



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**“COMPORTAMIENTO DE UN SUELO DE LA REGIÓN DE MORELIA
ESTABILIZADO CON CEMENTO Y UN ADITIVO MEJORADOR GEOLÓGICO”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

PRESENTA:

BERENICE JIMÉNEZ VÁZQUEZ.

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA.

Morelia, Michoacán; Diciembre 2011.



RESÚMEN.

La construcción de carreteras se ha ido mejorando de acuerdo con las necesidades (exigencias) y las posibilidades que había y que se contaban en su momento; así que en tiempos actuales las exigencias son más vanidosas y las herramientas más avanzadas, y es seguro que esto seguirá en crecimiento, pues las carreteras son el medio de transporte más usado en todo el mundo, siendo que permiten el desplazamiento de personas, mercancía para comercio, etc., reflejando esto una economía positiva para los países que cuenten con buenas carreteras.

Entre las exigencias mencionadas en el párrafo anterior, una es que toda carretera cuente con una estructura de pavimento lo suficientemente resistente, capaz de no sufrir daños que puedan provocar deformaciones del pavimento; y por ello es muy importante que los materiales pétreos cumplan ciertos parámetros para que conformen las capas de la estructura del pavimento y saber el hacer uso o no de ellos para la construcción de carreteras. Al no cumplir, se debe obtener el material pétreo de otro lugar (bancos de material), donde ya cuenta con calidades apropiadas.

No solo está la alternativa anterior para mejorar los suelos, sino también existen aditivos que tienen varios beneficios y hasta puede resultar más factible el uso de estos, lo cual se comprueba en éste trabajo en referencia a un mejorador del cemento llamado RoadCem, producto Holandés que se está implementando en México, y por supuesto es necesario saber cómo funciona y sus beneficios.

RoadCem ayuda a estabilizar suelos en la construcción de carreteras, está compuesto principalmente de Cloro, Magnesio y Calcio; Potasio, Aluminio y Silicio en concentraciones pequeñas, composición obtenida en el microscopio de barrido en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de la U.M.S.N.H.

Ya conocido el aditivo, la selección y muestreo del suelo a estabilizar se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la U.M.S.N.H., caracterizándose como una arcilla de alta plasticidad CH, y en base a la tabla de dosificación recomendada de la empresa que elabora éste aditivo, el estudio arranca en la dosis: 220 kg de cemento + 2.2 kg de RoadCem + 1 m³ de arcilla CH; de aquí parten más dosis para un panorama más amplio, determinando las siguientes 4 dosificaciones más para estudiar: 180 kg de cemento + 1.8 kg de RoadCem + 1 m³ de arcilla, 200 kg de cemento + 2.0 kg de RoadCem + 1 m³ de arcilla, 240 kg de cemento + 2.4 kg





de RoadCem + 1 m³ de arcilla, y 260 kg de cemento + 2.6 kg de RoadCem + 1 m³ de arcilla.

Se realizó todo lo necesario para la elaboración de los especímenes, curado y conservación; se les aplicó compresión simple y los resultados no arrojaron valores que se esperaban, pues las resistencias sin y con el aditivo son semejantes, a veces hasta resultando mayores resistencias los especímenes a los cuales se les agregó sólo cemento; esto, comparado con un análisis económico de cantidad de aditivo y de cemento, tampoco favorece el uso de RoadCem, pues resulta el doble de precio que usar sólo cemento para estabilizar. El costo por sí solo del RoadCem es alto.

Además, se hizo un comparativo también de lo que costaría el traer de algún banco de material el pétreo, tomando en cuenta el costo por m³ de éste más el acarreo al lugar de la obra, contra el uso del aditivo más cemento en el lugar, y definitivamente pinta éste caso como el del párrafo anterior, el costo de RoadCem + cemento es más elevado.





AGRADECIMIENTOS.

Ésta tesis no hubiese sido posible sin aquellas personas que estuvieron y siguen a mi alrededor, pues son guía de aprendizaje en mi vida.

Gracias a Dios, quien ha puesto en mi camino todo aquello que me ha hecho la persona que soy, pero además, porque me da la fé de seguir creyendo y fuerzas de levantarme cuando caigo y seguir caminando.

Doy gracias al Dr. Jorge Alarcón Ibarra, quien en todo momento me ha brindado conocimiento, respeto, positivismo y paciencia; y yo al recurrir a él en una segunda ocasión para trabajar ahora en éste proyecto, amablemente y con una sonrisa en su rostro aceptó, y ahora se ve en ésta tesis el trabajo guiado por él como mi asesor.

Agradezco al personal del laboratorio de Materiales, en especial a los que laboran en el área de Mecánica de Suelos, quienes estuvieron conmigo ayudándome en los inicios de las pruebas que ahí realicé y siempre fueron amables conmigo.

Así también, al Ing. José Luis Bárcenas, quién sin conocerme me abrió las puertas de la confianza y me brindó apoyo total y facilidad para adquirir información sobre el RoadCem.

A los integrantes del Laboratorio de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, quienes me brindaron el espacio para continuar con mis pruebas y hacer uso del equipo con el que ahí cuentan; muchas gracias Ing. Javier Linares Vázquez, Ing. Emilio, Leo y Alfre, por su valiosa ayuda, conocimientos y amistad.

A mi jefe, el Ing. Alberto Lemus Cruz, doy muchas gracias porque me brindó la oportunidad de ausentarme en horario de trabajo para poder dedicar el tiempo necesario al desarrollo de mi trabajo de tesis; además a mis superiores y compañeros de oficina: Lic. José Gaytán Martínez, Ing. Jorge Vargas Salvador, Ing. Cesáreo Lachino Colín e Ing. Jesús Curiel, por su entusiasmo, compañerismo y momentos de alegría que hemos compartido.

A mi padre, Bruno Jiménez Ugalde, gracias por darme la vida y guiarme en ella, por ser quien encendió en mí la llama de retomar el propósito de lograr mi titulación; por el apoyo a mi trabajo acompañándome a recopilar las muestras necesarias de suelo y llevarlas a laboratorio, gracias por no dejarme sola, éste





título es para ti. A mi hermana, María Cristina Jiménez Vázquez, por ser un apoyo y recalcarle que debo llegar a mi meta. Gracias doy a mi novio, Ing. José de Jesús Espinosa Arreola, por seguir paso a paso todo el avance de mi trabajo de esta tesis, por su dedicación conmigo, su paciencia, amor, tolerancia, recomendaciones y total apoyo hacia mí.

Gracias desde lo más profundo de mi corazón a mi mamá María de los Ángeles Vázquez Mayo (q. e. p. d), ser que me dio la vida y el más lindo amor, que estaba tan entusiasmada, orgullosa y feliz de que yo terminara mis estudios universitarios. A ella dedico este esfuerzo y el título que obtendré.





ÍNDICE.

Página:

Resúmen

Dedicatoria

1.- Introducción.....	4
2.- Objetivos.....	6
2.1.- Generales.	
2.2.- Particulares.	
3.- Desarrollo.....	7
3.1.- Historia e importancia de las carreteras.....	7
3.1.1.- Visión del sistema carretero en México.....	11
3.2.- Materiales para carreteras.....	12
3.2.1.- Clasificación de Suelos.....	12
1.- Clasificación de fragmentos de roca y suelo.....	16
2.- Clasificación S.U.C.S.....	16
3.2.2.- Características de los materiales para pavimentos.....	22
1.- Materiales para Terraplén.....	22
2.- Materiales para Subyacente.....	22
3.- Materiales para Subrasante.....	24
4.- Materiales para Subbase.....	25
5.- Materiales para Bases Hidráulicas.....	29
6.- Materiales para Bases Tratadas.....	35
3.3.- Composición Mineralógica de las arcillas.....	36
3.3.1.- Estructuras Laminares de las Arcillas.....	36
3.3.2.- Clasificación de los Minerales de las Arcillas.....	38
3.4.- Estructura de los suelos.....	40





3.4.1.- Estructuras Clásicas.....	41
3.4.2.- Estructuras Modernas.....	43
3.5.- Estabilización de suelos.....	44
3.5.1.- Estabilización con Cal.....	52
3.5.2.- Estabilización con cemento.....	54
3.6.- RoadCem.....	67
3.6.1.- Cemento Pórtland con RoadCem como aditivo.....	70
3.6.2.- Especificación de la mezcla estabilizada con RoadCem.....	72
3.7.- Parte experimental.....	76
3.7.1.- Pruebas de Laboratorio.....	76
1.- Muestreo del material.....	76
2.- Secado, disgregado y cuarteo de muestras.....	77
3.- Límites de consistencia.....	83
4.- Clasificación del suelo.....	91
5.- Compactación de suelos.....	91
6.- Determinación de la mezcla.....	101
7.- Elaboración de especímenes.....	102
8.- Conservación de especímenes.....	108
9.- Compresión simple.....	110
3.8.- Análisis de resultados.....	112
4.- Conclusiones.....	126
5.- Bibliografía.....	127
6.- Anexos.....	129





1.- INTRODUCCIÓN.

Las carreteras son la vía de transporte más usada por las personas en nuestro país y en el mundo; de ser en un principio veredas marcadas por los pisadas repetitivas de los pies del hombre, han pasado a tiempos actuales a ser maravillosas autopistas que brindan cortos tiempos de viaje, comodidad y seguridad al usuario. Pero para brindar éstos beneficios, se requiere que nuestra carretera sea construida (desde las terracerías hasta su capa de rodadura) de una manera correcta (buenos materiales que conformarán cada una de las capas y un buen proceso constructivo).

