3	1 / 4"	17
9,5	3 / 8"	16
12,5	1 / 2"	15
19	3 / 4"	14
25	1"	13
37,5	1 1/2"	12

No se deben aplicar los materiales asfálticos cuando la temperatura ambiente sea menor a 5 grados Celsius, cuando este lloviendo o haya amenaza de lluvia.

El espesor máximo de la base de la mezcla asfáltica que se tienda debe ser aquel que el equipo sea capaz de compactar, de tal manera que la diferencia entre los grados de compactación de los 3 centímetros superiores e inferiores sea menor o igual de 1%.

Las bases de mezcla asfáltica se compactarán como mínimo al 95% de su masa volumétrico seco máximo obtenido.

### **PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.**

Para la estabilización del suelo se emplea una emulsión con agua.

Después de mezclar el suelo con una emulsión asfáltica, se debe extender antes de emplear el material en la construcción de las capas para permitir que se evapore. Las emulsiones de asfalto son muy fluidas y se mezclan fácilmente con el suelo húmedo.

El suelo estabilizado con asfalto debe ser curado en aire seco a una temperatura aproximadamente de 40°C.

Aunque la estabilización con asfalto no mejora la resistencia de la tierra, sí reduce significativamente la absorción de agua. En otras palabras, aunque la resistencia de suelo en seco no sea muy alta, ésta no se reduce cuando se humedece.

La estabilización con asfalto es más efectiva en suelos arenosos y limosos con un límite líquido entre 25% y 35% y un índice de plasticidad entre 2,5% y 13%. La presencia de materia orgánica, sulfatos y sales minerales puede ser muy dañina. Un posible remedio es añadir 1% de cemento.

Los asfaltos rebajados están presentes en México.

### **ASFALTOS ESPUMADOS.**

Cualquier asfalto caliente en contacto con el agua, forma espuma y su volumen aumenta rápidamente. Para muchos, esta situación no es deseada y en tales casos se utilizan agentes anti-espumantes (siliconas), para prevenir que esto ocurra.

En 1956, el Dr. Ladis H. Csanyi, profesor de la Estación Experimental de Ingeniería de la Universidad del Estado de Iowa, USA, vio la posibilidad de usar el

asfalto espumado en la estabilización de suelos. Espumar el asfalto reduce su viscosidad considerablemente y aumenta sus propiedades adherentes.

No se involucra ninguna reacción química, únicamente las propiedades físicas del asfalto son alteradas. Cuando el agua fría entra en contacto con el asfalto caliente, se convierte en vapor, el cual es atrapado por burbujas de asfalto. Sin embargo, éste no es un estado permanente, después de algunos minutos el asfalto retoma sus propiedades originales. El asfalto espumado se caracteriza en términos de una relación de expansión de escasa vida. La relación de expansión de una espuma se define como la relación entre el máximo volumen alcanzado por la espuma contra su volumen original.

El período (o intervalo de tiempo) es el lapso desde el momento que la espuma alcanza su máximo volumen contra el tiempo en que baja a la mitad de ese volumen. En 1968, Mobil Oil Australia modificó el procedimiento original, agregó agua fría en lugar de vapor en una corriente de asfalto caliente con un sistema de baja presión.

Esto hizo el proceso mucho más práctico y económico. La espuma se formaba dentro de una cámara de expansión, posteriormente era dispersada a través de una serie de boquillas sobre el conjunto de los agregados pero estos eran propensos a obstruirse y el fabricante no pudo controlar las características de la espuma.

El proceso, que se realiza en la cámara mezcladora de la máquina de estabilización, incluye la expansión del asfalto líquido caliente y el siguiente mezclado con el material del camino pulverizado durante el proceso de recuperación. Este proceso economiza energía y asfalto sobre otras técnicas de estabilización.

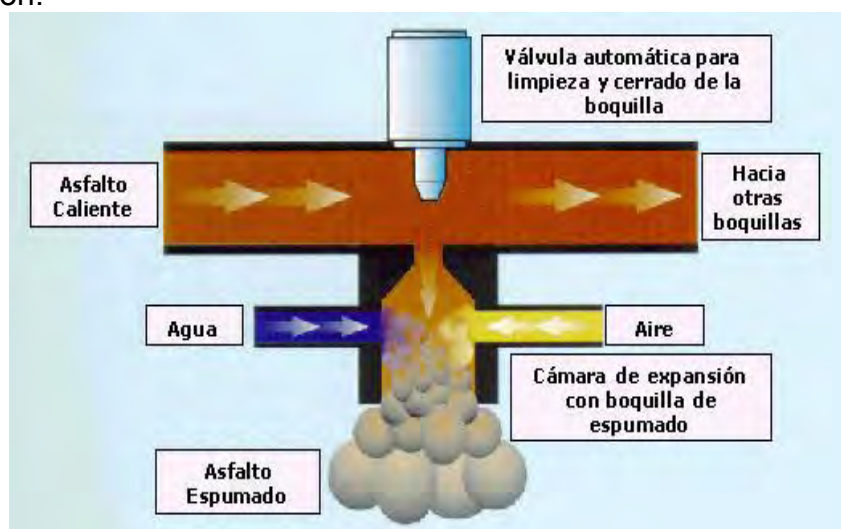


Figura 3.9 Cámara de expansión



Esto se debe al hecho que cuando una menor cantidad de agua se inyecta en asfalto líquido caliente, se produce una significativa expansión y se crea una película delgada de asfalto con aproximadamente diez veces más potencial de cobertura que el asfalto en su estado líquido. El asfalto expandido produce un recubrimiento más completo del material pulverizado en todo el espesor de la operación.

Se puede usar un Caterpillar RR-250 equipado con un sistema Soter's, el cual es uno de los más utilizados en el proceso con asfalto espumado.

El sistema Soter's es un método de reciclado que hace uso del asfalto espumado.

Durante la estabilización, el material es mezclado en sitio y la inyección del asfalto espumado se hace directamente en la cámara de mezclado. El espesor de la estabilización depende del proyecto, pero debe mencionarse que es posible alcanzar espesores de hasta 300 mm, dado que prácticamente no existe curado.

Para el ojo inexperto, el material estabilizado con espuma parece no contener ningún significado, pero cuando el material es compactado, la superficie se va sellando y obscureciendo. A diferencia de los asfaltos emulsionados, el material sólo necesita uno o dos días de curado, después de lo cual puede colocarse la capa asfáltica superficial. El método Soter's se ha usado en unos 3 millones de metros cuadrados de caminos, bulevares y autopistas de Montreal, Québec. Actualmente se utiliza en Japón, Alemania, Inglaterra, África, México, Australia y Estados Unidos.

### **3.4 MÉTODOS FÍSICOS.**

Para mejorar el suelo existen métodos físicos como geotextiles y geomallas. A continuación se describen las principales características de cada uno de ellos.

#### **3.4.1 GEOTEXTILES.**

Los tejidos producidos mediante el entrelazamiento de dos o más juegos de hilos en dos direcciones pueden ser de polipropileno, de poliéster o poliamidas. Los geotextiles tejidos pueden coserse para crear una capa con una alta resistencia.

El geotextil es una malla compuesta por fibras sintéticas cuyas funciones principales se basan en su resistencia mecánica a la perforación, tracción y a su capacidad drenante.

Las características más importantes de los geotextiles son su permeabilidad al agua, su resistencia a los agentes químicos y a la humedad y su resistencia a los rayos ultravioleta.





Figura 3.10 Estabilización con geotextiles.

Sirven en la construcción de sub-bases de carreteras y de pedraplenes para ferrocarriles, para evitar posibles erosiones. En canales y muros de contención los geotextiles realizan función de drenaje.

Los geotextiles sirven para separar tierras de diferente granulometría y estabilizan el terreno.



Figura 3.11 Estabilización de suelos con geotextiles.

Se caracterizan por su estructura permeable y su gran resistencia a la tensión, desgarre y deterioro químico. Se fabrican en 2,50 m de ancho y 100 m de largo.

A continuación se describen las funciones que desempeñan los geotextiles:

### **SEPARACIÓN.**

La separación impide el contacto entre dos superficies de distintas propiedades físicas, lo cual evita que se mezcle y contamine aunque permite el flujo libre de líquidos filtrándolos a través del geotextil.

En la función de separación deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Resistencia a la tracción.
- b) Espesor del geotextil.
- c) Resistencia al punzonamiento.

Para evitar la mezcla de materiales los geotextiles deben soportar las cargas estáticas y dinámicas del material de aporte y del tráfico durante su colocación, así como también la retención de finos.

### **FILTRACIÓN.**

La filtración es la propiedad de retención de un material de ciertas partículas sometidas a fuerzas hidrodinámicas al tiempo que permite el paso de fluidos. La función de filtro debe garantizar su estabilidad hidráulica.

En la función de filtración se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Permeabilidad.
- b) Abertura eficaz de los poros.
- c) Espesor del geotextil.

### **DRENAJE.**

El drenaje es el proceso mediante el cual se realiza el paso de un fluido (líquido o gas) de un lugar a otro, evacuándolo. De esta manera se efectúa la eliminación por evacuación en el espesor del geotextil sin producir el lavado de finos.

En esta función de drenaje deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Permeabilidad en el plano del geotextil.
- b) Espesor del geotextil.

### 3.4.2 GEOMALLAS.

Los materiales del que están hechas las geomallas poseen una estabilidad dimensional en ambas direcciones, son resistentes a la degradación y a componentes químicos y biológicos, son ligeras y fáciles de instalar. Existen geomallas biaxiales y uniaxiales. Ofrecen la ventaja de una mayor resistencia a la tracción con menor deformación. Su porosidad puede ser controlada por una serie de aperturas tejidas en su estructura, lo cual facilita la consolidación del suelo sin disminuir su resistencia a la tracción.

La principal función de las geomallas es el refuerzo. El uso del tipo de geomalla a utilizar está ligado a la dirección en que los esfuerzos se transmiten en la estructura, por ejemplo, en aplicaciones en muros, en suelo reforzado o en terraplenes, se utilizan las geomallas mono-orientadas son geomallas con una resistencia y rigidez mayor en el sentido longitudinal que en el transversal. Mientras que en estructuras en que la disipación de los esfuerzos se realiza de forma aleatoria y en todas las direcciones, por ejemplo, estructuras de pavimento o cimentaciones superficiales, se utilizan geomallas bi-orientadas o bi-direccionales.



Figura 3.12 Estabilización de suelos con geomallas.

#### **VENTAJAS Y PROPIEDADES.**

- a) Alarga la vida de servicio de la carretera.
- b) Evita la aparición de blandones y el lavado de finos de la capa de soporte.
- c) Mantiene la capacidad portante.
- d) Elimina las fisuras por reflexión.
- e) Ahorro a largo plazo.

Las geomallas están fabricadas con filamentos de poliéster de alta resistencia, y recubierta por P.V.C. para garantizar una gran durabilidad. Las principales ventajas del poliéster son su elevado módulo de elasticidad, resistencia a largo plazo y la resistencia química y biológica del producto.

En lugares donde existen taludes inestables y áreas de erosión constante, como orillas de ríos o puntos muy transitados, se instalan geomallas sintéticas que forman un entramado con las raíces de las plantas.



Figura 3.13 Estabilización de talud con geomallas.

Hay cuatro aplicaciones principales de las geomallas para la estabilización de suelos:

a) Reducción del espesor de capa.

Al reducir el espesor del recubrimiento en un 33%, con respecto a un diseño estándar, se pueden resolver fácilmente los problemas de instalación y ahorrar un 25% en el costo de los trabajos de mejora del terreno.

b) Aumento de la vida útil.

La rehabilitación de una carretera, especialmente si ésta requiere una reconstrucción profunda, es una obra cara. Un estudio adecuado de ingeniería puede demostrar que la inclusión de una capa estabilizada mecánicamente aumentará la vida de servicio útil del pavimento de la carretera en un factor de tres o más y por lo tanto el presupuesto anual de mantenimiento, de la nueva capa de asfalto se reducirá, aproximadamente en un 50%.

## c) Aumento de la capacidad portante.

En suelos con baja capacidad de carga, tales como los de turba es necesario construir carreteras de acceso que tengan que soportar cargas muy pesadas.

El acceso de las grúas a instalaciones de aerogeneradores en el campo es un buen ejemplo de la necesidad de aumentar la capacidad portante y de diseñarla para trabajar en condiciones de seguridad.

## d) Control del asentamiento diferencial.

Muchos lugares de construcción se desarrollan en áreas de desarrollo sobre terrenos degradados con subsuelos de calidad de soporte variable y capas de pavimento sometidas a asentamiento diferencial. Debido a los registros de obra, los proyectos pueden visitarse después de muchos años de servicio, para comprobar que el perfil de la superficie se ha conservado. Se han conseguido ahorros de aproximadamente un 75% en soluciones tradicionales tales como, plataformas sobre pilotes.

Para las aplicaciones de estabilización de terrenos con baja capacidad de carga, el uso de las geomallas es limitado en su efectividad debido a su baja resistencia a la tensión, su incapacidad para separar dos materiales diferentes, al no servir como filtro, al necesitar conectores mecánicos y el alto costo de los mismos.

Las geomallas generan un incremento en la resistencia al corte del suelo. Durante la aplicación de una carga normal al suelo, éste se compacta de manera que se produzca una interacción entre las capas de suelo que rodean la geomalla.



Figura 3.14 Compactación del suelo por encima de la geomalla.



Con estas condiciones, se requerirá una carga considerablemente mayor para producir un movimiento en el suelo. El compuesto suelo-geomalla reduce la resistencia al movimiento, por lo tanto, el uso de las geomallas produce una condición de cohesión, inclusive en materiales granulares.



Figura 3.15 Colocación de la geomalla paralelo al talud.

---

---

## **CAPÍTULO 4 APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO.**

En este capítulo se describe un caso práctico de mejoramiento de suelos a base de cal, de un material que contiene arcillas expansivas, para poder construir la losa de cimentación sobre la cual se va edificar una casa habitación.

Se realizó un estudio de Mecánica de Suelos, en donde se hicieron dos pozos a cielo abierto, para determinar las características del suelo y con los resultados obtenidos se diseñó la losa de cimentación, se propuso una alternativa para sustituir el suelo de apoyo y se utilizó cal para mejorar el suelo.

Más adelante se describe el proceso constructivo, la colocación del material de apoyo y del mejoramiento y las gráficas de los resultados obtenidos en laboratorio.

### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

Se describe la aplicación de una alternativa de solución con material importado y un mejoramiento de suelos a base de cal, para la construcción de una casa de campo ubicada en la calle Cristóbal Olid # 40, lote 2, condominio “Los Apantles”, municipio de Jiutepec, Estado de Morelos.