Refiriéndonos a los materiales que conforman cada una de las capas del pavimento, en ocasiones éstas no cumplen con buenas características que satisfagan las necesidades del usuario manifestadas en el proyecto, entonces como dicen los autores Juárez Badillo y Rico Rodríguez: en el lugar de la obra, el material: a) se utiliza tal cual se encuentra in situ por tener buenas propiedades, b) se elimina el material y se trae otro de algún banco de material que cumpla con las propiedades, c) si el suelo in situ no cumple con las propiedades y no se tiene un banco de material o la manera rápida y conveniente de traer suelo de mejores características, entonces se recurre a adicionar un producto al suelo con el que se cuenta, que le ayudará a mejorar sus propiedades débiles que originalmente tiene.

El propósito de éste trabajo, es la investigación del uso de un producto que han creado investigadores Holandeses, para ayudar a modificar la estructura de suelos de forma física y química, que les proporciona mejores características de resistencia, durabilidad, menor desgaste, entre otros; ayudando a mejorar la calidad del camino que se construirá con el suelo in situ.

Nos adentraremos al análisis de un producto denominado: “Aditivo Estabilizador Geológico” que lleva por nombre ROADCEM, que mediante la prueba de compresión simple se determinará qué dosificación es la más efectiva comparando resistencia y análisis costo/beneficio, de acuerdo a una propuesta original de la empresa que elabora éste producto estabilizador.

El estudio del presente trabajo surge debido a la construcción de dos obras de gran magnitud en la ciudad de Morelia, una de ellas el distribuidor vial salida a Charo, en donde se utilizó el producto llamado RoadCem para la estabilización del suelo del lugar; la otra, es la reciente construcción del distribuidor vial de la carretera Morelia-Jiquilpan (salida a Quiroga), en el cual en un principio se consideró en el proyecto el uso de este producto, lo cual despertó el interés por conocer en qué consiste su utilización y los beneficios que resulten de su empleo.



Al inicio de los trabajos del distribuidor vial salida a Quiroga se llevó a cabo una visita de obra, en la cual, se encontró que en el lugar no había material a estabilizar, resultando ser roca sana en su mayoría, lo que llevó a la suspensión del uso del producto para esa obra.

A pesar de lo anterior, se siguió con el interés de conocer el RoadCem, por lo cual tuvimos que muestrear otro tipo de suelo, que fuese representativo de la ciudad de Morelia, pues es en esta ciudad donde tiene lugar la construcción de las obras mencionadas.

Se planteó trabajar con arcilla, suelo que ha resultado un problema en la construcción de distintas obras civiles, por ejemplo por sufrir cambios volumétricos considerables o ser material plástico. Este tipo de suelo se encuentra de manera abundante dentro de las Instalaciones de la Universidad Michoacana, y la obtención de muestras resulta muy accesible y rápida.

Como el RoadCem actualmente se está implementando en México, y se ha utilizado en la ciudad de Morelia; fuera de creer o no en los beneficios que se obtienen con el uso de él, surge la inquietud por hacer un análisis de cómo se comporta con los suelos que se encuentran en distintas zonas de ésta ciudad, y los costos que implica usarlo o no de acuerdo a los beneficios técnicos que confiere al mismo.



2.- OBJETIVOS.

2.1.- General.

Llevar a cabo el análisis del comportamiento de un suelo estabilizado únicamente con cemento, en comparación con la adición de un aditivo estabilizador geológico agregado al cemento, desde el punto de vista de resistencia a la compresión simple y el impacto económico que se genera al emplear este aditivo.

2.2.- Particulares.

Valorar la importancia que han tenido las carreteras desde sus inicios en la antigüedad hasta la época actual, y conocer el papel que juegan en el desarrollo social, económico y de servicios entre regiones.

Conocer la estabilización de suelos, por qué es importante, y cuáles son las variables principales que se tienen que considerar en carreteras para que un suelo pueda ser debidamente estabilizado.

Estudiar el RoadCem para saber qué es, qué elementos lo componen y qué influencia tiene en el proceso de estabilización de suelos, así como los beneficios que se obtienen en su empleo.

Caracterizar un suelo representativo de la ciudad de Morelia que se encuentra en C.U. para determinar su procedencia y saber si es susceptible de ser estabilizado.

De acuerdo a una dosificación recomendada por la empresa patente de éste producto, que varía en base al tipo de suelo, estudiar un rango más amplio de dosificaciones y ensayar especímenes a compresión simple para obtener la resistencia que presenta el suelo sin estabilizar, estabilizado con cemento y estabilizado con cemento más el aditivo.

Realizar un análisis de resultados desde el punto de vista técnico y económico, y determinar si es factible o no la utilización del aditivo para la estabilización del suelo en estudio.



3.- DESARROLLO.

3.1.- Historia e Importancia de las Carreteras.

Para hablar del inicio de la formación de los caminos empezamos hablando del continente Europeo y Asiático.

La carretera Real Persa es la carretera más antigua de larga distancia, que tuvo su apogeo en el año 3500 - 300 A. C.; tenía una trayectoria que iniciaba cerca del Golfo Pérsico, un lugar llamado Arbela (muy cerca de lo que ahora es Bagdad en Iraq), continuaba hacia el Noroeste a Samosata donde cruzaba el río Éufrates, siguiendo al oeste hasta llegar a Ankara (al Sur del Mar Negro) continuando la ruta hacia el Mar Egeo donde se ubica Esmirna (Ver fig. 1, ruta blanca). Un ramal que formaba parte de la Carretera Real Persa se unía al oeste del Lago Van, siguiendo hacia el sur hasta Jerusalén y finalizando en el Cairo (Ver Fig.3.1.1, ruta naranja).



Fig. 3.1.1 Ruta de la Carretera Real Persa.
Fuente: Google Earth, 2011.

Ejemplos de carreteras que se construyeron más tarde, unían a palacios y templos en las ciudades de Assur y Babilonia. Estaban construidas con ladrillo cocido y piedra unidos con mortero. (Fig. 3.1.2).

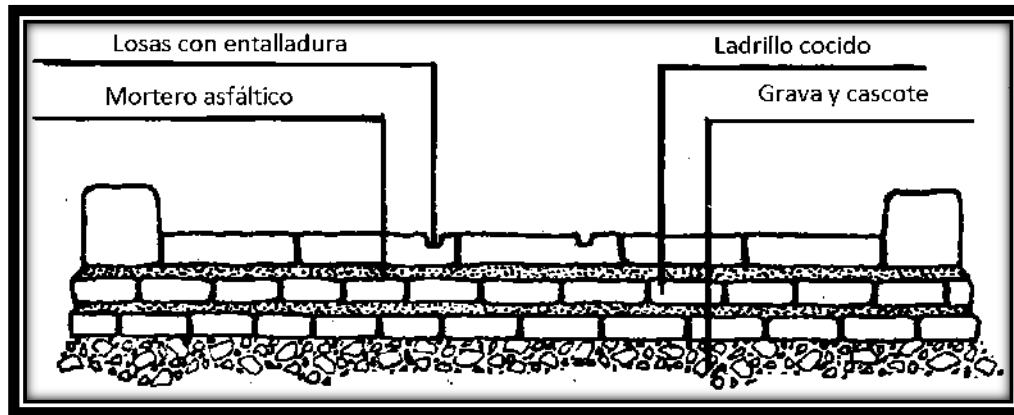


Fig. 3.1.2 Estructura de Carretera en Babilonia.
Fuente: Blanco, V., 1987.

Mencionemos a los Mesopotámicos, quienes fueron también de los primeros constructores de carreteras hacia el año 3,500 A. C.; sin olvidar a los Chinos quienes desarrollaron un sistema de carreteras al Sureste de Asia, teniendo por característica ser amplias, bien construidas y cubiertas con piedra, entre las ciudades que comunicaban estaban Sianfu, Nanking y Cheng-tu.

De las carreteras antiguas que aún existen fueron construidas por los Romanos; La Vía Appia que comunica a Roma con Hidruntum (Fig. 3.1.3), cuya construcción fue iniciada por Appius Claudius alrededor del año 312 A. C., y la Vía Faminia hacia el 220 A. C.; el Imperio Romano tenía un sistema de carreteras de unos 80,000 kilómetros, que lo constituían 29 calzadas que partían de la Ciudad de Roma y una red que cubría todas las provincias conquistadas importantes, inclusive Gran Bretaña.



Fig. 3.1.3. Vía Appia, Italia.

Fuente: [http://www.primeroscristianos.com/images/tesoros_roma/via_appia/Via_Appia_map\[1\].jpg](http://www.primeroscristianos.com/images/tesoros_roma/via_appia/Via_Appia_map[1].jpg), última visita Noviembre 2011.

Adentrándonos más a nuestro continente, en Mesoamérica la Civilización Maya también destacó en la construcción de caminos denominados “sacbes” (significa caminos blancos, son caminos de aproximadamente 4 metros de ancho de corona, recubiertos con piedras, lo que podemos actualmente conocer en México como una carretera alimentadora); pero también se les conoce así a las construidas por los Toltecas que se establecieron en la Meseta Central en México en el año 752, los Aztecas quienes fundaron Tenochtitlán, hoy Ciudad de México, y los Incas en el año 1100 A. C. en Perú (Reyes, 2007).

La carretera fue introducida en América durante el siglo XVI por el español Sebastián de Aparicio. Él ayudó a construir las primeras carreteras en México: México – Veracruz, México – Querétaro y México - Zacatecas. El siglo XVIII marca el inicio de la Era Moderna; el tránsito se incrementa por el obvio aumento de la población y el mal estado de los caminos, por éstos motivos se introduce el cobro de cuotas de peaje que permiten la conservación y construcción de los caminos.

Se inicia con las redes de carreteras de las Ciudades principales del País, con la invención de los motores de combustión interna, la producción en serie de automotores empezó a generar cambios en el modo de transporte, el automóvil ya había adquirido velocidades y capacidad de carga mayores a las que tenían antes; a fines de 1910 y principios de 1911 se adaptó un tramo del camino Toluca-México para el tráfico de automóviles. Había entonces 26 km de carretera, 250 km. de



caminos de herradura y 822.6 km. de vías de ferrocarril (cuya red se había duplicado en 33 años). Pasado el período de lucha armada de la Revolución, se reconstruyeron los caminos existentes y se inició la construcción de otros. El Gobierno Federal dio gran impulso a los caminos carreteros pavimentados, entonces los ferrocarriles comenzaron a ceder importancia al autotransporte.

Pero nuestro país no tenía un buen número de carreteras, sino caminos para transportarse en carretas, caballos y mercancías por ferrocarril; urgían caminos modernos y establecer comunicación de la capital del País con los puertos marítimos y fronterizos, además con las capitales de los estados de la república y comunicación entre éstas mismas. Si no se contaban con éstas redes no se podía visar un desarrollo económico, social y político en el país; tenían que cumplir con especificaciones que pudieran satisfacer un probable tránsito intenso (Alonzo, 2005).

Al paso de los años, se ha visto el desarrollo que ha tenido México en la construcción de carreteras, pero falta aún mucho por hacer a comparación de otros países desarrollados, pero en eso se está trabajando. Del año 2000 a la actualidad se ha visto la construcción no sólo de carreteras, sino de modernas autopistas en las que en algunas de ellas se vio la necesidad de estabilizar el material del sitio.



Fig. 3.1.7 Principales corredores carreteros de México.
Fuente: SCT, Atlas de la Red Carretera de México, 2011.

Actualmente el Gobierno Federal impulsa el desarrollo de la infraestructura del País mediante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, teniendo siempre objetivos y propósitos para los usuarios y el desarrollo del país.

3.1.1.- Visión del Sistema Carretero en México:

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes tiene la visión de contar con un sistema carretero de gran cobertura, calidad y seguridad, que apoye la competitividad y la eficiencia de la economía y de los sectores que la componen, que contribuya a eliminar desequilibrios y a potenciar el desarrollo regional mejorando el acceso a zonas rurales marginadas, con énfasis en el uso eficiente de los recursos,



la atención al usuario, la protección al medio ambiente, y el desarrollo de proyectos que contribuyan al reordenamiento territorial y la eficiencia operativa y conexión de corredores (libramientos, entronques, distribuidores y accesos), considerando como ejes rectores la colaboración con el sector privado, la transparencia y la rendición de cuentas.

Objetivos del Sistema Carretero.

- Construir y modernizar la red carretera federal a fin de ofrecer mayor seguridad y accesibilidad a la población y así contribuir a la integración de las distintas regiones del país.
- Abatir el costo económico, social y ambiental del transporte asociado con el estado físico de la infraestructura carretera, en beneficio de toda la población y la seguridad del tránsito vehicular.
- Modernizar la gestión del sistema carretero, con objeto de lograr una operación más eficiente e incrementar la calidad de los servicios que se ofrecen en las carreteras del país.
- Construir y modernizar la red de caminos rurales y alimentadores con objeto de facilitar el acceso a los servicios básicos a toda la población rural en especial a la de escasos recursos y promover un desarrollo social equilibrado.

3.2.- Materiales para Carreteras.

Los materiales usados en la construcción de las carreteras se obtienen de la Corteza Terrestre; pero ¿cómo se formó?, el Globo Terráqueo está formado por varias capas llamadas:

- Núcleo: formado por hierro y níquel, justo en el centro de la Tierra; se encuentra fundido a altísima temperatura (magma) y se va solidificando conforme tiene contacto con el manto.
- Manto: capa que envuelve al núcleo, es sólida y de gran espesor (miles de kilómetros); está formada por magma que sube por venas o ranuras (formadas por el movimiento de placas tectónicas) que se enfría y endurece.
- Corteza: es la capa superior del manto, por el movimiento de placas tectónicas se forman distintos relieves (montañas, mesetas, cañones, océanos, etc.); está expuesta al medio ambiente y ello hace que sea propensa a ataques de



intemperismo, lo que desgasta a la corteza y la convierte en suelo. ¿Cómo pasa esto?

La Corteza Terrestre es atacada naturalmente por: aire, agua, altas y bajas temperaturas, entre otros; según Juárez (2005) todos los mecanismos de ataque pueden incluirse en dos tipos: desintegración mecánica y descomposición química, al cual describen a cada uno de la siguiente manera:

- **Desintegración Mecánica:**
Se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas, etc.
- **Descomposición Química:**
Es la acción de agentes que atacan las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación.

Los suelos deben su origen a una variedad de causas que excede todo poder de descripción detallada; el resultado de esa variedad es una inmensa diversidad de tipos de suelos resultantes. Toda ésta transformación ha ocurrido a través de miles y miles de años, tal como sigue ocurriendo hoy; entonces por ello, el hombre es ajeno al origen del suelo, así que sólo le toca utilizarlo como la naturaleza se lo presenta.

Cada persona es un mundo, por lo tanto, cada uno tiene su propio concepto de las cosas, que aunque sean similares con otros no llegarán a ser la misma. Así por ejemplo entablemos la pregunta *¿qué es un suelo?*. De acuerdo con Crespo (2004), *“el suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan”*. Mientras que para Juárez (2005) *“suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas, quedando excluidas de la definición las rocas sana, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie”*.

La interpretación de “Suelo” varía de acuerdo a los intereses de cada profesante; así por ejemplo: para el Agrónomo, el suelo es la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal. Para el Geólogo es todo material intemperizado en el lugar que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie. Y así dependiendo del cristal con que se mire.



Nuestra definición de suelo es: material proveniente de la corteza terrestre, el cual ya no conserva la forma de roca sana (estructura sólida, densa), debido a la desintegración de ésta por los efectos de intemperización a la que está expuesta, convirtiéndose en partículas más pequeñas y hasta finas, formándose un conjunto de partículas de gran variedad de tamaños y en conjunto forman material terroso.

Se define que el suelo presenta tres (3) fases que lo constituyen: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida la forma las partículas de suelo; la fase líquida la conforma el agua; la fase gaseosa es el aire que pueda estar presente en los huecos que ni siquiera ocupa el agua. (Fig. 3.2.1).

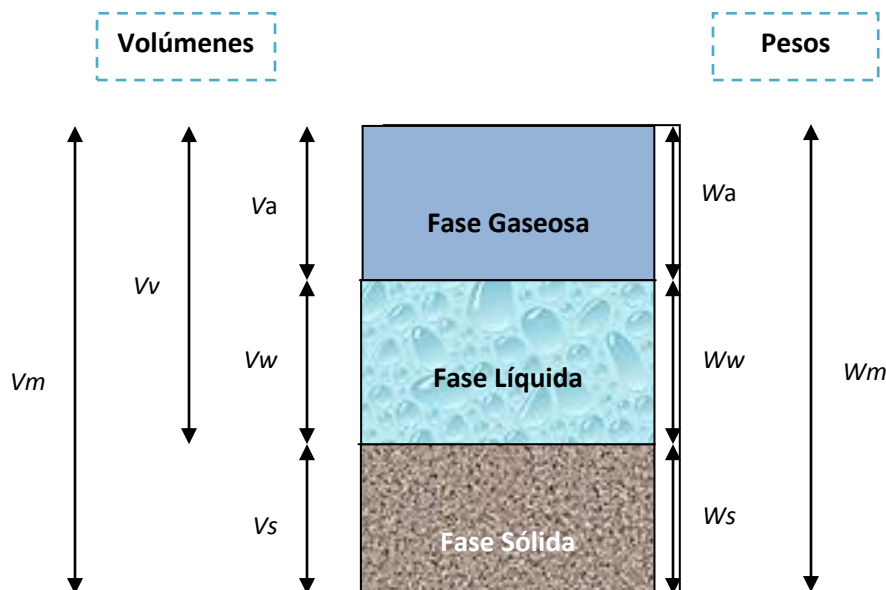


Fig. 3.2.1 Fases de un Suelo.
Fuente: Juárez y Rico (2005).

En la realidad, las fases del suelo no se presentan ordenadas como se observa en la figura, es un arreglo complejo de ellas. Dada ésta complejidad y la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, surgió la necesidad de investigadores de desarrollar un Sistema de Clasificación.

Dicha clasificación es parte de la Mecánica de Suelos, la cual, a idea de Crespo (2004) la define como: *“rama de la Mecánica que trata de la acción de las fuerzas sobre la masa de los suelos”*.

A diferencia, el Doctor Karl Terzaghi definió a la Mecánica de Suelos como: *la aplicación de las Leyes de la Mecánica y la Hidráulica a los problemas de Ingeniería*



que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producto de la desintegración química y mecánica de las rocas.

EL Dr. Juárez Badillo Eulalio y el Maestro Rico Rodríguez Alfonso manejan la misma definición que el Dr. Terzaghi, pero aumentan que *la Mecánica de Suelos incluye: 1) Teorías sobre el comportamiento de los suelos sujetos a carga, basadas en simplificaciones necesarias dado el actual estado de la técnica; 2) Investigación de las propiedades físicas de los Suelos reales, y 3) Aplicación del conocimiento Teórico y Empírico a los problemas prácticos.*

Muchos investigadores han trabajado en estudios de la Mecánica de Suelos, pero pocos han llegado a trascender. Dada la complejidad y la infinita variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, cualquier intento de sistematización científica, debe de ir precedido por otro de clasificación completa, y por supuesto, la Mecánica de Suelos desarrolló estos Sistemas de Clasificación. Es obvio que éste pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, y para ello, debe estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser éstas lo esencial para la Ingeniería; a la vez, debe ser principalmente cualitativa, Juárez (2005), puesto que un sistema que incluya relaciones cuantitativas y de detalle respecto a las propiedades mecánicas, resultaría complicada su aplicación práctica. Debe de servir para Normar el criterio del Técnico respecto al suelo de que se trate (previo a un conocimiento más extenso de las propiedades de éste); y como clímax, ofrecerá la máxima información normativa, a partir de la cual el técnico sepa en qué dirección llevar su estudio.