Se muestra la descripción del sitio, sus alrededores y un recorrido superficial de aspectos geológicos, donde con apoyo de la información geológica que se tiene de la bibliografía del lugar, se dan a conocer las propiedades del predio, también se muestran las características estratigráficas y físicas del suelo, las pruebas de laboratorio que se realizaron, la prueba de compresión triaxial, no consolidada – no drenada, (UU), así como los registros de laboratorio y las gráficas de esfuerzo-deformación unitaria. Así mismo, se determinó el peso volumétrico del suelo en estado natural.

Se utilizó un consolidómetro para medir la capacidad expansiva de los materiales que se encuentran entre la superficie y 2.5 m de profundidad.

Más adelante se muestran los registros de laboratorio con los resultados obtenidos de estas pruebas. El terreno tiene un desnivel y por ello se colocó una plataforma para alcanzar el nivel de proyecto, sirviendo de apoyo para la cimentación que se proyectó.

Se muestra el procedimiento constructivo para la excavación y la plataforma de los materiales de mejoramiento sobre los que se desplantará la cimentación.

También se presenta un plano que muestra la planta de conjunto para observar la ubicación de los pozos a cielo abierto.

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL SITIO.

El municipio de Jiutepec se encuentra al Oriente de Cuernavaca, el cual se localiza en la sub-provincia Cuenca Balsas-Mexcala, que está formada por mesetas, cerros aislados, lomeríos y valles. Al Oriente y al Sur del municipio se localizan pequeños cerros constituidos por rocas sedimentarias e ígneas extrusivas, que corresponden a calizas y basaltos respectivamente. En la figura 4.1 se muestra la ubicación de Jiutepec en la carta geológica del estado de Morelos.

La casa que se proyecta forma parte del fraccionamiento San José, sus alrededores presentan una serie de canales llamados “Los Apantles”, tienen una forma rectangular y constan de un área de 1600 m<sup>2</sup> aproximadamente.

El proyecto consiste en la construcción de una estructura principal constituida por planta baja y un nivel. La planta baja cubrirá un área aproximada de 380 m<sup>2</sup> y el nivel superior ocupará un área de 103 m<sup>2</sup>, los cuáles transmitirán al suelo una carga de 2.2 t/m<sup>2</sup> y 4.2 t/m<sup>2</sup>, respectivamente.



Figura 4.1 Carta Geológica del Estado de Morelos.



---

## **RECORRIDO GEOLÓGICO SUPERFICIAL.**

El sitio tiene depósitos sedimentarios con lomeríos y superficies planas cortadas por ríos con valles estrechos, constituidos por suelos aluviales, de color café, café oscuro y negro, con partes areno-gravosas de la edad Cenozoica y del periodo Cuaternario, producto del depósito de los materiales erosionados en las partes altas de la zona y que debido al interperismo se han degradado a materiales de alta plasticidad, que dan lugar a la formación de valles y rellenan los cauces de los arroyos.

Los depósitos sedimentarios de la zona corresponden a rocas del tipo conglomerado así como a suelos del tipo aluvial de la era Cenozoica del periodo Cuaternario; los depósitos volcánicos son de tipo basáltico de la era Cenozoica del periodo Terciario.

Los depósitos aluviales se encuentran erosionados y alterados por los procesos de urbanización del fraccionamiento y del condominio, en el que los canales “Los Apantles” cambiaron su trayectoria original.

## **CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS Y FÍSICAS DEL SUELO.**

Para determinar las características estratigráficas y físicas del suelo se excavaron dos pozos a cielo abierto denominados: PCA-1 y PCA-2, con profundidades de entre 2.1 y 2.5 m y se obtuvieron muestras inalteradas de los materiales, con esto se determinó la estratigrafía de las paredes de los pozos mediante técnicas de campo.

La localización de la planta de los pozos a cielo abierto se muestra en la figura 4.2. La estratigrafía que se observó en los pozos a cielo abierto es la siguiente:

Al seguir la pendiente del terreno en dirección Noroeste a Sureste con un espesor medio de 0.2 m se encontró una capa de suelo vegetal que incluye al relleno.

Subyaciendo a la capa vegetal entre 0.65 y 0.8 m se observaron arcillas con muy poca arena fina con gravas, raíces de color café oscuro y color marrón con un contenido de agua de 24.73%, de consistencia media, con límite líquido de 53.5% y límite plástico de 23.89%, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se clasifica como una CH. Es de expansibilidad media.

Bajo este estrato y entre 1.0 y 1.6 m se encontraron arcillas poco arenosas y limos arcillosos poco arenosos, con contenido de agua variable entre 39.09% y 46.34%, de consistencia media, con límite líquido de entre 92.48% y 97.20% y límite plástico de entre 35.83% y 43.75%, con contracción lineal de 19%, se clasifica de acuerdo al SUCS como una CH en la parte alta y MH en la parte baja.

---

Su densidad de sólidos es de 2.4, con una cohesión de 6.4 t/m<sup>2</sup> y ángulo de fricción de 0.5°, con peso volumétrico húmedo de 1.43 t/m<sup>3</sup> obtenidos en la prueba de compresión triaxial, en prueba de compresión no confinada se observó una cohesión de 3.26 t/m<sup>2</sup>, con un grado de saturación de entre 68% y 78% susceptible de aumentar su volumen al incrementar su grado de saturación, ya que cuando el contenido de agua del material se aproxima a su límite plástico, su límite líquido es mayor de 97% y su grado de saturación es menor de 80%. El material en estudio se encuentra en algunas zonas con las condiciones mencionadas anteriormente, pero no en toda el área a la misma profundidad, ni con las mismas condiciones de expansibilidad.

En el siguiente estrato se observaron arcillas plásticas con contenido de agua de 40.83%, de consistencia media a firme, con límite líquido de 114.85% y límite plástico de 34.57%, con contracción lineal de 20.1%, clasificada de acuerdo al SUCS como una CH, su densidad de sólidos es de 2.41, con una cohesión de 2.7 t/m<sup>2</sup> y ángulo de fricción de 7°, con peso volumétrico húmedo de 1.65 t/m<sup>3</sup>, obtenidos en prueba de compresión triaxial, en prueba de compresión no confinada se obtuvo una cohesión de 2.39 t/m<sup>2</sup> susceptible de aumentar su volumen, al igual que el estrato anterior no en toda el área a la misma profundidad se tienen las mismas condiciones de expansibilidad.

De acuerdo a los resultados de las pruebas de saturación bajo carga, los materiales de este estrato con una presión de 1 t/m<sup>2</sup> muestran una deformación unitaria por expansión de 6% al saturarse y una presión que controla la expansión de 7.6 t/m<sup>2</sup> como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4.

### **4.3 USO DE LA CAL EN SUELOS EXPANSIVOS Y ARCILLOSOS.**

La estabilización de suelos con cal es considerada como una de las formas más antiguas de mejoramiento de suelos, en los suelos arcillosos reduce la expansión provocada por los cambios de humedad.

Las arcillas que presentan alta plasticidad son difíciles de mezclar y compactar, y experimentan grandes cambios de volumen, al agregar a estas arcillas cierta cantidad de cal se reduce su índice plástico y su contracción lineal.

Los suelos expansivos son arcillas plásticas que por su alto contenido de minerales arcillosos presentan cambios de volumen al modificar su humedad, se caracterizan por un comportamiento de expansión y contracción al incrementar y reducir su contenido de agua. La diferencia de los suelos expansivos con los suelos comunes, radica en que los suelos expansivos llegan a alcanzar niveles de expansión que generan daños a las obras construidas sobre ellas, como edificaciones, obras hidráulicas, carreteras, puentes, etc.

La adición de cal a suelos arcillosos y expansivos es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y aumentar su resistencia. Los porcentajes por agregar varían de 2% a 6% con respecto al suelo del material por estabilizar, con estos porcentajes se consigue estabilizar la actividad de las arcillas obteniéndose un descenso en el límite plástico y aumentar la resistencia.

El efecto básico de la cal es la construcción de silicatos de calcio, que se forman por la acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementantes.

Se recomienda no agregar más del 8% de cal, ya que con esto se aumenta la resistencia pero también incrementamos la plasticidad. Los estudios que se deben realizar a las mezclas estabilizadas con cal son: límites de Atterberg, granulometría, VRS y compresión. Además estos estudios también se realizan a los suelos estabilizados con puzolanas, cloruro de sodio y cemento.

El tratamiento de suelos arcillosos mediante la adición de cal logra los siguientes objetivos:

- a) El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la pulverización, lo cual facilita su trabajabilidad.
- b) En áreas pantanosas donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la cal facilita el disgregado del suelo, y a su vez propicia un secado más rápido.
- c) Se reducen las contracciones y expansiones debidas a los cambios húmedos.
- d) La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de pavimento.
- e) La cal es el material más utilizado, por la versatilidad en su manejo, por su aplicación y su bajo costo.

#### **4.4 PRUEBAS DE LABORATORIO.**

Todas las muestras que se obtuvieron se clasificaron de forma visual y al tacto en estado húmedo y seco, mediante el SUCS; también se determinó su contenido natural de agua. En la figura 4.5 se presentan los registros de laboratorio con los resultados de estos trabajos.

En los estratos representativos se hicieron pruebas para determinar los límites de consistencia y se determinó el porcentaje de finos, si se trataba de suelos finos o suelos gruesos en ambos casos se determinó la densidad de sólidos, en la figura 4.6 se muestra la descripción de las profundidades del suelo.

En la figura 4.7 se muestra la descripción de los suelos expansivos.

Se efectuaron las pruebas de límites de consistencia y compresión simple en muestras inalteradas para conocer los parámetros de resistencia del suelo. En las figuras 4.8 a 4.11 se muestran los registros obtenidos en laboratorio.

Los resultados de las pruebas efectuadas a las mezclas de arcilla estabilizadas con cal y sin cal se muestran en las figuras 4.12 a 4.15, se observa que la presión de expansión se reduce a casi el 90% con respecto a las arcillas estabilizadas sin cal, también se observa la reducción del límite líquido e índice de plasticidad.

En las figuras 4.16 a 4.25 se muestran los resultados obtenidos en laboratorio de el círculo de Mohr, gráficas de esfuerzo-deformación unitaria, de las pruebas de compresión triaxial no consolidada-no drenada (UU). Así mismo, se determinó el peso volumétrico en estado natural.

Los perfiles estratigráficos de las arcillas de expansividad media y muy alta realizadas en las muestras de los pozos a cielo abierto se muestran en la figura 4.26 mediante un corte estratigráfico.

Se efectuaron pruebas de saturación bajo carga para medir la capacidad expansiva de los materiales empleando un consolidómetro, para lo cual la muestra de suelo se confinó en un anillo de 8 cm de diámetro y 2 cm de espesor, la parte expuesta al suelo se protege por discos rígidos porosos que permiten la saturación y el drenaje del espécimen durante la prueba. La muestra junto con los discos porosos se colocó dentro del tazón del consolidómetro donde se midieron las deformaciones verticales al saturarse el material.

En materiales con comportamiento expansivo se consolidaron las probetas y al saturarse se aplicaron diferentes presiones y una vez que se estabilizó la deformación se saturó la muestra.

#### **4.5 ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN.**

Al conocer las características arquitectónicas del conjunto, se observó un desnivel por lo que se colocó un relleno el cual permitió tener una plataforma horizontal y con ello se mejoraron las propiedades mecánicas de los materiales del suelo, en particular la potencialidad de expansividad que presentaban los materiales que se encontraron entre la superficie y 2.5 m de profundidad. Por lo que el diseño de la cimentación de las estructuras debe minimizar los movimientos diferenciales que pudieran presentarse al saturarse los materiales de apoyo de la cimentación.

Por lo anterior la alternativa de cimentación que se juzga más adecuada para la estructura proyectada es la siguiente:

Se utilizó una losa de cimentación con contratrabes invertidas, con un área en planta de 0.5 m mayor a la cubierta por la estructura desplantada sobre una plataforma de materiales de relleno, con espesor variable entre 0.5 y 1.10 m con el proceso constructivo que más adelante se indica.

Para tener un mejor comportamiento de los hundimientos diferenciales se utilizó una losa sugerida por el estructurista con las siguientes características:

Diseñada con una capacidad de carga de 13 t/m<sup>2</sup>, peralte mínimo de la losa de cimentación 12 cm, o mayor de acuerdo al análisis estructural, reforzada con doble parrilla de acero estructural; con un sistema reticular con contratrabes interiores de 40 cm y una contratrase perimetral, con peralte suficiente que permita confinar los materiales de la plataforma como se muestra en la figura 4.27.

A continuación se presenta la revisión de la cimentación propuesta siguiendo el criterio establecido en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004).

### **ACCIONES.**

Para la revisión de los estados límites de falla y de servicio de la cimentación de las estructuras se siguió el criterio establecido en el Reglamento de Construcciones en el que se consideran las siguientes acciones para cada uno de las estructuras:

- a) Combinación de cargas permanentes más cargas vivas con intensidad máxima, que incluye el peso propio de la cimentación; estas cargas se afectarán por un factor de carga de 1.4 y se consideran en la revisión del estado límite de falla en condiciones estáticas.
- b) Combinación de cargas permanentes y cargas vivas con intensidad instantánea, que incluye el peso de la cimentación, más la acción accidental más crítica por efecto sísmico correspondiente a un momento de volteo. Estas cargas se afectarán por un factor de carga de 1.1 se empelarán en la revisión del estado límite de falla en condiciones dinámicas.
- c) Combinación de cargas permanentes y cargas vivas con intensidad media, que incluye el peso de la cimentación; estas cargas se afectarán por un factor de carga

de 1.0 y se emplearán en el estado límite de servicio correspondiente a la estimación de asentamientos elásticos.

### **ESTADOS LÍMITES DE FALLA EN CONDICIONES ESTÁTICAS.**

Se hizo la revisión de la estabilidad de las cimentaciones ante el estado límite de falla en condiciones estáticas y se consideró la combinación de cargas permanentes más cargas vivas con intensidad máxima, más el peso de la cimentación, afectadas por un factor de carga de 1.4, mediante el cumplimiento de la siguiente desigualdad:

$$\sum Q F_c < RFR \text{ ----- ( 1 )}$$

Donde:

$\sum Q$ : Suma de las acciones verticales debidas a la combinación de cargas permanentes más cargas vivas con intensidad máxima, más el peso de la cimentación en toneladas.

$F_c$ : Factor de carga adimensional e igual a 1.4.

$R$ : Capacidad de carga de los materiales de apoyo de la cimentación, que es función del tipo de cimentación empleada.

$FR$ : Factor de resistencia, adimensional e igual a 0.7.

### **CAPACIDAD DE CARGA DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN.**

La capacidad de carga admisible de los materiales que subyacen a la cimentación se determinó al considerar que los materiales afectados por la superficie potencial de falla son suelos cohesivos y aplicando el criterio señalado en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004) dado por la siguiente expresión:

$$RFR = (c N_c FR + P_v) \text{ ----- ( 2 )}$$

Donde:

$RFR$ : Capacidad de carga admisible de la losa de cimentación, ya afectada por su factor de resistencia correspondiente, en  $t/m^2$ .

$C$ : Cohesión del material de apoyo de cimentación a lo largo de la superficie potencial de falla, en  $t/m^2$ .

$FR$ : Factor de resistencia adimensional e igual a 0.7.

Pv: Presión vertical total a la profundidad de desplante de la cimentación, en t/m<sup>2</sup>.

Nc: Coeficiente de capacidad de carga, adimensional y dado por la siguiente expresión:

$$Nc = 5.14 (1 + 0.25 Df/B + 0.25 B/L) \text{ ----- ( 3 )}$$

Donde:

Df: Profundidad de desplante de la losa de cimentación en m.

B: Ancho de la losa de cimentación en m.

L: largo de la losa de cimentación, en m.

Con una cohesión media a lo largo de la superficie potencial de falla de 2.7 t/m<sup>2</sup> y un peso volumétrico del suelo de 1.43 t/m<sup>3</sup>, obtenidos de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas, se obtuvo una capacidad de carga admisible de los materiales del subsuelo de 13 t/m<sup>2</sup>.

Con la combinación de cargas permanentes mas cargas vivas con intensidad máxima, la desigualdad se satisface:

$$\sum Q Fc < RFR$$

$$Q Fc = 2.8 \times 1.4 = 3.92 \text{ t/m}^2 < RFR = 13 \text{ t/m}^2.$$

Por lo tanto la cimentación es estable ante el estado límite de falla en condiciones estáticas.

### **ESTADO LÍMITE DE FALLA EN CONDICIONES DINÁMICAS.**

Considerando la combinación de cargas permanentes y cargas vivas con intensidad instantánea y acción accidental más crítica (sismo), mas el peso de la cimentación, afectadas por un factor de carga de 1.1 debe comprobarse que se satisfaga la siguiente desigualdad:

$$\sum Q Fc / AR < R$$

Donde:

$\sum Q$ : Suma de las acciones verticales a tomar en cuenta en la combinación considerada en T.

Fc: Factor de carga, que para este caso es igual a 1.1.

R: Capacidad de carga de los materiales que subyacen a la losa de cimentación.

AR: Área reducida de la losa de fondo de cimentación para tomar en cuenta el momento de volteo debido al sismo igual a:

$$AR = ( B - 2 e ) \times L \text{ -----( 4 )}$$

Donde:

B: Ancho de la losa de cimentación.

L: Largo de la losa de cimentación.

E: Excentricidad dada por:

$$e : Ms / Mt \text{ -----( 5 )}$$

Donde:

Ms: Momento de volteo debido al sismo, obtenido en forma aproximada con el siguiente procedimiento:

$$Ms = 0.8 ( 2 / 3 ) ( Ht ) ( Wt ) ( Cs / Q ) \text{ -----( 6 )}$$

Donde:

Ht: Altura total de la estructura medida a partir del desplante.

Cs: Coeficiente de diseño sísmico, igual a 0.32.

Q: Factor de comportamiento sísmico (ductilidad).

Con la combinación de cargas permanentes mas cargas vivas con intensidad máxima, la desigualdad se satisface:

$$Q Fc = ( 2.8 \times 1.1 \times 182 ) / AR = 3.32 \text{ t/m}^2 < R = 13 \text{ t/m}^2.$$

Por lo tanto la cimentación es estable ante el estado límite de falla en condiciones dinámicas.

$$Q Fc / AR = 3.32 \text{ t / m}^2 < R$$

### **ESTADO LÍMITE DE SERVICIO.**

Se estimaron los asentamientos que sufrirá la losa de cimentación y se consideró que el comportamiento de los depósitos del subsuelo es elástico, debido a que los contenidos de humedad de los materiales se encuentran más próximos a su límite plástico y no a su límite líquido.



La carga que transmitirán los materiales del subsuelo corresponde a un incremento de presión neta de 4.1 t/m<sup>2</sup>, a partir del nivel de desplante de la losa de cimentación y se obtiene de la combinación de cargas permanentes mas cargas vivas con intensidad media e incluye el peso propio de la cimentación de los rellenos.

Los asentamientos elásticos que sufrirán los materiales de apoyo de las losas de cimentación se calcularon con la expresión de la teoría de la Elasticidad:

$$d = \left[ \frac{(1 - u^2)}{E} \right] P B I \text{ -----( 7 )}$$

Donde:

d: Deformación vertical, bajo el centro del área cargada, dada en metros.

u: Relación de Poisson, adimensional.

E: Modulo de elasticidad del suelo de apoyo, en t/m<sup>2</sup>.

P: Presión de contacto aplicada por las zapatas, en t/m<sup>2</sup>.

B: Ancho de la losa, dada en metros.

I: Factor de forma adimensional que depende del punto en que se deseé estimar el asentamiento y la forma de la losa.

#### 4.6 ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON CAL.

En este caso práctico se utilizó cal como método de mejoramiento de suelos y posteriormente se colocó material importado, sobre los cuáles se construyó la losa de cimentación en la que se edificará una casa habitación.

Se agrego cal en toda la superficie a mejorar y se realizaron pruebas para determinar la cantidad de cal con la que se obtiene mayor estabilidad de la arcilla.

Se hizo una comparación de mezclas con diferentes porcentajes de cal en peso, para determinar con qué porcentaje de cal los límites de Atterberg no variaban.

Se observó que con un valor de 8% de cal en peso los límites de Atterberg ya no sufrían cambios considerables con respecto a los demás porcentajes, posteriormente se realizaron pruebas de expansibilidad y compresión simple a las mezclas de arcilla y se compararon los resultados obtenidos en la arcilla sin presencia de cal.

Se realizaron dos pruebas la primera a especímenes labrados y ensayados inmediatamente después de la compactación y la segunda a especímenes compactados y puestos en reposo por 24 horas.

Para verificar la efectividad de la estabilización se realizaron pruebas de expansión a las 2 mezclas previamente compactadas y se compararon con los resultados obtenidos con arcilla y con cal.

De la misma manera que en las pruebas de expansibilidad los resultados fueron comparados con los de especímenes sin cal.

Con los resultados obtenidos se observó que con la adición de cal aumenta la resistencia al a compresión simple y al dejar las muestras en reposo por 24 horas la resistencia casi alcanza a duplicarse.

No todos los suelos cohesivos reaccionan de la misma manera cuando se les adiciona cal, algunos se estabilizan más lentamente.

Cuando los minerales de arcilla son alterados por el uso de la cal, se consiguen los siguientes beneficios:

- Incrementa la resistencia.
- Reducción de la plasticidad.
- Reducción de la expansividad.
- Reducción de la capacidad de acumular agua.

### **PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.**

A continuación se describe el procedimiento constructivo que se utilizó para la excavación, colocación del mejoramiento y colocación del material importado sobre los cuales se desplantó la losa de cimentación.

#### **4.6.1 EXCAVACIONES.**

a) Se llevarán a cabo las excavaciones necesarias para retirar todos los materiales correspondientes a la capa de suelo vegetal, para poder iniciar los trabajos de mejoramiento del suelo.

b) Las excavaciones se realizarán en el área que cubre la losa. Se estima excavar 0.5 m más para que con ello se pueda tener una adecuada compactación en los extremos.

c) Las excavaciones se efectuarán con una retroexcavadora y trabajará desde fuera del área ya excavada y llegará como máximo a 0.1 m arriba del nivel máximo de excavación, este último tramo de se excavará con herramienta manual, a base de pico y pala para evitar el remoldeo del material de apoyo de la plataforma de materiales excavados.

d) Todo el material producto de la excavación será retirado a donde lo indique la dirección de obra, por ningún motivo podrá utilizarse como material de relleno.

e) Cuando se alcance la profundidad máxima de excavación, se deberá afinar el fondo, lo cual implica retirar todo el material suelto producto de la excavación.

f) Durante el proceso de excavación se deberán cuidar los siguientes aspectos:

1.-Las paredes de la excavación deberán mantener el talud de reposo natural correspondiente al tipo de material en que se realice la excavación.

2.-En caso de encontrar material de relleno o de cimentaciones antiguas dentro del área de excavación, éstos se deberán extraer en su totalidad y si la profundidad de dichas cimentaciones es mayor que la que corresponde al material que alojará la plataforma de materiales mejorados, la sobre excavación se deberá de rellenar con material importado, compactándose al 90% de su peso volumétrico seco máximo, según la prueba Proctor Estándar.

3.-Deberán evitarse las sobre excavaciones, para lo cual se llevará un control de niveles con respecto a un banco de nivel, localizado fuera del área de influencia de la obra en cuestión.

4.-Se excavarán las cepas que alojarán las contratraves y se colocará el acero de refuerzo tanto de las contratraves invertidas como de la losa de cimentación, posteriormente se llevará a cabo su colado. Se recomienda que el armado de la losa de cimentación sea de doble parrilla y que el peralte de la losa sea como mínimo de 12 cm.

5.-Las cepas que alojarán las contratraves de la losa de cimentación, se excavarán una vez concluida la plataforma de mejoramiento. Se recomienda que la contratrabe perimetral tenga un peralte mínimo de 60 cm y las interiores de 40 cm de peralte como mínimo.

Terminada la excavación se revisará el fondo de la misma, se cuidará que no presente material suelto producto de la excavación, que no se tengan rellenos de mala calidad al nivel de apoyo de la plataforma de materiales mejorados y que las características de resistencia de los materiales no sean inferiores a las que se consideraron en el diseño, si se llegara a presentar alguno de estos casos, se deberá profundizar la excavación para eliminar los materiales inadecuados y/o solicitar la asesoría de un especialista de mecánica de suelos.

---

#### 4.6.2 ESPECIFICACIÓN DE LOS MATERIALES.

Los materiales de préstamo deberán ser revisados por el laboratorio antes de ser colocados, para evitar tener que levantar rellenos ya colocados.

El material de banco que se vaya a utilizar para construir los rellenos deberá satisfacer las siguientes especificaciones:

a) Límite líquido	40% máximo.
b) Índice plástico	20% máximo.
c) Contracción lineal	8% máximo.
d) Valor relativo de soporte	15% mínimo.
e) Contenido de agua óptimo	25% máximo.
f) Peso volumétrico seco máximo	1.3 t/m <sup>2</sup>

Con el propósito de evitar la alteración de las características de la cal antes de ser utilizada en el mejoramiento, se debe tener cuidado en su almacenamiento atendiendo los siguientes aspectos:

a) La cal se entregará y almacenará hasta su utilización en la obra en los mismos sacos o envases cerrados en que fue expedida de la fábrica.

b) El lugar de almacenamiento será un sitio ventilado y bajo cubierta, para evitar que se alteren las propiedades de la cal. El sitio debe ser lo suficientemente amplio para que los sacos o envases puedan colocarse con una separación del techo, del suelo y de las paredes suficientes para protegerlos de la intemperie y de la humedad.

c) El almacenamiento se hará en lotes por separado, acomodándolos de forma que se permita el acceso fácil, para la inspección, identificación y muestreo de cada saco. Los sacos se colocarán sobre tarimas, apilándolos hasta una altura no mayor de dos metros separados del suelo y de las paredes a no menos de diez centímetros y remetidos respecto a la cubierta a una distancia tal que evite que los moje la lluvia, que en ningún caso será menor a un metro.

d) Cuando las necesidades del trabajo lo exijan, los sacos o envases que vayan a utilizarse el mismo día, pueden depositarse al aire libre y sobre un terreno bien drenado. En este caso, los sacos de cal se colocarán sobre tarimas, separados del suelo a no menos de diez centímetros. Cuando amenace lluvia, los sacos se cubrirán con lonas u otras cubiertas impermeables.

Durante la construcción de los rellenos con los materiales de la zona, se deberá verificar que en cada capa se alcance el grado de compactación especificada con una tolerancia de +/- 2%. La verificación se hará mediante la ejecución de calas

de 10 cm<sup>3</sup>, aproximadamente para determinar el peso volumétrico seco en el sitio, las cuáles se harán por capa compactada.

De esta forma un relleno de materiales inertes, con buena permeabilidad, generará que las condiciones de saturación se uniformicen ya que el humedecimiento tiende a igualar la expansión y minimiza los movimientos diferenciales.

#### **4.6.3 COLOCACIÓN DEL MEJORAMIENTO A BASE DE CAL.**

El mejoramiento del suelo será a base de cal. Este trabajo consiste en la construcción de una capa de 15 cm de espesor estabilizada con cal, colocada en una superficie terminada, libre de sustancia vegetal y de acuerdo con las especificaciones de proyecto.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las diferentes pruebas que se realizaron, se obtuvieron los requisitos alternativos para determinar el porcentaje óptimo de dosificación de cal con el cual se obtiene mayor estabilidad de la arcilla y se propuso que el mejoramiento de suelos se llevará a cabo con el 8% de cal en peso.

Una vez determinada la dosificación por volumen de la cal que debe añadirse al suelo para su estabilización, se procederá a determinar el espaciado de los sacos del producto en líneas paralelas, a lo largo de la calzada previamente escarificada, definiendo así el área en metros cuadrados que debe cubrir cada saco. Cuando los sacos del producto estabilizador hayan sido colocados, se procederá a romper la envoltura de los mismos y a vertir el contenido en la superficie.

El material deberá esparcirse en la superficie a mejorar, posteriormente debe ser escarificada varias veces hasta que el material haya sido esparcido totalmente y se alcance la profundidad que marca el proyecto de estabilización.

A continuación se describen los trabajos de regado de la cal, mezclado de la cal, compactación, curado y protección de la superficie a tratada.

#### **REGADO O DISPERSIÓN DE LA CAL.**

En este primer regado, se emplea solamente la mitad de la cal que se va usar para el tratamiento. La cal se puede esparcir colocando los bultos en el lugar a tratar, vaciándolos y nivelando el contenido barriéndolo o con rastrillos. En éste caso se empleará rastrillo para su regado.

Cuando se aplique la cal en el mezclado inicial, se debe tener cuidado de no contaminar el entorno con polvo, producto de la cal y del material fino.

También es común el regado mediante lechada de cal (1 tonelada de cal por cada 20,000 litros de agua). La lechada puede ser mezclada en una planta central o en un camión dos horas antes de regala y distribuirla. La distribución de la lechada debe realizarse con una o más pasadas sobre un área determinada hasta que el porcentaje de cal sea obtenido.

### **MEZCALDO PRELIMINAR.**

Durante el periodo comprendido desde la aplicación de la cal y hasta que el curado final sea completado, el contenido de humedad debe ser mantenido arriba del contenido óptimo especificado, pero no más del 3%. Debido a que el agua es necesaria para ayudar a que ocurran las reacciones químicas, la aplicación continua del agua durante el mezclado es necesaria, aún cuando el material esté a la humedad óptima.