Entre los trabajos realizados para la clasificación de suelos, los hechos por el Dr. Casagrande le permitieron desarrollar un Sistema que satisface los distintos campos de aplicación de ésta rama, el cual se denominó *Sistema de Clasificación de Aeropuertos*, así originalmente llamado, debido a que estaba orientado para uso en aquel tipo de obras.

Éste Sistema propuesto originalmente en 1942 ha sido modificado en cantidad mínima y cambiado su nombre a *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)*; en él se interpreta que a los suelos formados por partículas mayores que la malla N° 200, el criterio básico de clasificación es el granulométrico; mientras que para las partículas menores a dicha malla, las propiedades mecánicas e hidráulicas se deducen cualitativamente a partir de sus características de plasticidad.



3.2.1.- Clasificación de Suelos.

Pero ¿cómo funciona?, ¿cómo se interpreta? Para ello vamos a basarnos en el Manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes: M-MMP-1-02/03 “Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos”, el cual describe el procedimiento para clasificar los materiales para terracerías a la que se refieren las Normas: Materiales para Terraplén, Materiales para Subyacente y Materiales para Subrasante, de acuerdo con pruebas índice realizadas en campo y en laboratorio.

Objetivo: Clasificar los materiales para terracerías que pueden ser fragmentos de roca o suelos, que permiten estimar algunas de las propiedades físicas y mecánicas del material.

1.- Clasificación de Fragmentos de Roca.

Los fragmentos de roca son todos aquellos cuyo tamaño está comprendido entre 7.5 - 200 cm, según su tamaño se clasifican de acuerdo a lo que se muestra en la tabla 3.2.1; por su tamaño, forma, textura superficial y grado de alteración en la tabla 3.2.2 se observan sus características.

2.- Clasificación de Suelos con base en el Sistema S.U.C.S.

Los suelos son materiales provenientes de la corteza terrestre de partículas de tamaño menores de 7.5 cm. Se clasifican en base a su composición granulométrica y en sus características de plasticidad, como se indica en la tabla 3.2.3 que se a continuación se muestra.

Los suelos se clasifican como *suelos gruesos* cuando más del 50% de sus partículas son de tamaño mayor que 0.075mm (malla N° 200), y como *suelos finos* cuando el 50% de sus partículas o más son de tamaño menor.

Los suelos gruesos se clasifican como *grava* cuando más del 50% de las partículas de la fracción gruesa tienen tamaño mayor que 4.75 mm (malla N° 4), y *arena* cuando el 50% de las partículas o más son de tamaño menor a la abertura de ésta malla.

La grava se identifica con la letra “G” (Gravel) y la arena con “S” (Sand), y se subdividen en 8 subgrupos:



Tipo	Subtipos	Identificación	Símbolo de grupo
Fragmentos de roca (tamaños mayores de 7.5 cm y menores de 2 m)	Grandes (mayores de 75 cm y menores de 2 m)	Fragmentos grandes, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fg
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo.	Fgm
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos, predominando los grandes, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo.	Fgc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos medianos y chicos, predominando los grandes sobre los medianos y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo.	Fgmc
		Fragmentos grandes mezclados con fragmentos chicos y medianos, predominando los grandes sobre los chicos y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo.	Fgcm
	Medianos (mayores de 20 cm y menores de 75 cm)	Fragmentos medianos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fm
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes, predominando los medianos sobre los grandes, con menos del 10% de fragmentos chicos o de suelo.	Fmg
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos, predominando los medianos sobre los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo.	Fmc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos grandes y chicos, predominando los medianos sobre los grandes y éstos sobre los chicos, con menos del 10% de suelo.	Fmgc
		Fragmentos medianos mezclados con fragmentos chicos y grandes, predominando los medianos sobre los chicos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo.	Fmcg
	Chicos (mayores de 7.5 cm y menores de 20 cm)	Fragmentos chicos, con menos del 10% de otros fragmentos o de suelo.	Fc
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos medianos o de suelo.	Fcg
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos, predominando los chicos, con menos del 10% de fragmentos grandes o de suelo.	Fcm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos grandes y medianos, predominando los chicos sobre los grandes y éstos sobre los medianos, con menos del 10% de suelo.	Fcgm
		Fragmentos chicos mezclados con fragmentos medianos y grandes, predominando los chicos sobre los medianos y éstos sobre los grandes, con menos del 10% de suelo.	Fcmg

Tabla 3.2.1 Clasificación de los Fragmentos de Roca.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-02/03, 2003.

Forma	Redondeada
	Subredondeada
	Angulosa
	Lajeada
	Acicular ^[1]
Textura ^[2]	Lisa
	Rugosa
	Muy rugosa
Grado de alteración	Sanos
	Alterados
	Muy alterados
^[1] En forma de aguja ^[2] Cuando los fragmentos sean francamente porosos se hará notar también esta característica.	

Tabla 3.2.2 Características de los Fragmentos.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-02/03, 2003.



2.1.- Suelos Gruesos.

- a) Grava o Arena Bien graduada (GW ó SW): Si el material contiene hasta 5% de finos, cuando se trate de una grava cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es >4 y su coeficiente de curvatura (C_c) esté entre 1 y 3 se clasifica como *Grava Bien Graduada* y se identifica con el símbolo GW. Cuando se trate de una arena cuyo coeficiente de uniformidad (C_u) es >6 y su C_c esté entre 1 y 3, se clasifica como *Arena Bien Graduada* y se identifica con el símbolo SW.
- b) Grava o Arena Mal Graduada (GP o SP): Si el material contiene hasta 5% de finos y sus C_u y C_c no cumplen con lo indicado en el punto anterior, se clasifica como *Grava Mal Graduada* (GP) ó *Arena Mal Graduada* (SP).
- c) Grava o Arena Limosa (GM ó SM): Si el material contiene más del 12% de finos y éstos son limos, se clasifica como *Grava Limosa* (GM) o *Arena Limosa* (SM).
- d) Grava o Arena Arcillosa (GC ó SC): Si el material contiene más del 12% de finos y estos son arcilla, se clasifica como *Grava Arcillosa* (GC) o *Arena Arcillosa* (SC).
- e) Grava o Arena Bien Graduada Limosa (GW-GM ó SW-SM): Si el material contiene entre 5 y 12% de finos y estos son limos, cuando se trate de una grava bien graduada se clasifica como *Grava Bien Graduada Limosa* (GW-GM), pero si es una arena bien graduada entonces llevará el nombre de *Arena Bien Graduada Limosa* (SW-SM).
- f) Grava o Arena Mal Graduada Limosa (GP-GM ó SP-SM): Si el material contiene entre 5 y 12% de finos y estos son limos, cuando se trate de una grava se clasificará como *Grava Mal Graduada Limosa* (GP-GM), pero si es una arena mal graduada se identificará como *Arena Mal Graduada Limosa* (SP-SM).
- g) Grava o Arena Bien Graduada Arcillosa (GW- GC ó SW-SC): Si la grava o la arena son bien graduadas, contienen entre 5 y 12% de finos y éstos son Arcilla, se clasifican como *Grava Bien Graduada Arcillosa* (GW-GC) o *Arena Bien Graduada Arcillosa* (SW-SC) según corresponda.
- h) Grava o Arena Mal Graduada Arcillosa (GP-GC ó SP-SC): Si el material contiene grava o arena mal graduadas, entre 5 y 12% de finos siendo estos Arcilla, se clasifican como *Grava Mal Graduada Arcillosa* (GP-GC) o *Arena Mal Graduada Arcillosa* (SP-SC).



2.2.- Suelos Finos.

Los Suelos Finos se clasifican según sus características de plasticidad en: Limos, Arcillas y Turbas.

a) Limo (*M*):

El Suelo Fino se clasifica como Limo cuando su Límite Líquido (W_L) y su Índice Plástico (I_P) definen un punto de la Carta de Plasticidad (Fig. 3.2.4) en las zonas I ó III y se identifica con el símbolo “*M*”. La diferencia de una zona a otra es que si el punto se ubica en la zona I el material se clasifica como *Limo de Baja Compresibilidad* (ML); mientras, si se aloja en la zona III será un *Limo de Alta Compresibilidad* (MH).

Si el material contiene una cantidad apreciable de materia orgánica y el punto definido por las coordenadas (Límite Líquido –Índice Plástico) se ubica cercano y por debajo de la línea “A” de la Carta de Plasticidad, se clasifica como *Limo Orgánico de Baja Compresibilidad* si su Límite Líquido es $< 50\%$ y se identifica con el símbolo OL, o como *Limo Orgánico de Alta Compresibilidad* si su Límite Líquido es $> 50\%$ y asignándosele el símbolo OH.

b) Arcilla (*C*):

El Suelo Fino se clasifica como Arcilla cuando su Límite Líquido (W_L) y su Índice Plástico (I_P) definen un punto de la Carta de Plasticidad ubicado en las zonas II y IV, identificándose con el símbolo “*C*”. Si dicho punto se aloja en la zona II, el material se clasifica como *Arcilla de Baja Compresibilidad* (CL); pero si se ubica en la zona IV, se clasifica como *Arcilla de Alta Compresibilidad* (CH).

c) Suelos Orgánicos (*O*) ó Turbas:

El Suelo Fino se clasifica como Altamente Orgánico, cuando hay presencia de restos de plantas y animales, o cualquier otro factor orgánico en su composición; se identifica por su color, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa; se le denomina Turba y se identifica con el símbolo P_t .