La mezcla de suelo, agua y cal en todo el suelo estabilizado, se puede hacer mediante mezcladores rotatorios, después del mezclado se le da a la capa tratada la sección aproximada y se compacta la mezcla ligeramente para minimizar pérdidas por evaporación, carbonatación de la cal o humedad excesiva.

Con el fin de mantener un control adecuado de los materiales y de las operaciones de construcción, se harán pruebas suficientes con apoyo del laboratorio de los materiales estabilizados con cal durante su procesamiento, con especímenes moldeados para una resistencia a la comprensión que debe ser como mínimo de 15 kg/cm<sup>2</sup>.

La mezcla debe ser curada hasta por 48 horas para permitir a la cal y al agua romper los flóculos de arcilla, para arcillas extremadamente plásticas, el periodo de curado puede extenderse hasta por 7 días.

### **MEZCLADO FINAL.**

La mezcla suelo-cal debe ser homogénea y no deberán existir fragmentos de cal viva ante una inspección visual de la mezcla.

En ésta etapa se debe agregar a la capa tratada el resto de la cal. El mezclado debe continuar hasta que todos los flóculos se rompan y pasen por una malla de una pulgada, hasta que por lo menos el 60% del material pueda pasar la malla número 4 y se obtenga un  $p_h = 12.4$  como mínimo. Durante este proceso se puede añadir agua si es necesario.

**COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA.**

La compactación debe empezar inmediatamente después de terminada la mezcla final y se puede hacer con los métodos y maquinaria tradicionales. Por ningún motivo se permitirá la presencia de grumos de cal al momento de la compactación.

La mezcla deberá ser compactada con una humedad de hasta el 2% menor que el porcentaje de humedad óptima. Cada capa deberá ser adecuadamente compactada antes de colocar sobre ella la siguiente.

Una vez terminada la compactación, la superficie terminada deberá verificarse en el alineamiento y la pendiente transversal, de acuerdo con la sección mostrada en los planos.

La superficie terminada no deberá tener variaciones mayores a un centímetro por cada tres metros, medidos perpendicular y paralelamente.

Cualquier variación de la superficie que no cumpla con los requisitos indicados, deberá ser escarificada, conformada y compactada nuevamente hasta obtener la forma y exactitud requeridas.

**CURADO Y PROTECCIÓN DE LA SUPERFICIE TRATADA.**

Después de que la capa ha sido terminada, debe protegerse contra el secado durante 7 días. La superficie tiene que mantenerse en una condición húmeda mediante riegos continuos, se puede hacer colocando materiales húmedos como paja, tela o mediante la aplicación de materiales bituminosos que prevendrán la pérdida de agua.

Para suelos no plásticos y materiales con bajo índice de plasticidad, en los cuáles la cal sola no es satisfactoria para la estabilización, se puede añadir ceniza volátil u otro agente para producir la reacción química necesaria.

El ingeniero residente ordenará pruebas para verificar que se cumplan de forma satisfactoria las mezclas de suelo estabilizado con cal. Cada prueba deberá abarcar un área no mayor a 1250 m<sup>2</sup>.

**VERIFICACIÓN DE LOS ESPESORES.**

El espesor de la capa estabilizada con cal no deberá tener una diferencia mayor a un centímetro con respecto al indicado en los planos.

El espesor se verificará por medio de sondeos o perforaciones de ensayo realizados durante el proceso constructivo.



Después de haberse compactado la capa estabilizada, el espesor deberá medirse en uno o varios puntos tomados al azar, a cada 250 metros cuadrados o su equivalente en un metro lineal, de forma tal que se evite un patrón de distribución regular de los mismos.

Cuando un sondeo señale una variación de espesor mayor a la permisible, se harán sondeos adicionales hasta que los sondeos indiquen que el espesor se encuentra dentro de la tolerancia. El área en la que los espesores no estén dentro de la tolerancia permisible, deberá ser corregida, removiendo o agregando el material según sea necesario, conformando y compactando dicha área hasta obtener el espesor óptimo.

La perforación de los sondeos y el relleno con material compactado, en caso de hacerlos, deberán realizarse en todos los casos bajo la supervisión del ingeniero residente.

#### **4.6.4 COLOCACIÓN DEL MATERIAL IMPORTADO.**

a) Antes de colocar el material importado deberá mejorarse el suelo con cal, cubriendo toda la superficie del terreno a compactar, teniendo cuidado de que todos los grumos hayan sido hidratados y desvanecidos.

b) Una vez excavada la caja que alojará el material importado con respecto al nivel de terreno actual, se procederá a humedecer la superficie expuesta y posteriormente se colocará el material importado hasta el nivel de lecho inferior de la losa de cimentación.

c) La colocación del material importado debe iniciar en un plazo no mayor a tres días, en caso de exceder dicho tiempo se deberá verificarla resistencia y el grado de interperismo del material de fondo de la excavación, y de esta manera se determinará el espesor del material que deberá retirarse.

d) La incorporación del agua al material importado se podrá realizar en forma uniforme mediante equipo mecánico (tanques cisternas), bajo el siguiente procedimiento:

1.- Deberá extenderse el material importado en un área de trabajo con una altura máxima de 20 cm.

2.-Agregar el porcentaje óptimo de agua a todo el material extendido, sin llegar al saturamiento, es decir que el material absorba toda el agua y no se formen charcos.

3.- Traspalear hasta lograr homogenizar el material, no deberá permitirse que el material presente contaminaciones y terrones del mismo material, en tal caso se eliminarán.

4.- Finalmente se colocará el material importado dentro de la caja, en capas de 20 cm en estado suelto, compactándolo al 90% (+/- 2%) de su peso volumétrico seco máximo, según la prueba Proctor Estandar.

e) Se recomienda llevar un control del número de pasadas del rodillo a una capa, así como del volumen de agua incorporado, para alcanzar el grado de compactación recomendado, de tal manera que comparado con el porcentaje obtenido, se pueda deducir aproximadamente cuando una capa tiene cierto grado de compactación.

f) En los sitios en los que el rodillo no pueda tener acceso, se deberá completar su compactación con compactadores del tipo bailarinas.

g) No deberá emplearse material producto de compactación como relleno bajo áreas de construcción.

h) Deberá preverse la construcción de una trabe perimetral a la losa de cimentación de las estructuras con el objeto de proteger al mejoramiento de posibles disgregaciones contra futuras excavaciones laterales. Se recomienda que el peralte de la contratrabe sea como mínimo de 60 cm.

i) Cuando se alcance el nivel del proyecto del mejoramiento, se colocará sobre éste una capa de protección a base de mortero pobre de 3 cm de espesor.

l) Previo a la colocación de las plataformas de mejoramiento, deberán preverse las instalaciones hidráulicas y sanitarias, así como la construcción de registros y de cisternas de almacenamiento de agua. Deben considerarse uniones articuladas en las instalaciones que permitan absorber los movimientos diferenciales debidos a expansiones posibles del subsuelo.

No debe permitirse por ningún motivo excavaciones posteriores a la colocación del mejoramiento y sobre todo cuando ya se tengan coladas las losas de planta baja y primer nivel, la realización indebida de estas excavaciones pueden provocar serios problemas de estabilidad del mejoramiento, que se reflejan en la presencia de grietas y fisuras en muros.

Cuando por condiciones extraordinarias se requiera la ejecución de una excavación, ya colocado el mejoramiento, se solicitará la asesoría de un especialista de mecánica de suelos.

# **PLANO ARQUITECTÓNICO**

**PRUEBA DE SATURACIÓN BAJO CARGA.**

**TIPO DE SUELO:** Arcilla café obscura con escasa arena fina.  
**PROYECTO:** Jiutepec, Morelos. **PROFUNDIDAD:** 1.55 - 1.75.  
**SONDEO:** PCA - 2 **MUESTRA:** MC -1

ANILLO		
Diámetro	8.05	cm
Altura	2.00	cm
Área	50.89	cm
Peso	165.49	cm

DATOS INICIALES		DATOS FINALES	
Wh + A	339.00 g	Wh + A + T	373.60 g
W Tara	36.20 g	Ws + A + T	324.80 g
Ws	123.11 g	Vw	50.40 cm <sup>3</sup>
Vs	51.08 cm <sup>3</sup>	Vv	50.70 cm <sup>3</sup>
Whi	173.51 g	Whf	171.91 g
Wwi	50.40 g	Wwf	48.80 g
Vi	101.79 cm <sup>3</sup>	Vf	99.79 cm <sup>3</sup>
Pvhi	1.70 T/m <sup>3</sup>	Pvhf	1.72 T/m <sup>3</sup>
Wi	40.93 %	Wf	39.63 %
Si	99.39 %	Sf	100.18 %
ei	0.99	ef	0.95

SATURACIÓN	PRESIÓN	MICRO	DIFERENCIA	DEF. UNITARIA
	Kg / cm <sup>2</sup>	mm.	mm.	%
	Lec. Inicial	11.3320		
	0.300	10.9890	0.3430	1.7150
	0.300	11.0480	0.0590	1.4200
	0.500	11.0210	0.0270	1.5550
	0.700	10.9980	0.0230	1.6700
	0.900	10.9710	0.0270	1.8050
	1.100	10.9400	0.0310	1.9600

Figura 4.3 Prueba de saturación bajo carga.

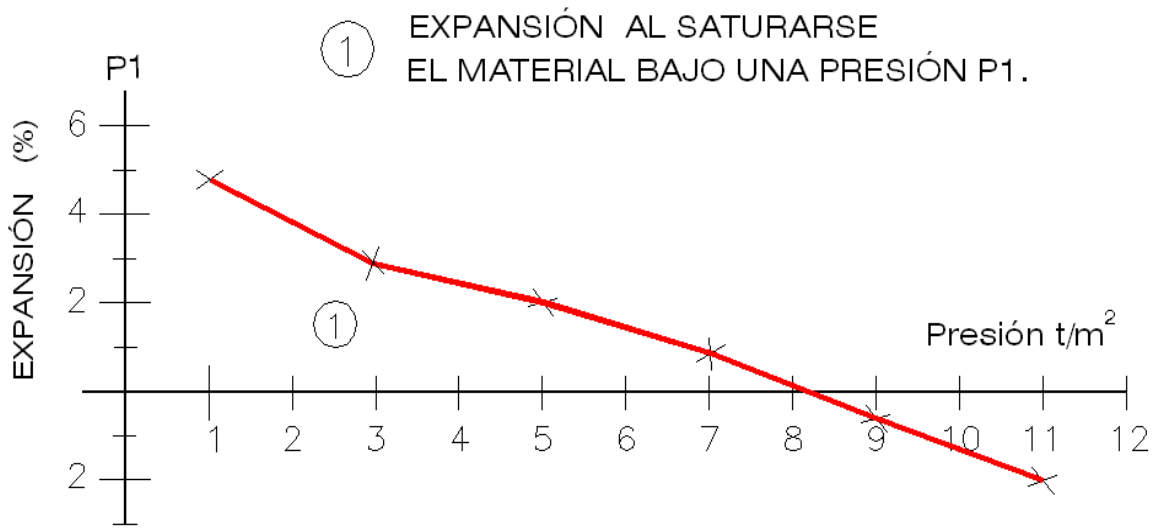


Figura 4.4 Prueba de saturación bajo carga.

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Vidrio</b>	<b>Tara</b>	<b>Wh + t</b>	<b>Ws + t</b>	<b>W</b>	<b>TORC.</b>	<b>CLASIFICACIÓN</b>
<b>No.</b>	<b>m</b>	<b>No.</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>	<b>gr</b>	<b>%</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	
<b>PCA - 1</b>	0.65	85	22.9	125.8	105.4	24.73		Arcilla café oscuro con escasa arena fina.
<b>2</b>	1.14	88	18.2	88.3	68.6	39.09		Arcillas café oscuro con escasa arena fina.
<b>3</b>	1.5	131	23.3	106	84.2	35.8		Arcilla café oscuro con escasa arena fina.
<b>4</b>	2.5	151	24.6	124.9	104.7	25.22		Arcilla con arena fina pumítica café oscuro.
<b>PCA - 2</b>	1	61	23.1	91	69.5	46.34		Arcilla café oscuro.
<b>2</b>	1.55	51	26.8	101.2	79.8	40.38		Arcilla gris oscuro con escasa arena fina.

Figura 4.5 Contenidos de humedad.

<b>W=</b>	Contenido de agua %.	<b>qu=</b>	Compresión no confinada ( ton/m <sup>2</sup> ).
<b>LL =</b>	Límite líquido.	<b>UU=</b>	Prueba triaxial no consolidada no drenada.
<b>LP=</b>	Límite plástico.	<b>c=</b>	Cohesión.
<b>IP=</b>	Índice de plasticidad.	<b>φ=</b>	Ángulo de fricción interna.
<b>Ss=</b>	Densidad de sólidos.	<b>δh=</b>	Peso Volumétrico humedo (ton/m <sup>3</sup> )
<b>CL=</b>	Contracción Lineal.		












PROF. (m).	DESCRIPCIÓN	PERFIL	SUCS	W	LL	LP	Ip	Ss	CL	q U	UU		δh
											c	φ	
<b>PCA - 1</b>													
0	CAPA VEGETAL												
0.5	ARCILLA CON MUY POCA ARENA FINA, CON GRAVAS GRUESAS CAFÉ OBSCURO Y MARRÓN.		CH	24.73	53.50	23.89	29.61						
1.0	ARCILLA POCO ARENOSA, CON RAÍCES COLOR CAFÉ OBSCURO.		CH	39.09	97.20	35.83	61.37	2.4	19	3.26	6.4	0.5	1.43
1.5	ARCILLA POCO LIMOSA CON POCA ARENA FINA, CON RAICES COLOR CAFÉ OBSCURO.		CH	35.80	100	33.33	66.67						
2.0	ARENAS FINAS Y GRAVAS EMPACADAS EN ARCILLA DE COLOR CAFÉ.		CH	25.22	59.10	26.67	32.43						
2.5													
<b>PCA - 2</b>													
0	CAPA VEGETAL.												
0.5	ARCILLA POCO ARENOSA CON RAÍCES COLOR CAFÉ OBSCURO.		CH	23	50	20	30						
1.0	LIMO ARCILLOSO CON RAÍCES COLOR CAFÉ.		MH-OH	46.34	92.98	43.75	49.23						
1.5													
2.0	ARCILLA PLÁSTICA NEGRA		CH	40.83	114.9	34.57	80.28	2.41	20.1	2.39	2.7	7	1.65
2.5	EOLEOS EMPACADOS EN ARCILLA PLÁSTICA NEGRA.												

Figura 4.6 Descripción de las profundidades del suelo.





### CÁLCULO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla café oscuro.	
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	0.95-1.14 m.
<b>SONDEO:</b>	PCA-1	<b>MUESTRA:</b>	MC-1

#### LÍMITE LÍQUIDO

No.GOLPES	No. Tara	Wh + T	Ws + t	Wt	W %
44	356	17.0	13.9	10.6	93.94
25	320	18.9	15.5	12.0	97.14
16	386	17.3	13.8	10.3	100.00
7	409	17.5	14.0	10.6	102.94

#### LÍMITE PLÁSTICO

457	12.1	10.9	7.6	36.36
420	12.2	11.0	7.6	35.29

#### CONTRACCIÓN LINEAL

barra n	lec. inicial	lec. final	C.L. (%)
50	10	8.1	19

L.L.	L.P.	I.P.	S.U.C.S
97.20	35.83	61.37	CH

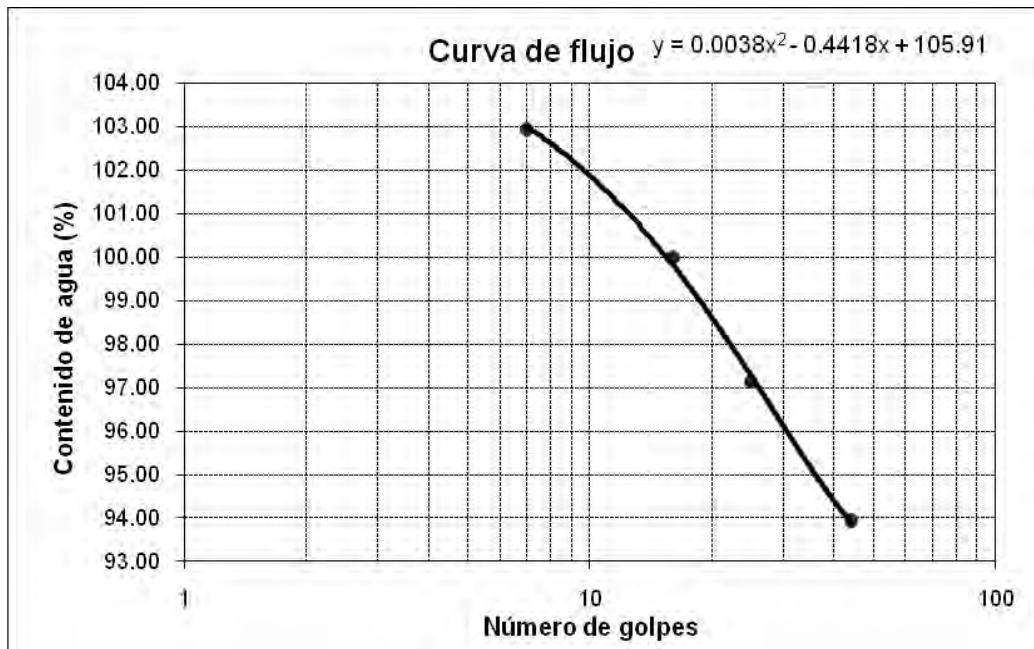


Figura 4.8 Cálculo de límites de consistencia.

### CÁLCULO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla gris oscuro.	
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1.35-1.55 m.
<b>SONDEO:</b>	PCA-2	<b>MUESTRA:</b>	MC-1

#### LÍMITE LÍQUIDO

No. GOLPES	No. Tara	Wh + t	Ws + t	Wt	W %
40	398	16.2	13.3	10.5	103.57
25	347	17.9	13.8	10.2	113.89
18	357	20.1	15.7	12.1	122.22
8	394	18.7	14.7	11.7	133.33

#### LÍMITE PLÁSTICO

	428	13.2	11.8	7.8	35.00
	450	13.4	12.0	7.9	34.15

#### CONTRACCIÓN LINEAL

barra n	lec. inicial	lec. final	C.L.(%)
11	9.99	7.98	20.10

L.L.	L.P.	I.P.	S.U.C.S
114.85	34.57	80.28	CH

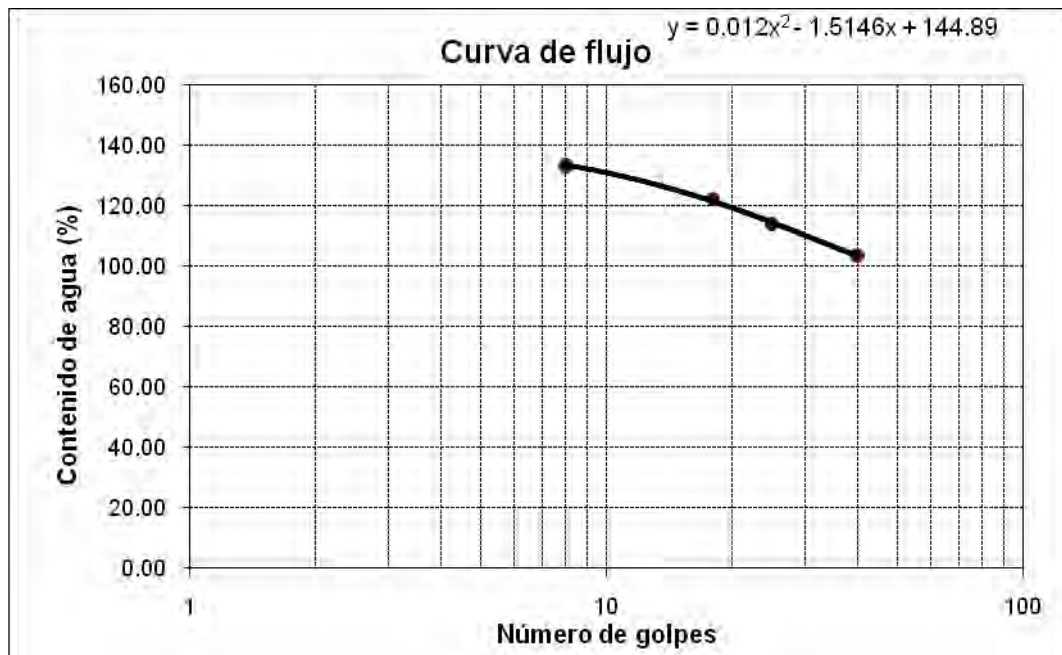


Figura 4.9 Cálculo de límites de consistencia.

**PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE**

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla café obscura con escasa arena fina.					
<b>PROYECTO:</b>		Jiutepec, Morelos.			<b>PROFUNDIDAD:</b>		0.95-1.14 m.
<b>SONDEO:</b>		PCA-1			<b>MUESTRA:</b>		MC-1
DATOS INICIALES DEL ESPÉCIMEN							
TIEMPO	Def.	Anillo	E	Esf.Desv.	Ds =	4.07 cm	
seg.	mm.	Unidad	%	Kg/cm <sup>2</sup>	Dm=	4.03 cm	
0	0	0	0	0	Di=	4.07 cm	
10	0.187	7.3	0.1873	0.109	Ao=	12.84 cm <sup>2</sup>	
20	0.333	16.4	0.3702	0.2443	V0=	104.26 cm <sup>3</sup>	
30	0.590	26.4	0.5509	0.3926	Wo=	149.80 gr	
40	0.760	34.9	0.7352	0.5180		H1= 8.12 cm	
50	0.834	41.3	0.9248	0.6119		H2= 8.12 cm	
60	0.930	43.8	1.1239	0.6476		Ss= 2.40 gr	
65	1.124	44.2	1.2256	0.6528		Wt= 65 gr	
70	1.237	42.7	1.3319	0.6300		Wt+sh= 214.70 gr	
75	1.450	38.9	1.4439	0.5733		Wt+ss= 173.70 gr	
DATOS FINALES DEL ESPÉCIMEN							
					ei=	1.302	
					ef=	1.302	
					Pvhi=	1.437 t/m <sup>3</sup>	
					Pvhf=	1.436 t/m <sup>3</sup>	
						Si= 69.70%	
						Sf= 69.53%	
						Wi= 37.81%	
						Wf= 37.72%	

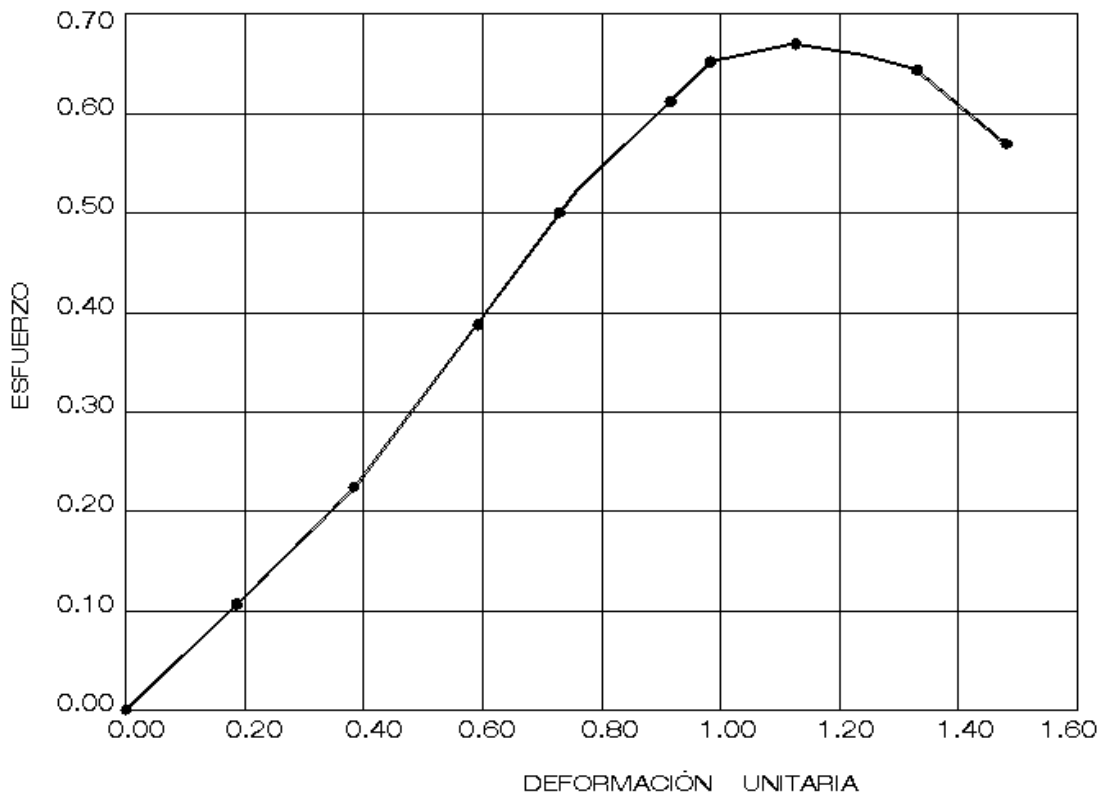


Figura 4.10 Prueba de compresión simple.

**PRUEBA DE COMPRESIÓN SIMPLE**

**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Arcilla gris obscura con escasa arena fina.  
**PROYECTO:** Jiutepec, Morelos. **PROFUNDIDAD:** 1.55-1.75 m.  
**SONDEO:** PCA-2 **MUESTRA:** MC-1

TIEMPO seg.	Def. mm.	Anillo Unidad	E %	Esf.Desv. Kg/cm <sup>2</sup>	DATOS INICIALES DEL ESPÉCIMEN		
					Ds =	H1=	H2=
0	0	0	0	0	3.52 cm	7.99 cm	7.99 cm
10	0.187	5.4	0.195	0.1085	3.48 cm	2.40	
20	0.333	10.3	0.391	0.2065	3.47 cm	103.7 gr	
30	0.600	15.9	0.586	0.3382	9.539 cm <sup>2</sup>	229.4 gr	
40	0.780	22.0	0.779	0.4394	76.215 cm <sup>3</sup>	191.3 gr	
45	0.850	24.0	0.878	0.4788	125.8 gr		
50	0.933	23.7	0.983	0.4723			
55	1.116	23.0	1.089	0.4579			
					DATOS FINALES DEL ESPÉCIMEN		
					ei=	1.097	Si= 95.82%
					ef=	1.097	Sf= 95.57%
					Pvhi=	1.651 t/m <sup>3</sup>	Wi= 43.61%
					Pvhf=	1.649 t/m <sup>3</sup>	Wf= 43.49%

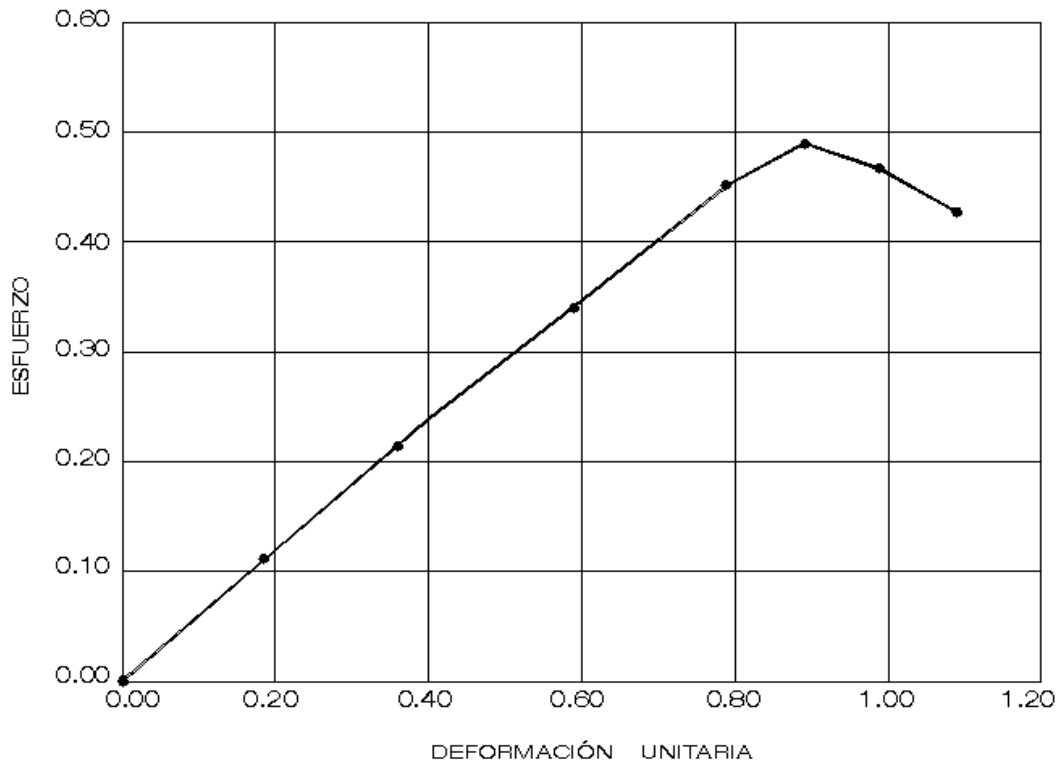


Figura 4.11 Prueba de compresión simple.