Tipo	Sub-Tipos		Identificación		Símbolo de Grupo		
Suelos (partículas menores de 7.5 cm)	SUELOS GRUESOS Más de la mitad del material se retiene en la malla N°200 (0.075 mm)	GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4	GRAVA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Grava bien graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GW	
				Grava mal graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	GP	
			GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Grava limosa; mezcla de grava, arena y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	GM	
				Grava arcillosa; mezclas de grava, arena y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	GC	
		ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	Arena bien graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (C_u) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (C_c) entre 1 y 3 ^[1]	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SW	
				Arena mal graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW.	Menos del 5% en masa pasa la malla N°200	SP	
	SUELOS FINOS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 (0.075 mm)	LIMO Y ARCILLA Límite líquido	Menor de 50%	ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	Arena limosa; mezcla de arena, grava y limo.	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH (véanse abajo los grupo ML y MH)	SM
					Arena arcillosa; mezclas de arena, grava y arcilla	Más de 12% en masa pasa la malla N°200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH (véanse abajo los grupo CL y CH)	SC
			Mayor de 50%	Limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	ML		
				Arcilla de baja compresibilidad; mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona II de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	CL		
				Limo orgánico de baja compresibilidad; mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona I de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	OL		
				Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	MH		
	ALTAMENTE ORGÁNICOS		Arcilla de alta compresibilidad; mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona IV de la carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.	CH			
Limo orgánico de alta compresibilidad; mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la zona III de la Carta de plasticidad mostrada en la Figura 1 de este Manual.			OH				
Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa.			P _t				

[1] Los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c), que se utilizan para determinar la graduación de los suelos GW, GP, SW y SP están dados por las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

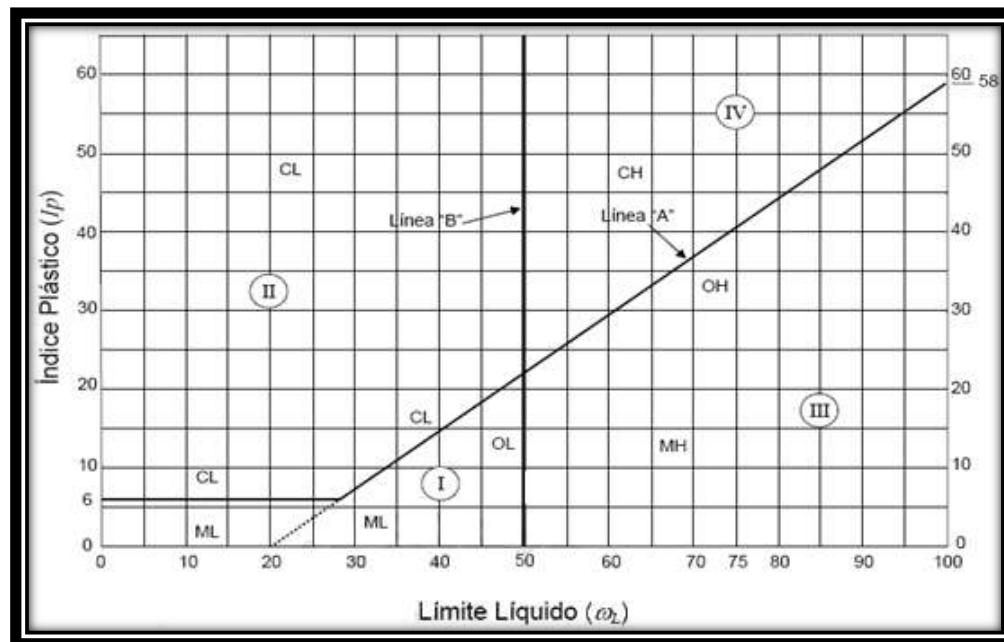
Donde D_{10} , D_{30} y D_{60} son los tamaño de las partículas para el cual el 10, 30 y 60% en masa del material es menor que esos tamaños, respectivamente, determinados gráficamente de la curva granulométrica como se indica en el Manual MMMP-1-06, *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*.

Tabla 3.2.3 Clasificación de Suelos SUCS.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-02/03, 2003.



La clasificación general que acaba de mostrarse, ayuda muchísimo a identificar una amplia de suelos presentes en nuestra corteza terrestre. Sabemos que la Ingeniería le da muchos usos a los suelos, entre ellos a las Carreteras como se ha mencionado anteriormente, el cual es el enfoque de éste trabajo.

El estructura de pavimento de una carretera está conformado por una serie de capas (una sobre la otra), compactadas, de distintos espesores y hechas de suelo cada una de ellas. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes elaboró una serie de Normas denominadas por el nombre de cada una de las capas, y en ella se hace referencia a una clasificación más particular de acuerdo a las características que debe cumplir cada una de éstas capas, mostrándose a continuación.





3.2.2.- Características de los Materiales para Pavimentos.

1.- Materiales para Terraplén.

Basada en la Norma N-CMT-1-01/02 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ésta contiene los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen en la construcción de Terraplenes.

Definición:

Los materiales para terraplén son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar el cuerpo de un terraplén hasta el nivel de desplante de la capa subyacente.

Requisitos de Calidad:

Los materiales que se utilicen para la formación de los terraplenes cumplirán con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 3.2.5 de ésta Norma. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt), ni materiales producto de despalmes.

Característica	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación ^[2] ; %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente el porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa. Cuando el material sea no compactable de acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*, se colocará en capas del espesor mínimo que permita el tamaño máximo del material y se bandeará, previa aplicación de un riego de agua a razón de 150 l/m², dando como mínimo tres pasadas en toda la superficie en cada capa, con un tractor de 36,7 t con orugas.

Tabla 3.2.5 Requisitos de Calidad de Materiales para Terraplén.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-1-01/02, 2002.

2.- Materiales para Subyacente.

Corresponde a la Norma N-CMT-1-02/02, realizada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Definición:



Los materiales para la capa subyacente son suelos y fragmentos de roca, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima del cuerpo de un terraplén.

Requisitos de Calidad:

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subyacente, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de ocho punto dos (8.2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt).

- a) Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea menor de diez mil (10 000) ejes equivalentes, no se requiere la capa subyacente.
- b) Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de diez mil (10,000) a un millón (1'000,000) de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 3.2.6 de ésta Norma y tendrá un espesor mínimo de treinta (30) centímetros.

Característica	Valor
Tamaño máximo y granulometría	Que sea compactable ^[1]
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2] , %, mínimo	10
Expansión; %, máxima	3
Grado de compactación ^[3] , %	95 $\pm$ 2
^[1] De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, <i>Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos</i> .	
^[2] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.	
^[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.	

Tabla 3.2.6 Requisitos de Calidad de Materiales para Capa Subyacente.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-1-02/02, 2002.

- c) Cuando la intensidad del tránsito (ΣL) sea de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 1 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de setenta (70) centímetros.



- d) Cuando la intensidad del tránsito ($\sum L$) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subyacente será motivo de diseño especial.
- e) Si la capa subyacente se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en las Fracciones b) o c) de esta Norma, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 4.2.7, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

3.- Materiales para Sub-rasante.

Denominada Norma N-CMT-1-03/02 y pertenece a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Definición:

Los materiales para la capa sub-rasante son los suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos, que se utilizan para formar dicha capa inmediatamente encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén cuando ésta última no se construya, para servir de desplante a un pavimento.

Requisitos de Calidad:

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa sub-rasante, en función de sus características y de la intensidad de tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho punto dos (8.2) toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento ($\sum L$), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba (Pt).

- a) Cuando la intensidad del tránsito ($\sum L$) se igual a un (1) millón de ejes equivalentes o menor, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 4.2.8 de ésta Norma y tendrá un espesor mínimo de veinte (20) centímetros.
- b) Cuando la intensidad del tránsito ($\sum L$) sea de un (1) millón a diez (10) millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 4.2.8 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de treinta (30) centímetros.
- c) Cuando la intensidad del tránsito ($\sum L$) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa sub-rasante será motivo de diseño especial.



- d) Si la capa sub-rasante se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en las Fracciones a) ó b) de esta Norma, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 3.2.7, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

Característica	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2
[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al del material en el banco a 1,5 m de profundidad.	
[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.	

Tabla 3.2.7 Requisitos de Calidad de Materiales para Capa Sub-rasante.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-1-03/02, 2002.

4.- Materiales para Sub-base.

Norma por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) denominada N-CMT-4-02-001/04.

Definición:

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la sub-rasante, para formar una capa de apoyo para la base de pavimentos asfálticos.

Clasificación:

Éstos materiales, según el tratamiento que recibieron, pueden ser:

- a) Materiales Naturales.

Son las arenas, gravas y limos, así como rocas muy alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria. Una



vez extraídos y, en su caso, disgregados, no contendrán más del cinco (5) por ciento de partículas mayores de setenta y cinco (75) milímetros (3”), las que serán eliminadas manualmente, ni más de veinticinco (25) por ciento de material que pase la malla con abertura de cero coma cero setenta y cinco (0,075) milímetros (N° 200).

b) Materiales Cribados.

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria. Una vez extraídos y, en su caso, disgregados, si contienen entre el cinco (5) y el veinticinco (25) por ciento de partículas mayores de setenta y cinco (75) milímetros (3”) y no más de veinticinco (25) por ciento de material que pase la malla con abertura de cero punto cero setenta y cinco (0.075) milímetros (N° 200), para hacerlos utilizables requerirán de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

c) Materiales Parcialmente Triturados.

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados, que contienen de veinticinco (25) a setenta y cinco (75) por ciento de partículas mayores de setenta y cinco (75) milímetros (3”), que para ser utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

d) Materiales Totalmente Triturados.

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

e) Materiales Mezclados.

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren las Fracciones a, b y c, en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en esta Norma.

Requisitos de Calidad para Subbases de Pavimentos Asfálticos:

El material natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación:



- El material tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 3.2.8 y se muestran en la Figura 3.2.9, y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.2.10 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho punto dos (8.2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
50	2"	100	100
37,5	1½"	72 - 100	72 - 100
25	1"	58 - 100	58 - 100
19	¾"	52 - 100	52 - 100
9,5	¾"	40 - 100	40 - 100
4,75	Nº4	30 - 100	30 - 80
2	Nº10	21 - 100	21 - 60
0,85	Nº20	13 - 92	13 - 45
0,425	Nº40	8 - 75	8 - 33
0,25	Nº60	5 - 60	5 - 26
0,15	Nº100	3 - 45	3 - 20
0,075	Nº200	0 - 25	0 - 15

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla 3.2.8 Requisitos de Granulometría de los materiales para Sub-bases de Pavimento Asfáltico.
Fuente: SCT, Manual N-CMT-4-02-001/04, 2004.

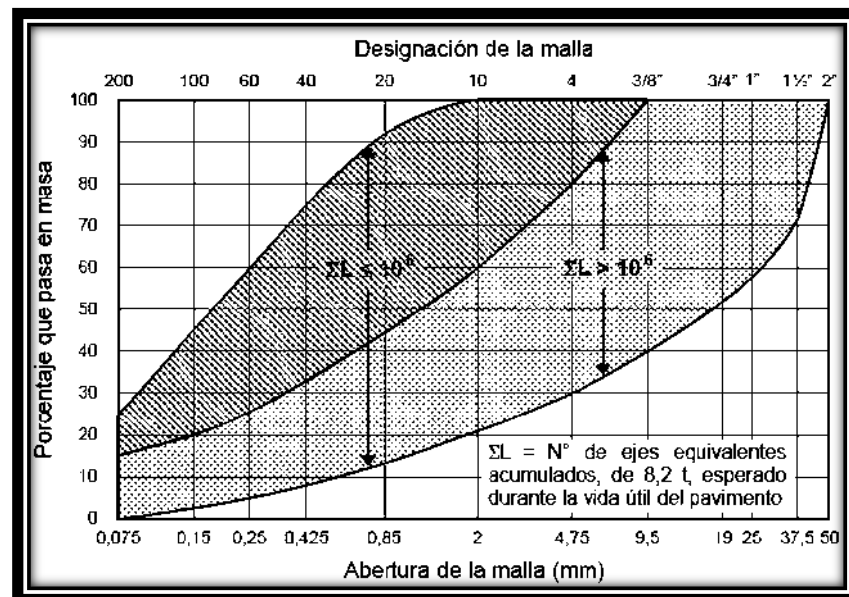


Figura 3.2.9 Zonas Granulométricas recomendadas de los Materiales para Sub-bases.
Fuente: SCT, Manual N-CMT-4-02-001/04, 2004.



Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	30	25
Índice plástico ^[2] , máximo ¹	10	6
Valor Soporte de California (CBR) ^[2, 3] , mínimo	50	60
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	30	40
Desgaste Los Ángeles ^[2] , máximo	50	40
Grado de compactación ^[2, 4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.
 [2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
 [3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.
 [4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Tabla 3.2.10 Requisitos de Calidad de los Materiales para Sub-bases de Pavimento Asfáltico.
Fuente: SCT, Manual N-CMT-4-02-001/04, 2004.

- La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el manual M-MMP-4-01-003, Granulometría, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en la Figura de esta Norma, sin cambios bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de cero punto cero setenta y cinco (0.075) milímetros (N° 200) al que pase la malla con abertura de cero punto cuatrocientos veinticinco (0.425) milímetros (N° 40) no será mayor de cero punto sesenta y cinco (0.65).
- Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el contratista de obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de los mismos, evitando su segregación o degradación.



5.- Materiales para Bases Hidráulicas.

De la Norma N-CMT-4-02-002/04 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Definición y Clasificación:

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la Subbase o la Subrasante, para formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico.

Estos materiales, según el tratamiento que recibieron, pueden ser:

a) Materiales Cribados.

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria. Una vez extraídos, y en su caso, disgregados, si contienen entre el cinco (5) y el veinticinco (25) por ciento de partículas mayores de setenta y cinco (75) milímetros (3”) y no más de veinticinco (25) por ciento de material que pase la malla con abertura de cero punto cero setenta y cinco (0.075) milímetros (N° 200), para hacerlos utilizables requerirán de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

b) Materiales Parcialmente Triturados.

Son los pocos o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados, que contienen de veinticinco (25) a setenta y cinco (75) por ciento de partículas mayores de setenta y cinco (75) milímetros (3”), que para ser utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

c) Materiales Totalmente Triturados.

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

d) Materiales Mezclados.

Son los que se obtienen de la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren las Fracciones a) y c), en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en esta Norma.



Requisitos de calidad para Bases de Pavimentos Asfálticos y de Pavimentos de Concreto Hidráulico:

El material cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de bases para pavimentos asfálticos o para pavimentos de concreto hidráulico, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación.

- a) El material para la base hidráulica será cien (100) por ciento producto de la trituración de roca sana, cuando el tránsito esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes acumulados de ocho coma dos (8,2) toneladas; cuando ese tránsito sea de uno (1) a diez (10) millones, el material contendrá como mínimo setenta y cinco (75) por ciento de partículas producto de la trituración de roca sana y si dicho tránsito es menor de un (1) millón, el material contendrá como mínimo cincuenta (50) por ciento de esas partículas.
- b) Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de concreto hidráulico, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 3.2.11 y se muestran en la Figura 3.2.12, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.2.13 de esta Norma.

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
37,5	1½"	100
25	1"	70 - 100
19	¾"	60 - 100
9,5	¾"	40 - 100
4,75	Nº4	30 - 80
2	Nº10	21 - 60
0,85	Nº20	13 - 44
0,425	Nº40	8 - 31
0,25	Nº60	5 - 23
0,15	Nº100	3 - 17
0,075	Nº200	0 - 10

Tabla 3.2.11 Requisitos de Granulometría de los Materiales para Bases de Pavimentos con Carpetas de Concreto Hidráulico.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

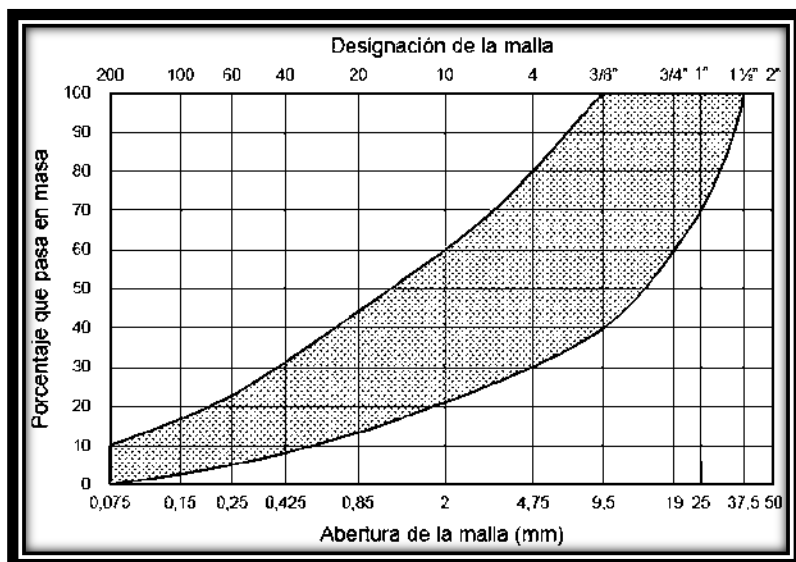


Figura 3.2.12 Zona Granulométrica recomendable de los Materiales para Bases de Pavimentos con Carpetas de Concreto Hidráulico. Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

Característica	Valor %
Límite líquido ^[1] , máximo	25
Índice plástico ^[1] , máximo	6
Equivalente de arena, mínimo ^[1]	40
Valor Soporte de California (CBR), mínimo ^[1, 2]	80
Desgaste Los Angeles, máximo ^[1]	35
Partículas alargadas y lajeadas, máximo	40
Grado de compactación ^[1, 3] , mínimo	100

[1] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.
 [2] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.
 [3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Tabla 3.2.13 Requisitos de Calidad de los Materiales para Bases de Pavimentos con Carpetas de Concreto Hidráulico. Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

- c) Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de mezcla asfáltica de granulometría densa, ya sea en caliente o en frío, el material para base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 3.2.14 y se muestran en la Figura 3.2.15, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.2.16 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho punto dos (8.2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).



Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
37,5	1½"	100	100
25	1"	70 - 100	70 - 100
19	¾"	60 - 100	60 - 86
9,5	¾"	40 - 100	40 - 65
4,75	N°4	30 - 80	30 - 50
2	N°10	21 - 60	21 - 36
0,85	N°20	13 - 44	13 - 25
0,425	N°40	8 - 31	8 - 17
0,25	N°60	5 - 23	5 - 12
0,15	N°100	3 - 17	3 - 9
0,075	N°200	0 - 10	0 - 5

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla 3.2.14 Requisitos de Granulometría de los Materiales para Bases de Pavimentos con Carpetas de Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

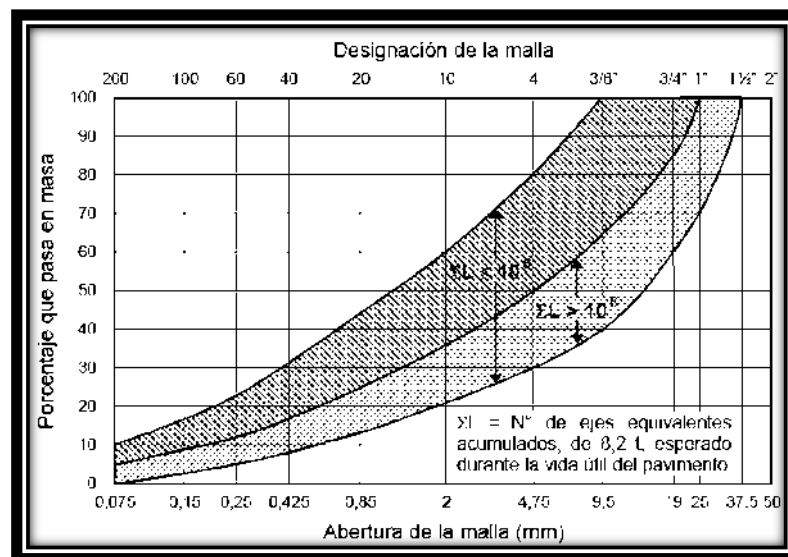


Figura3.2.15 Zonas Granulométricas recomendables de los Materiales para Bases de Pavimentos con Carpetas de Mezcla Asfáltica de Granulometría Densa.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.