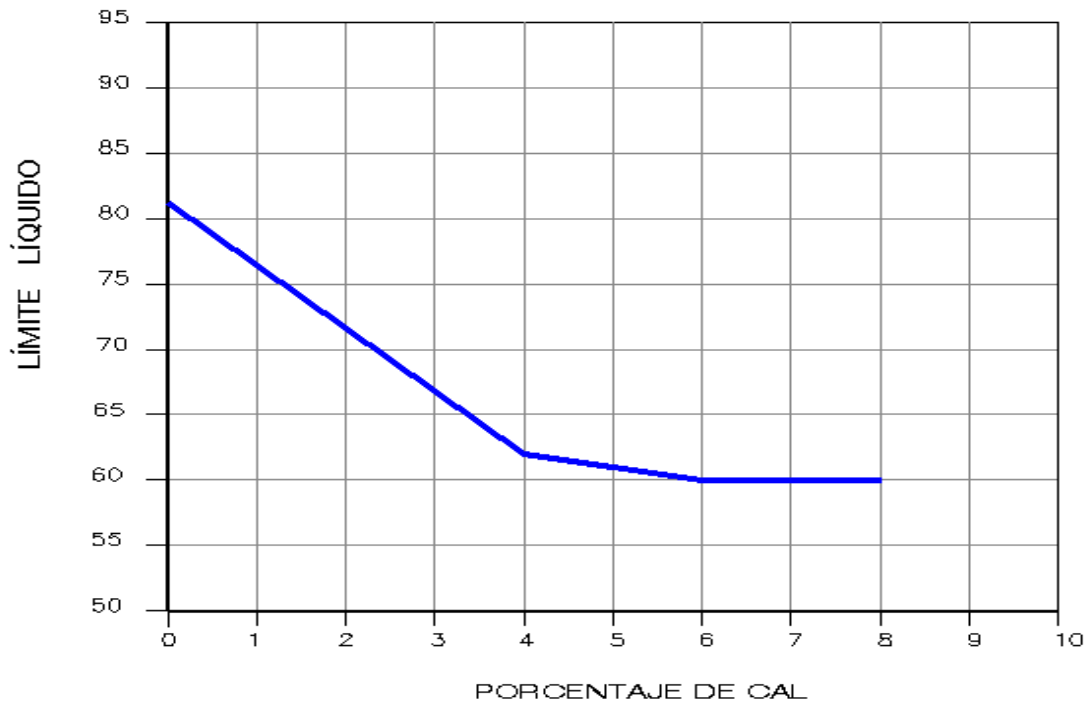


Figura 4.12 Disminución del Límite Líquido.

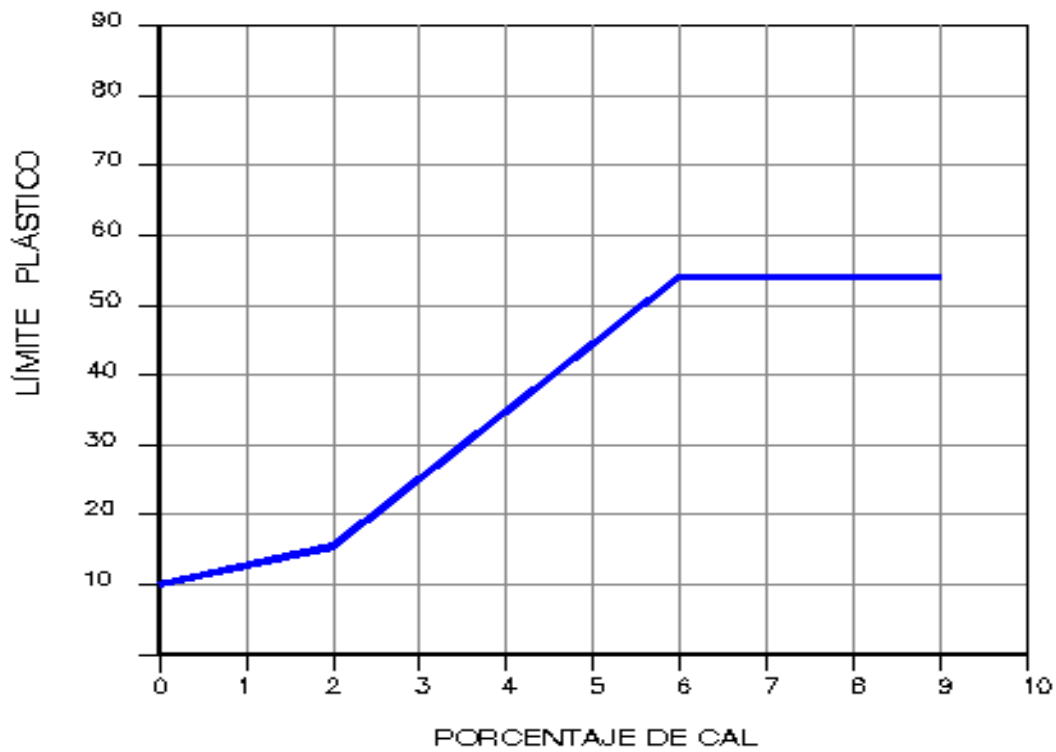


Figura 4.13 Aumento del Límite Plástico.

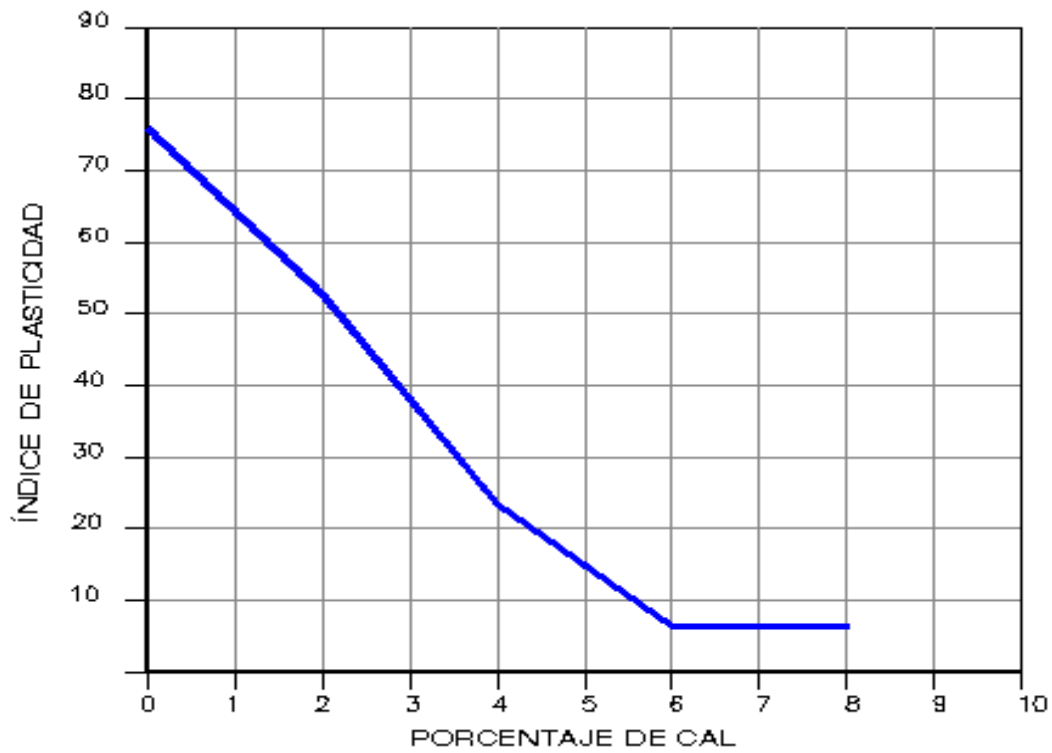


Figura 4.14 Disminución del Índice de Plasticidad de la arcilla.

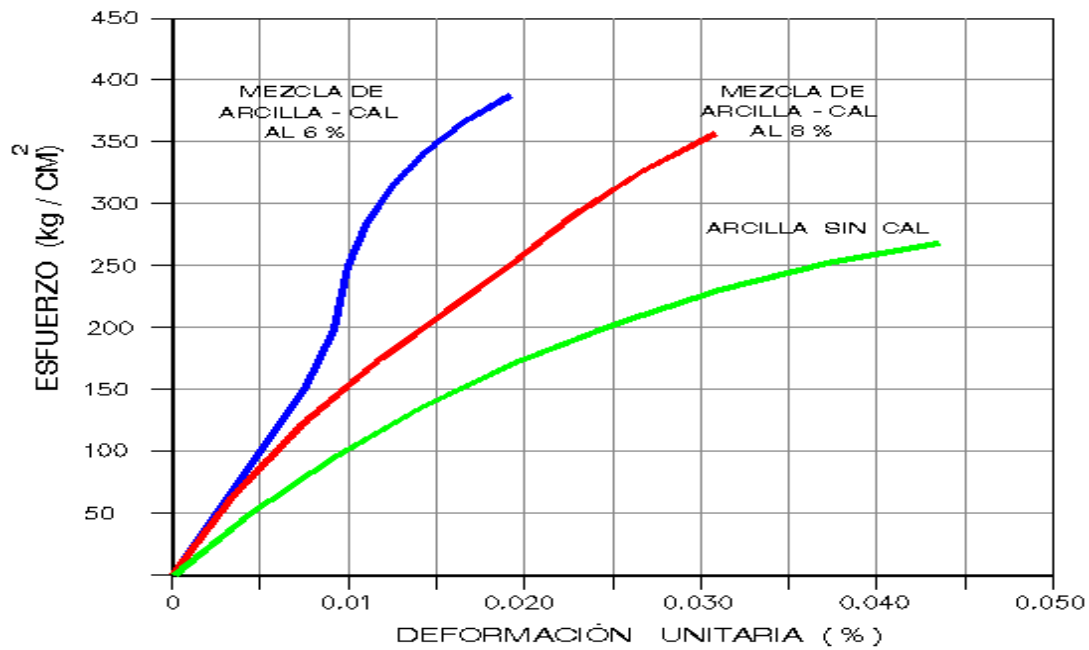


Figura 4.15 Mezclas de arcilla con cal y arcilla sin cal.



<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla café oscura con escasa arena fina.	
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	0.95-1.14 m.
<b>SONDEO:</b>	PCA-1	<b>PRESIÓN:</b>	0.25 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>MUESTRA:</b>	MC-1		

TIEMPO	ANILLO	CARGA	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	12.56	0
10	6.7	12.55	1.28	12.58	0.10
20	13.2	24.81	2.53	12.60	0.20
30	21.7	44.80	4.16	12.62	0.32
40	31.2	58.76	5.99	12.65	0.47
50	41.2	77.59	7.91	12.67	0.62
60	50.8	95.64	9.75	12.69	0.76
80	64.2	120.66	12.30	12.73	0.96
90	63.9	119.68	12.20	12.75	0.96
95	62.8	118.21	12.05	12.76	0.94

<b>0.9678</b>			
<b>ds=</b>	4.12 cm	<b>Wo=</b>	154.10 gr
<b>dm=</b>	4.00 cm	<b>Wt=</b>	70.10 gr
<b>di=</b>	3.88 cm	<b>Wt+sh=</b>	224.10 gr
<b>d prom.=</b>	4.00 cm	<b>Wt+ss=</b>	181.40 gr
<b>h1=</b>	8.03 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	8.03 cm	<b>W (%)=</b>	38.36
<b>h prom.=</b>	8.03 cm	<b>pvhi=</b>	1.527 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	12.56 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.526 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	100.90 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.104 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.175	<b>Gi=</b>	78.04 (%)
<b>ef=</b>	1.176	<b>Wi=</b>	38.45 (%)
<b>si=</b>	78.485 (%)	<b>Wf=</b>	38.36 (%)
<b>sf=</b>	78.301 (%)		

Figura 4.16 Prueba Triaxial UU.

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Arcilla café obscura con escasa arena fina.		
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	0.95-1.14 m.
<b>SONDEO:</b>	PCA-1	<b>PRESIÓN:</b>	0.50 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>MUESTRA:</b>	MC-1		

TIEMPO	ANILLO	f	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	13.45	0
10	6.9	1.32	1.16	13.47.	0.09
20	14.2	2.72	0.33	13.49	0.20
30	25.9	4.97	0.50	13.51.	0.36
40	40.1	7.69	0.66	13.54	0.56
50	54.8	10.52	0.83	13.56	0.77
60	66.3	12.72	1.00	13.58	0.93
80	88.9	17.06	1.33	13.63	1.25
100	98.2	18.85	1.66	13.67	1.37
105	96.4	18.5	1.75	13.69	1.35
110	90.1	17.29	1.83	13.7	1.26
					<b>1.3784</b>

<b>ds=</b>	4.07 cm	<b>Wo=</b>	152.70 gr
<b>dm=</b>	4.16 cm	<b>Wt=</b>	148.40 gr
<b>di=</b>	4.12 cm	<b>Wt+sh=</b>	301.00 gr
<b>d prom.=</b>	4.14 cm	<b>Wt+ss=</b>	259.20 gr
<b>h1=</b>	7.98 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	7.98 cm	<b>W (%)=</b>	37.73
<b>h prom.=</b>	7.98 cm	<b>pvhi=</b>	1.423 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	13.45 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.422 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	107.33 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.033 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.32	<b>Gi=</b>	68.41 (%)
<b>ef=</b>	1.32	<b>Wi=</b>	37.82 (%)
<b>si=</b>	68.449 (%)	<b>Wf=</b>	37.73 (%)
<b>sf=</b>	68.335 (%)		

Figura 4.17 Prueba Triaxial UU.

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla café obscura con escasa arena fina.			
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	0.95-1.14 m.		
<b>SONDEO:</b>	PCA-1	<b>PRESIÓN:</b>	1.00 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>MUESTRA:</b>	MC-1				

TIEMPO	ANILLO	f	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	12.95	0
10	14.3	2.74	1.16	12.97	0.21
20	32.0	6.14	0.33	13.00	0.47
30	48.7	9.35	0.50	13.02	0.71
40	63.4	12.17	0.66	13.04	0.93
50	77.7	14.91	0.83	13.06	1.14
60	88.6	17.01	1.00	13.08	1.29
70	94.7	18.18	1.16	13.10	1.38
75	92.3	17.72	1.25	13.12	1.35
80	87.1	16.72	1.33	13.13	1.27
					<b>1.3869</b>

<b>ds=</b>	4.14 cm	<b>Wo=</b>	152.70 gr
<b>dm=</b>	4.03 cm	<b>Wt=</b>	72.00 gr
<b>di=</b>	4.11 cm	<b>Wt+sh=</b>	223.60 gr
<b>d prom.=</b>	4.06 cm	<b>Wt+ss=</b>	183.40 gr
<b>h1=</b>	8.09 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	8.09 cm	<b>W (%)=</b>	36.09
<b>h prom.=</b>	8.09 cm	<b>pvhi=</b>	1.447 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	12.95 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.446 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	104.82 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.063 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.25	<b>Gi=</b>	68.91 (%)
<b>ef=</b>	1.25	<b>Wi=</b>	36.18 (%)
<b>si=</b>	69.00 (%)	<b>Wf=</b>	36.09 (%)
<b>sf=</b>	68.83 (%)		

Figura 4.18 Prueba Triaxial UU.