Característica	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^5$ [1]	$\Sigma L > 10^5$ [1]
Límite líquido ^[2] , máximo	25	25
Índice plástico ^[2] , máximo	6	6
Equivalente de arena ^[2] , mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2,3] , mínimo	80	100
Desgaste Los Ángeles ^[2] , máximo	35	30
Partículas alargadas y ladeadas ^[2] , máximo	40	35
Grado de compactación ^[2,4] , mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.
 [2] Determinado mediante el procedimientos de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C de esta Norma.
 [3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.
 [4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Tabla 3.2.16 Requisitos de Calidad de los Materiales para Bases de Pavimentos Asfálticos.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

- d) Cuando sobre la base que se construya se coloque solamente un tratamiento asfáltico superficial, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 3.2.17 y se muestran en la Figura 3.2.18, y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.2.16 de esta Norma, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de ocho punto dos (8.2) toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (ΣL).

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
37,5	1½"	100	100
25	1"	100	70 – 100
19	¾"	60 – 100	60 – 85
9,5	¾"	40 – 83	40 – 65
4,75	Nº4	30 – 67	30 – 50
2	Nº10	21 – 50	21 – 36
0,85	Nº20	13 – 37	13 – 25
0,425	Nº40	8 – 28	8 – 17
0,25	Nº60	5 – 22	5 – 12
0,15	Nº100	3 – 17	3 – 9
0,075	Nº200	0 – 10	0 – 5

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla 3.2.17 Requisitos de Granulometría de los Materiales para Bases que sean cubiertas sólo con un Tratamiento Asfáltico Superficial.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

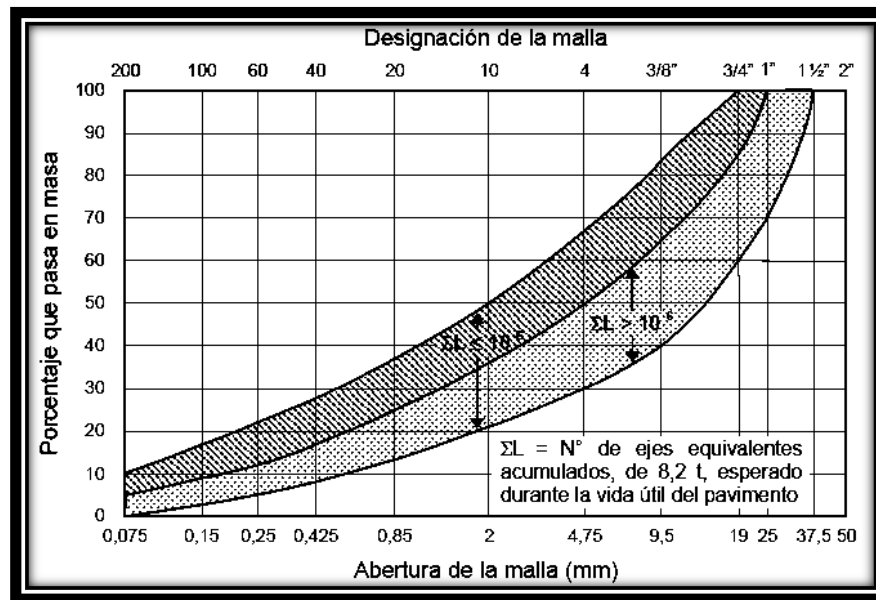


Fig.3.2.18 Zonas Granulométricas recomendables de los Materiales para Bases de Pavimentos Asfálticos y de Pavimentos de Concreto Hidráulico.

Fuente: SCT, Norma N-CMT-4-02-002/04, 2004.

- e) La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M-MMP-4-01-003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en las Figuras 3.2.12, 3.2.15 y 3.2.18 de esta Norma, según sea el caso, sin cambios bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de cero punto cero setenta y cinco (0.075) milímetros (N° 200) al que pase la malla con abertura de cero punto cuatrocientos veinticinco (0.425) milímetros (N° 40) no será mayor de cero punto sesenta y cinco (0.65).
- f) Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el contratista de Obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de los mismos, evitando su segregación o degradación.



6.- Materiales para Bases Tratadas.

Basado en la Norma N-CMT-4-02-003/04 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Definición y clasificación:

Son materiales que no cumplen con alguno de los requisitos de calidad establecidos en la Norma N-CMT-4-02-002 “Materiales para Bases Hidráulicas” (mencionada en el punto 5) o que, por razones estructurales, requieren la incorporación de un producto que modifica alguna de sus características físicas, haciéndolos generalmente más rígidos y resistentes, mejorando su comportamiento mecánico e hidráulico. Siendo colocada sobre la subbase o la subrasante y formar una capa de apoyo para una carpeta asfáltica o para una carpeta de concreto hidráulico.

Estos materiales, según el producto que se utilice para su tratamiento, se clasifican como:

- a) Materiales Modificados con Cal. Cuando se les incorpora de 2 a 3% (en masa) de cal, para modificar su plasticidad o reducir el efecto de la materia orgánica en los suelos.
- b) Materiales Modificados con Cemento. Cuando se les incorpora de 3 a 4% (en masa) de cemento Pórtland, para modificar su plasticidad o incrementar su resistencia.
- c) Materiales Estabilizados con Cemento. Cuando se les incorpora de 8 a 10% (en masa) de cemento Pórtland, para obtener una resistencia a la compresión simple a los 28 días de edad, no menor de 25 kg/cm^2 e incrementar su rigidez, reduciendo así el efecto de la fatiga sobre la carpeta o mejorando el apoyo de las losas de concreto hidráulico.
- d) Materiales Estabilizados con Asfalto. Cuando se les incorpora, mediante una emulsión o asfalto rebajado, de 3 a 4% (en masa) de cemento asfáltico, para mejorar su comportamiento y el efecto de la plasticidad.
- e) Base de Mezcla Asfáltica (Base Negra). Cuando a los materiales se les incorpora, en caliente o frío, de 4 a 5% (en masa) de cemento asfáltico, para formar una capa de concreto asfáltico magro.

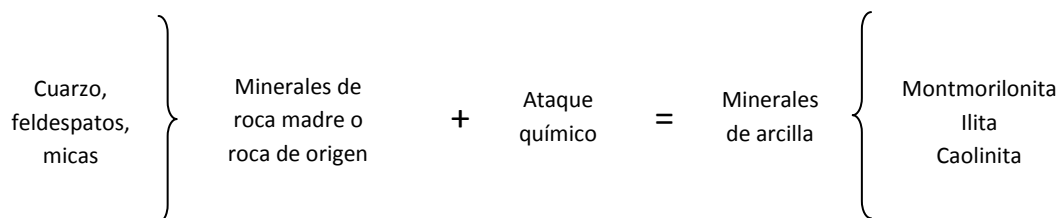


- f) Base de Concreto Hidráulico Magro o de poca resistencia. Cuando a los materiales se les incorpora el cemento Pórtland necesario para obtener una resistencia a la compresión simple a los 28 días de 150 kg/cm^2 a 200 kg/cm^2 y transformar un pavimento flexible en un pavimento rígido.

Sea cual sea la clasificación del suelo, en algunos casos el material con el que se trabajará no cumple con especificaciones y características apropiadas, entonces éste trabajo va basado a estabilizar suelos; por lo tanto, es necesario el uso de aditivos que mejoren física y químicamente las propiedades del suelo de tal manera que llegue a cumplir con los requisitos de calidad que el proyecto y el cliente requieren.

3.3.- Composición Mineralógica de las Arcillas:

La descomposición mecánica de las rocas da lugar a partículas de fragmentos de roca que tienen la misma composición mineralógica que la roca madre o roca de origen; surge después la descomposición química en los fragmentos que da lugar a la formación de partículas finas que tienen una composición mineralógica diferente a la que originalmente tenía la roca madre. Puede observarse lo anterior con el siguiente esquema:



3.3.1.- Estructuras Laminas de las Arcillas:

El resultado final del ataque químico a los minerales de la roca madre son los minerales de arcilla, los cuales están formados de 2 estructuras laminas, que son: lámina sílica y lámina alumínica.

Lámina Sílica: la unidad básica o celda primitiva de la lámina sílica está formada por átomos de oxígeno formando un tetraedro en el centro del cual se encuentra un átomo de silicio (Fig. 3.3.1).

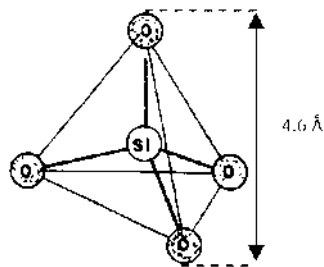


Fig. 3.3.1 Estructura de una celda Sílica.
Fuente: Domínguez y Schifter, 1995.

La unidad básica de la lámina sílica no está equilibrada químicamente, razón por la cual tiende a unirse con otras unidades con la finalidad de compartir los átomos de oxígeno con los átomos de silicio, dando como resultado un arreglo laminar (Fig. 3.3.2). En dicho arreglo, las valencias de oxígeno y silicio están balanceadas químicamente horizontal, sin embargo, los átomos de oxígeno de la parte superior de los tetraedros no están balanceados químicamente, y por lo tanto, es una superficie activa. Esto le permite a la lámina sílica ligarse fácilmente con elementos químicos disueltos en el agua, lo que explica el por qué la arcilla se une firmemente con el agua.