**PRUEBA TRIAXIAL UU**

**TIPO DE SUELO:** Arcilla café obscura con escasa arena fina.

**PROYECTO:** Jiutepec, Morelos. **PROFUNDIDAD:** 0.95-1.14 m

**SONDEO:** PCA-1 **MUESTRA:** MC-1

ENSAYO	PRESIÓN CONF.	ESFUERZO A LA FALLA	PESO VOL. NATURAL	Gwl	ei	VALORES PROMEDIO	
Num.	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(ton/m <sup>3</sup> )	(%)		Ss=	
1	0.25	0.97	1.527	78.4	1.175	wi=	37.48%
2	0.50	1.25	1.423	68.4	1.323	wf=	37.39%
3	1.00	1.39	1.447	68.9	1.257	Gw=	71.91%
<b>DATOS FINALES</b>						Gwf=	71.82%
		ef	Gwl	wf	pvhf	PVN=	1.466 ton/m <sup>3</sup>
1	0.25	1.176	78.301	38.36	1.526	PVF=	1.465 ton/m <sup>3</sup>
2	0.50	1.325	68.335	37.73	1.422	ei=	1.25
3	1.00	1.258	68.831	36.09	1.446	ef=	1.25

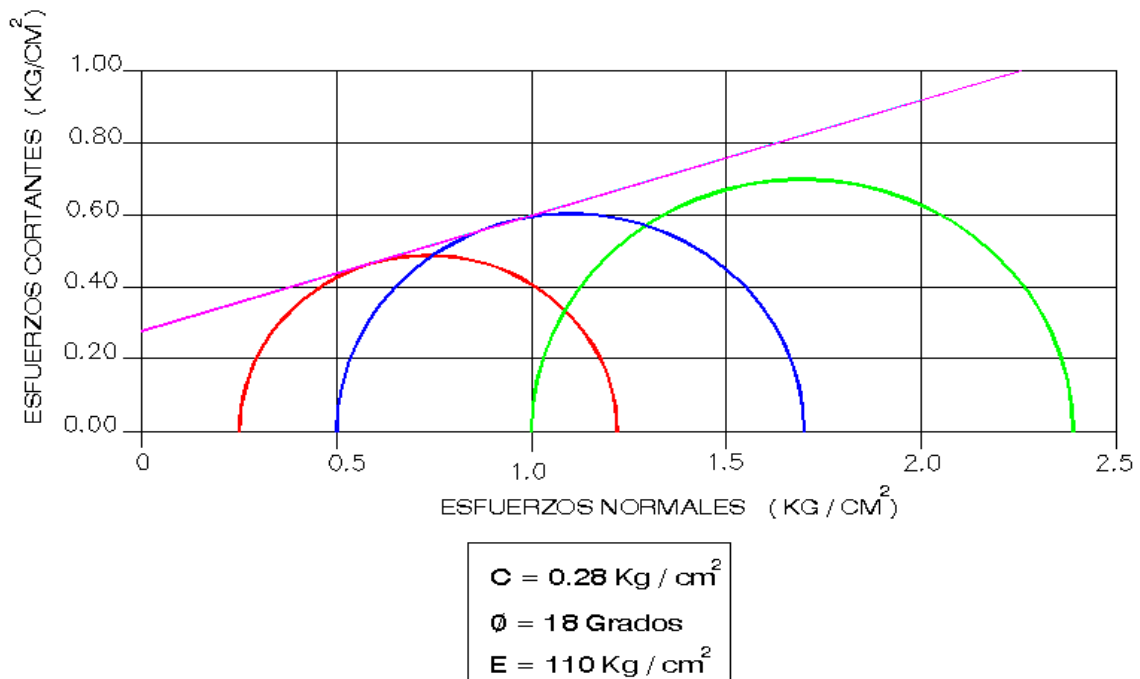


Figura 4.19 Prueba Triaxial UU, Círculo de Mohr.

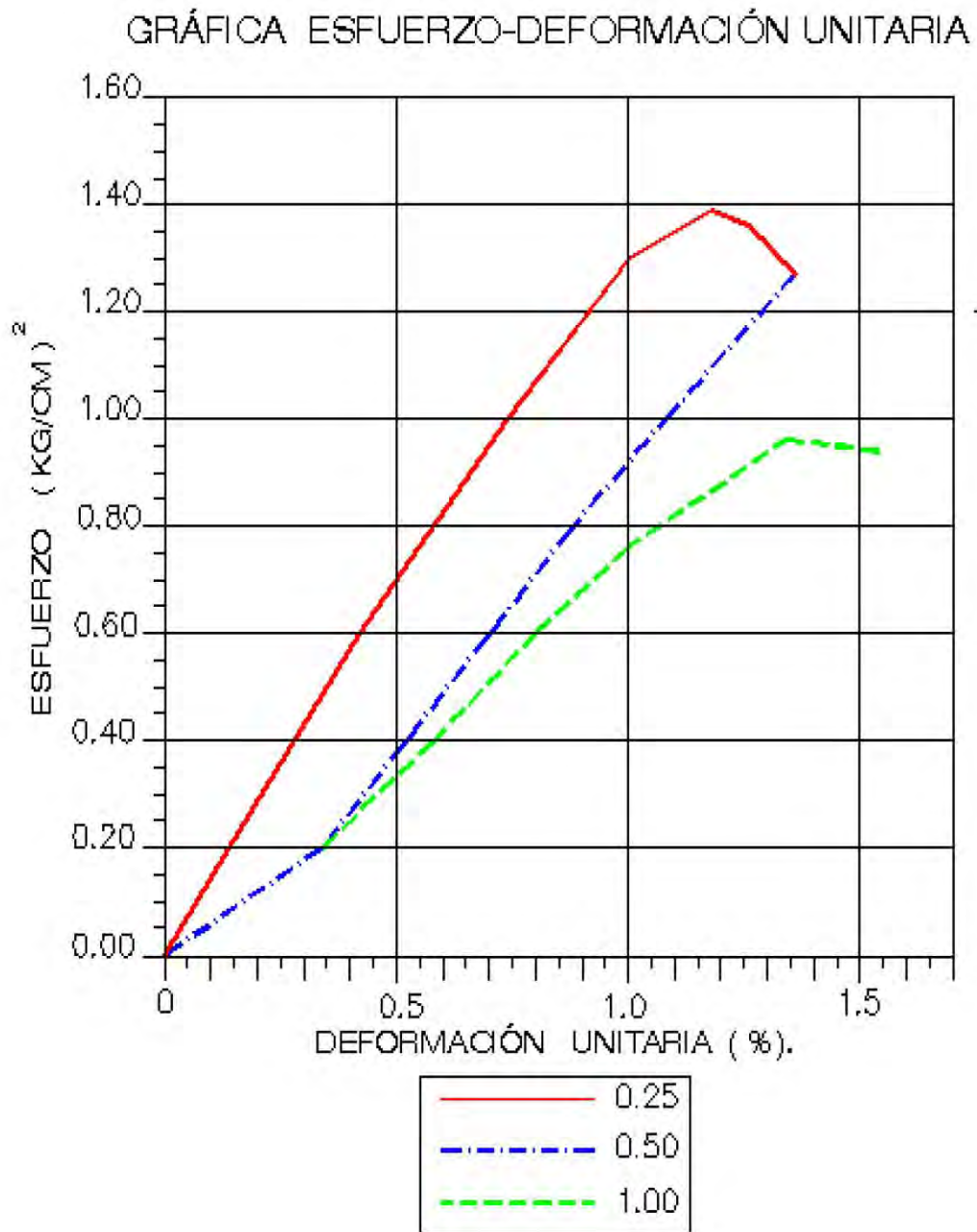


Figura 4.20 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria.

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla gris oscura con escasa arena fina.			
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1.55-1.75 m.		
<b>SONDEO:</b>	PCA-2	<b>PRESIÓN:</b>	0.25 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>MUESTRA:</b>	MC-1				

TIEMPO	ANILLO	f	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	9.51	0
10	6.2	1.19	0.16	9.52	0.12
20	12.1	2.32	0.33	9.54	0.24
30	23.3	4.47	0.50	9.55	0.46
40	33.7	6.47	0.66	9.57	0.67
45	33.5	6.43	0.75	9.58	0.67
50	32.2	6.18	0.83	9.59	0.64
					<b>0.6757</b>

<b>ds=</b>	3.52 cm	<b>Wo=</b>	125.50 gr
<b>dm=</b>	3.48 cm	<b>Wt=</b>	67.50 gr
<b>di=</b>	3.44 cm	<b>Wt+sh=</b>	192.80 gr
<b>d prom.=</b>	3.48 cm	<b>Wt+ss=</b>	155.10 gr
<b>h1=</b>	7.97 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	7.97 cm	<b>W (%)=</b>	43.04
<b>h prom.=</b>	7.97 cm	<b>pvhi=</b>	1.656 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	9.51 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.653 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	75.87 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.157 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.082	<b>Gi=</b>	95.84 (%)
<b>ef=</b>	1.086	<b>Wi=</b>	43.26 (%)
<b>si=</b>	96.05 (%)	<b>Wf=</b>	43.04 (%)
<b>sf=</b>	95.54 (%)		

Figura 4.21 Prueba Triaxial UU.

<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla gris obscura con escasa arena fina.			
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1.55-1.75 m.		
<b>SONDEO:</b>	PCA-2	<b>PRESIÓN:</b>	0.50 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>MUESTRA:</b>	MC-1				

TIEMPO	ANILLO	f	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	9.29	0
10	6.8	1.3	0.16	9.3	0.14
20	15.8	3.03	0.33	9.32	0.32
30	26.8	5.14	0.5	9.34	0.55
40	35.0	6.72	0.66	9.35	0.71
45	31.9	6.12	0.75	9.36	0.65
50	23.8	4.56	0.83	9.37	0.48
					<b>0.7182</b>

<b>ds=</b>	3.57 cm	<b>Wo=</b>	123.80 gr
<b>dm=</b>	3.41 cm	<b>Wt=</b>	65.00 gr
<b>di=</b>	3.43 cm	<b>Wt+sh=</b>	188.90 gr
<b>d prom.=</b>	3.44 cm	<b>Wt+ss=</b>	149.50 gr
<b>h1=</b>	8.02 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	8.02 cm	<b>W (%)=</b>	46.63
<b>h prom.=</b>	8.02 cm	<b>pvhi=</b>	1.661 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	9.294 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.662 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	74.53 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.133 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.128	<b>Gi=</b>	99.65 (%)
<b>ef=</b>	1.126	<b>Wi=</b>	46.51 (%)
<b>si=</b>	99.553 (%)	<b>Wf=</b>	46.63 (%)
<b>sf=</b>	99.807 (%)		

Figura 4.22 Prueba Triaxial UU.



<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>		Arcilla gris oscura con escasa arena fina.			
<b>PROYECTO:</b>	Jiutepec, Morelos.	<b>PROFUNDIDAD:</b>	1.55-1.75 m.		
<b>SONDEO:</b>	PCA-2	<b>PRESIÓN:</b>	1.00 Kg/cm <sup>2</sup>		
<b>MUESTRA:</b>	MC-1				

TIEMPO	ANILLO	f	DEF.	AC	ESFUERZO
mm	mm	Kg.	%	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	9.57	0
10	9.2	1.76	0.16	9.29	0.19
20	17.8	3.41	0.33	9.3	0.36
30	27.1	5.20	0.50	9.32	0.55
40	33.8	6.48	0.66	9.33	0.69
50	39.3	7.54	0.83	9.35	0.8
60	43.0	8.25	1.00	9.36	0.88
80	42.8	8.21	1.33	9.40	0.87
85	42.2	8.10	1.41	9.40	0.86
90	39.2	7.52	1.50	9.41	0.79
					<b>0.8811</b>

<b>ds=</b>	3.58 cm	<b>Wo=</b>	120.40 gr
<b>dm=</b>	3.38 cm	<b>Wt=</b>	103.70 gr
<b>di=</b>	3.52 cm	<b>Wt+sh=</b>	224.10 gr
<b>d prom.=</b>	3.44 cm	<b>Wt+ss=</b>	186.20 gr
<b>h1=</b>	7.99 cm	<b>Ss=</b>	2.41
<b>h2=</b>	7.99 cm	<b>W (%)=</b>	45.94
<b>h prom.=</b>	7.99 cm	<b>pvhi=</b>	1.624 t/m <sup>3</sup>
<b>Ao=</b>	9.27 cm <sup>2</sup>	<b>pvhf=</b>	1.624 t/m <sup>3</sup>
<b>Vo=</b>	74.10 cm <sup>3</sup>	<b>pvs=</b>	1.133 t/m <sup>3</sup>
<b>ei=</b>	1.165	<b>Gi=</b>	95.03 (%)
<b>ef=</b>	1.165	<b>Wi=</b>	45.94 (%)
<b>si=</b>	95.027 (%)	<b>Wf=</b>	45.94 (%)
<b>sf=</b>	95.027 (%)		

Figura 4.23 Prueba Triaxial UU.

**PRUEBA TRIAXIAL UU**

**TIPO DE SUELO:** Arcilla gris oscura con escasa arena fina.  
**PROYECTO:** Jiutepec, Morelos. **PROFUNDIDAD:** 1.55-1.75 m.  
**SONDEO:** PCA-2 **MUESTRA:** MC-1

ENSAYO	PRESIÓN CONF.	ESFUERZO A LA FALLA	PESO VOL. NATURAL	Gwl	ei	VALORES PROMEDIO	
Num.	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(Kg/cm <sup>2</sup> )	(ton/m <sup>3</sup> )	(%)		Ss=	2.41
1	0.25	0.68	1.656	95.8	1.082	wi=	45.24%
2	0.50	0.72	1.661	99.7	1.128	wf=	45.20%
3	1.00	0.88	1.624	95.0	1.165	Gw=	96.84%
<b>DATOS FINALES</b>						Gwf=	96.79%
		ef	Gwl	wf	pvhf	PVN=	1.64 ton/m <sup>3</sup>
1	0.25	1.086	95.545	43.04	1.653	PVF=	1.64 ton/m <sup>3</sup>
2	0.50	1.126	99.807	46.63	1.662	ei=	1.12
3	1.00	1.165	95.027	45.94	1.624	ef=	1.13

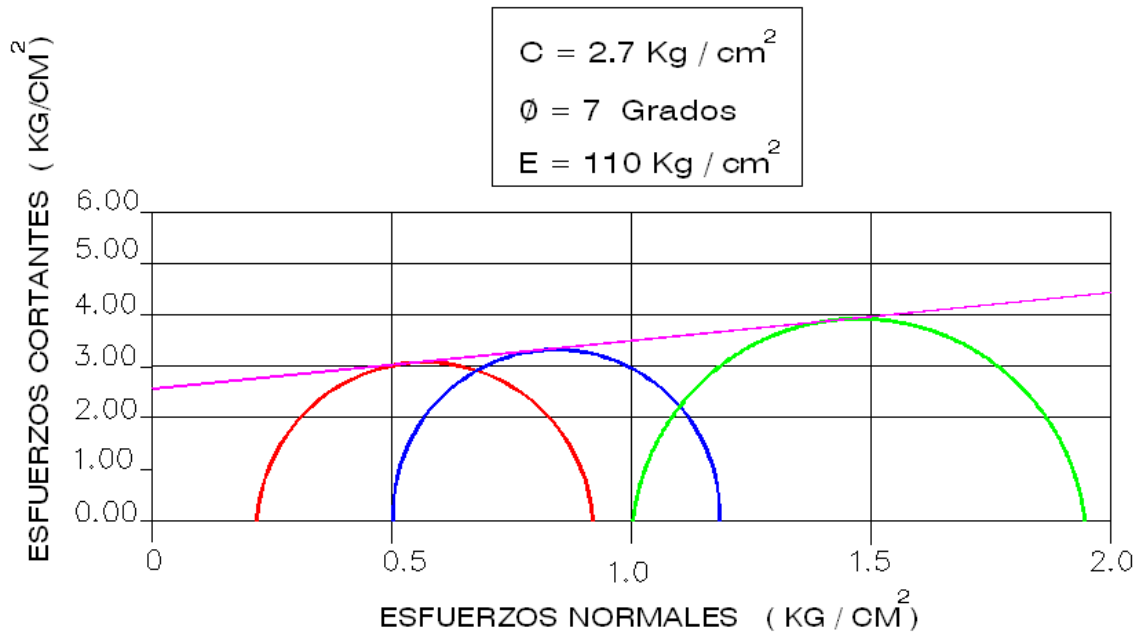


Figura 4.24 Prueba Triaxial UU, Círculo de Morh.

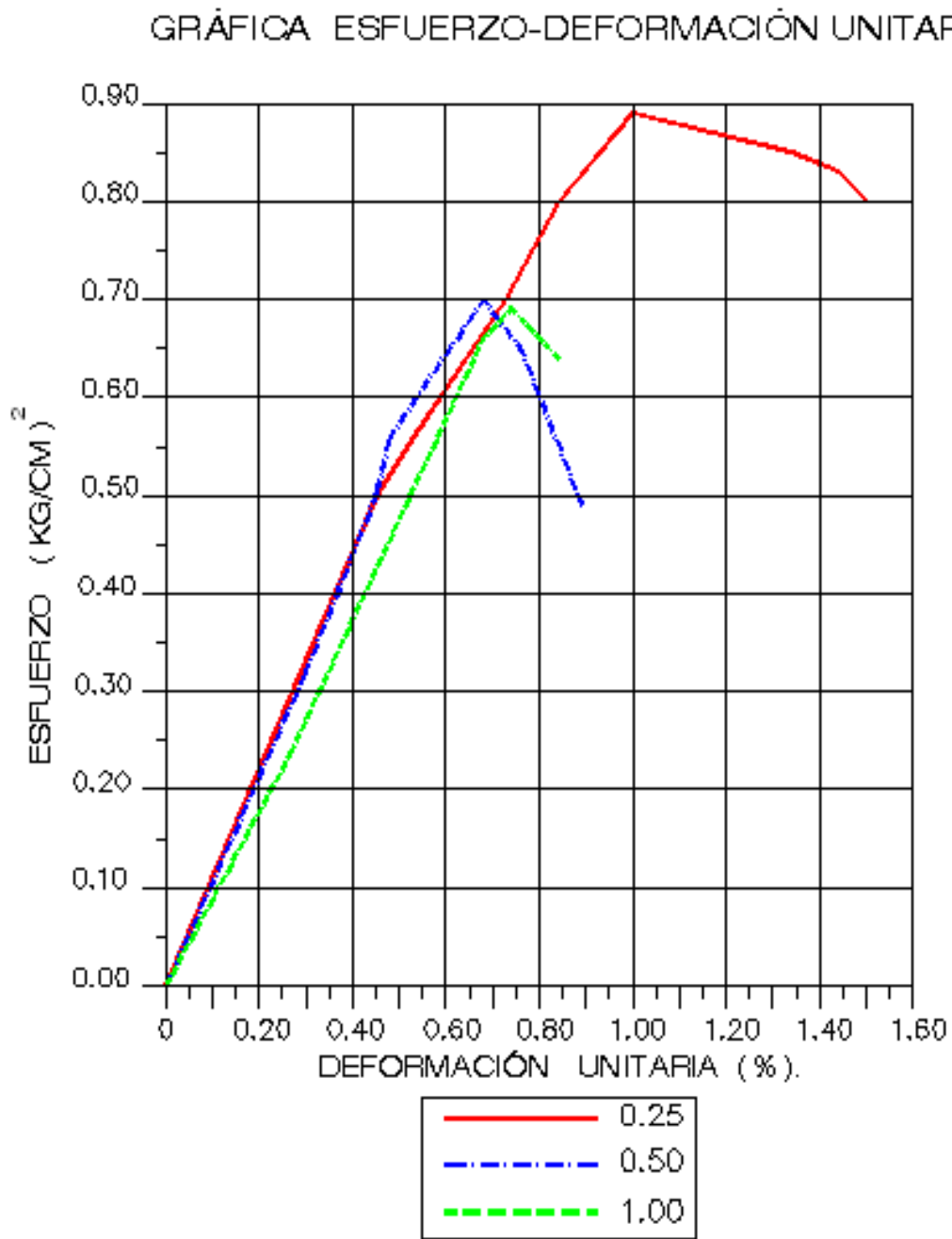


Figura 4.25 Gráfica esfuerzo-deformación unitaria.

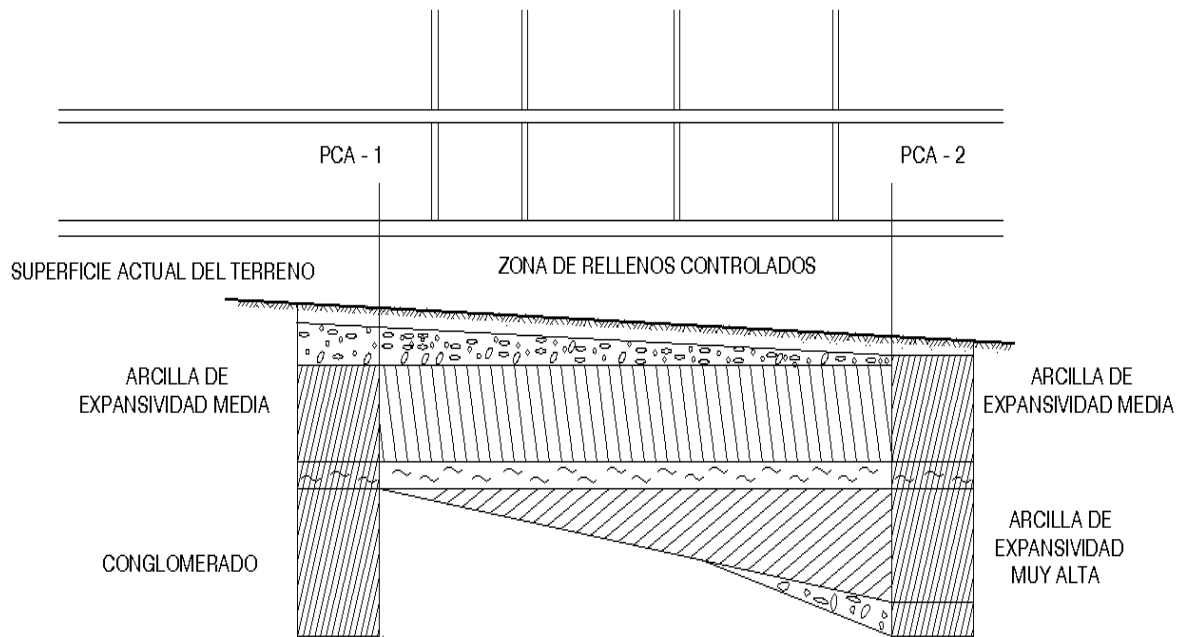


Figura 4.26 Corte Estratigráfico.

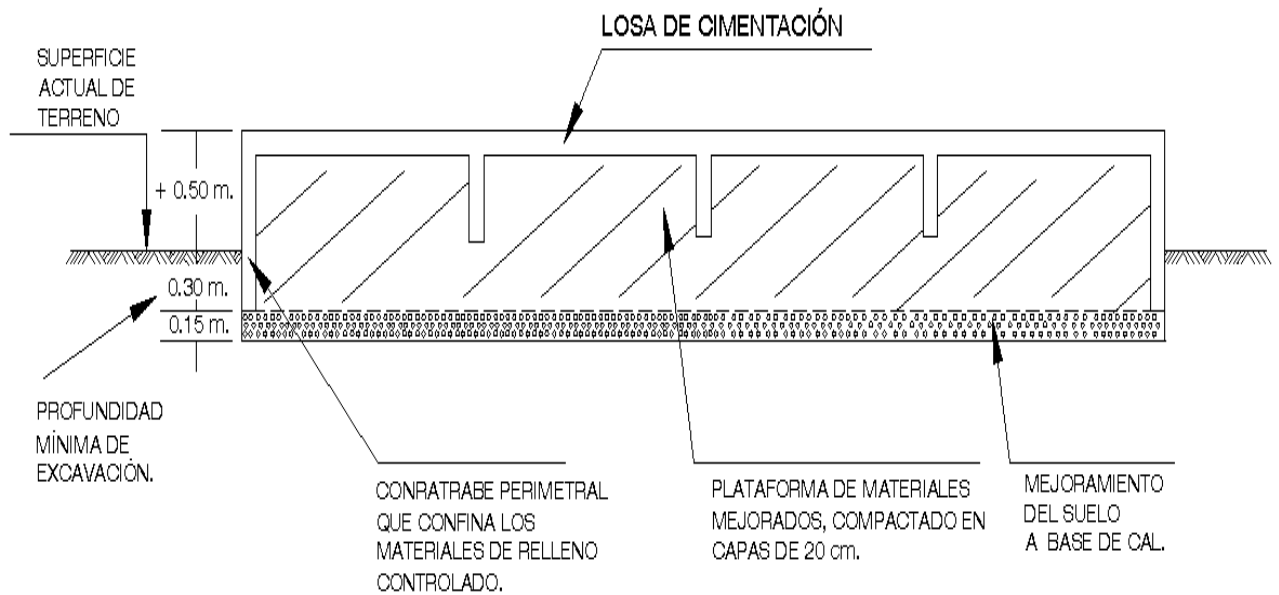


Figura 4.27 Losa de cimentación apoyada sobre una plataforma de materiales mejorados y una capa de mejoramiento de suelo a base de cal.

## CONCLUSIONES.

Dependiendo del tipo de suelo y de las condiciones del terreno se escogerá el tipo de mejoramiento de suelos, por eso es importante conocer las propiedades del suelo, su orígenes y los procesos de formación del suelo.

Los problemas más comunes que se evitan si se emplea un mejoramiento de suelos son: el rompimiento de tuberías de drenaje, rompimiento de canales, fractura de muros, levantamiento de pavimentos, pisos y banquetas. Se debe hacer una buena clasificación del suelo para evitar daños en las obras de ingeniería civil.

El criterio del ingeniero es fundamental para tomar la decisión final del método de mejoramiento a elegir y también debe tomar en cuenta las características de cada problema para poder dar la solución más óptima.

1.- Considero que antes de proponer un mejoramiento de suelos es necesario conocer el tipo de estructura que se va a construir y la magnitud de la obra para indicar el tipo de mejoramiento de suelos, ya que en ocasiones se cuenta con estudios anteriores, que nos permiten tener una idea aproximada de las condiciones del suelo y con ese conocimiento se puede hacer la exploración con mayor seguridad.

2.- Se debe tener un conocimiento amplio del método a utilizar, además es necesario hacer un programa de sondeos para determinar las características del suelo.

3.- Para evitar posibles pérdidas económicas, se debe tener cuidado al elegir el tipo de mejoramiento.

4.- Cuando se vaya a mejorar el suelo se debe hacer una buena clasificación del mismo, si el suelo es poco resistente o muy deformable el problema se resuelve mediante inyecciones de cal o cemento.

5.- Al mejorar un suelo se busca que éste tenga mejores características; es decir, que sus propiedades mecánicas y de formación sean las más adecuadas para que resistan el peso de la estructura.

6.- Se debe limpiar la zona de trabajo de rocas de más de 8", plantas y materia orgánica. La maquinaria debe ser operada correctamente para llevar cabo un buen proceso constructivo.

---

**REFERENCIAS.**

- Aris, C., (1990), "Mejoramiento de Suelos por Precarga", Limusa, México.
- Arredondo, F., (1997), "Compactación de Terrenos", Editores Técnicos Asociados, México.
- Braja, M., (2001), "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica" Thomson, México.
- Crespo, C., (1993), "Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Limusa, México.
- Crespo, C., (1984), "Vías de Comunicación, Caminos, Ferrocarriles, Aeropuertos, Puentes y Puertos", Limusa, México.
- Flores, J., (2005), "Cimentaciones en suelos expansivos", Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Acatlán.
- George, B., (1993), "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones", Limusa, México.
- González, L., (1995), "La Ingeniería Geológica", Prentice Hall, México.
- Juárez, E., (2005), "Mecánica de Suelos", tomos 1 y 2, Limusa, México.
- Ralph, B., (2006), "Ingeniería de Cimentaciones", Limusa, México.
- Terzaghi, K., (1973), "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica", El Ateneo, México.
- Tomlinson, M., (1994), "Diseño y Construcción de Cimentaciones", Urmo, México.
- Whitlow, R., (1994), "Fundamentos de Mecánica de Suelos", Urmo, México.
- William, T., (1997), "Mecánica de Suelos", Limusa, México.
- Martínez, R., (2010), "Mejoramiento de Suelos Licuables mediante el Método de Compactación Dinámica", Primer Coloquio de Jóvenes Geotecnistas, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, México.