Fig. 3.3.2 Arreglo laminar de celdas de lámina sílica.
Fuente: Domínguez y Schifter, 1995.

Lámina Alumínica: la unidad básica de la lámina alumínica está formada por átomos de oxígeno y oxidrilos, formando un octaedro en el centro del cual se tiene un átomo de aluminio (Fig. 3.3.3).

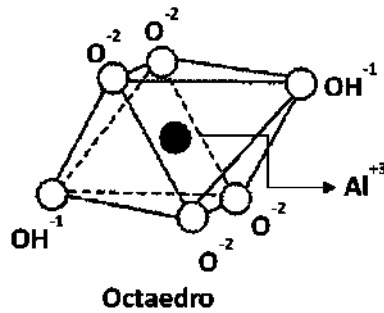


Fig. 3.3.3 Estructura de una celda Aluminica.
Fuente: Domínguez y Schiffer, 1995.

Esta unidad tampoco está balanceada químicamente, razón por lo cual los átomos de oxígeno son compartidos por celdas adyacentes, lo que da una estructura laminar (Fig. 3.3.4). La lámina aluminica es más compleja que la sílica, ya que en éste caso las valencias de oxígeno, oxidrilos y aluminio no se equilibran en ningún sentido.

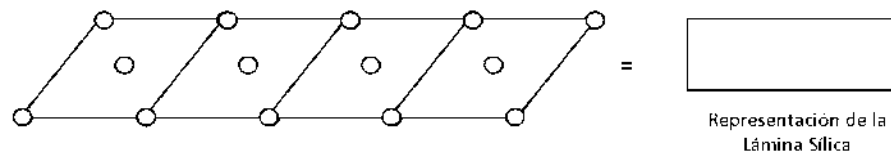


Fig. 3.3.4 Arreglo de celdas de lámina aluminica.

3.3.2.- Clasificación de los Minerales de las Arcillas:

Los minerales de arcilla se forman por la unión de muchas unidades básicas de la lámina sílica y aluminica; ésta unión es muy débil, lo que facilita que las moléculas de agua penetren y separen dichas unidades.

Los principales minerales de la arcilla son: montmorilonita, illita y caolinita.

- a) **Montmorilonita:** es un mineral de arcilla, cuya unidad básica se forma por el empaquetamiento de una lámina aluminica entre dos láminas sílicas (Fig. 3.3.5). Pueden absorber volúmenes de hasta 7 veces más que su propio volumen, macroscópicamente éste comportamiento se ve como una expansión del suelo arcilloso.

Se debe tener especial cuidado si se van a construir estructuras ligeras sobre suelos arcillosos que contengan mineral de montmorilonita, ya que si se



incrementa en ellos la humedad, la expansión que se genera puede causar serios daños a las estructuras.

La Bentonita es el nombre común de la montmorilonita, que por sus características de expansión y plasticidad, es ideal para ser utilizada en el relleno de grietas o construcción de pantallas impermeables y ademado de excavaciones y pozos.

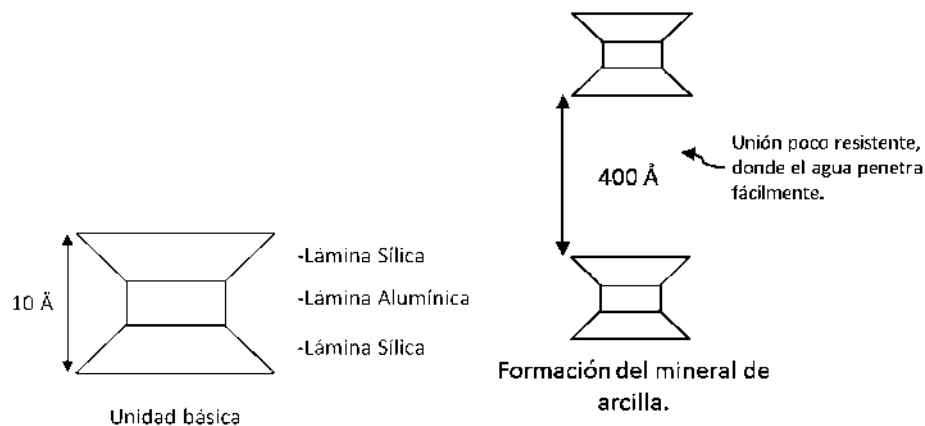


Fig. 3.3.5 Unión del mineral de arcilla de Montmorilonita.

- b) **Ilita:** mineral cuya unidad básica está formada por dos empaquetamientos de una lámina alumínica entre dos láminas sílicas unidas entre sí por átomos de potasio (Fig. 3.3.6).

Las lilitas, por la presencia de átomos de potasio, tienden a formar grumos ante la presencia de agua.

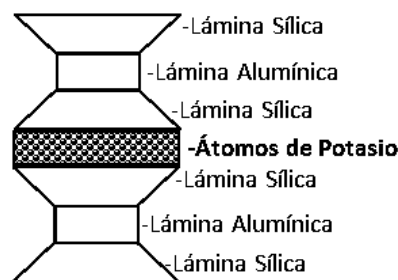


Fig. 3.3.6 Unidad de la Ilita.

- c) **Caolinitas:** la unidad básica de las caolinitas está formada por el empaquetamiento de una lámina sílica y una lámina alumínica (Fig. 3.3.7), que



se unen firmemente entre ellas, razón por la cual son muy estables bajo la presencia de agua.

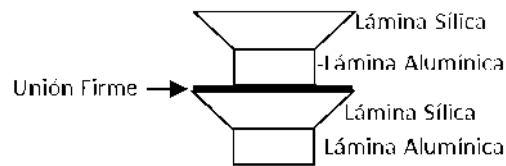


Fig. 3.3.7 Unidad de la Caolinita.

Se puede dar una idea del tipo de arcilla que la que se trata, por los valores de límite líquido y límite plástico al suelo, basándonos en la tabla 3.3.8:

Descripción	LL	LP
Caolinita	35 - 100	25 - 35
Ilita	50 - 100	30 - 60
Montmorilonita	100 - 800	50 - 100

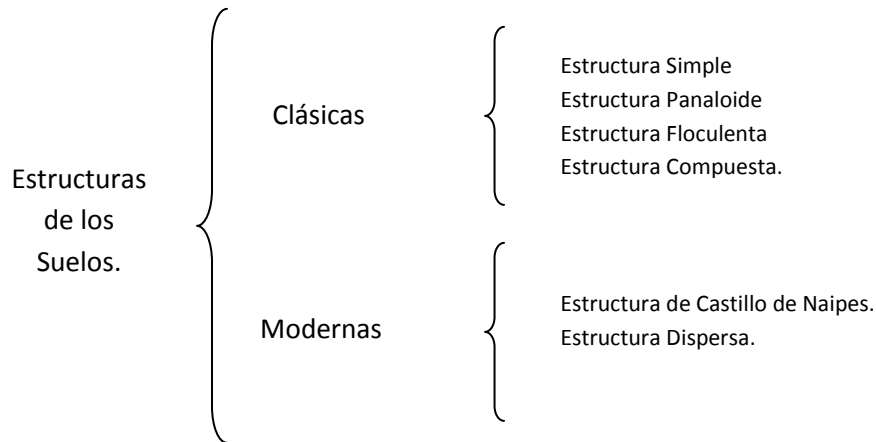
Fig. 3.3.8 Valores típicos de Límite Líquido y Límite Plástico.

3.4.- Estructura de los Suelos:

La estructura de los suelos es el acomodo en que se encuentran sus partículas sólidas. Los factores que intervienen en la estructura de los suelos son:

- El origen de las partículas sólidas.
- El agente de transporte y la forma en que se transportan o depositan.

Entre las estructuras más comunes que se pueden encontrar en los suelos están las siguientes:



3.4.1.- Estructuras Clásicas:

Estas estructuras reciben éste nombre ya que fueron las primeras que se establecieron de acuerdo a la disposición y acomodo que se encontró en las partículas sólidas del suelo; siendo estas partículas las que se mencionan a continuación:

- **Estructura Simple:** es típica de los suelos gruesos y de algunos limos, la tendencia de las partículas a unirse es casi nula y se acomodan en su posición más estable de su propio peso. Considerando un suelo grueso con partículas esféricas de un solo tamaño, se puede tener el siguiente acomodo (Fig. 3.4.1).

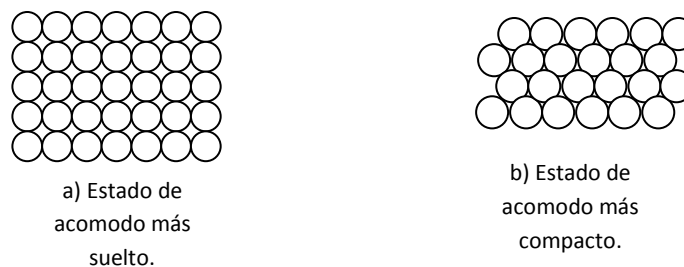


Fig. 3.4.1 Acomodo de una estructura simple.
Fuente: Juárez y Rico, 2005.

- **Estructura Panaloide:** esta estructura es típica de suelos con partículas menores de 2 micras y que se forman por sedimentación en el agua (Fig. 3.4.2) y algunas veces en el aire, por eso esta estructura se puede encontrar en suelos lacustres y en algunas ocasiones en suelos eólicos.

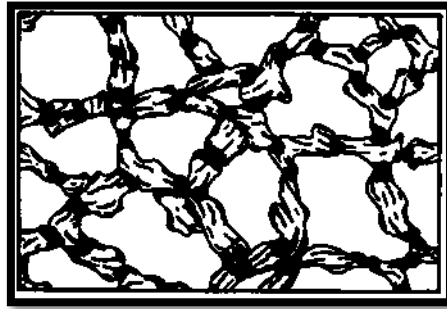


Fig. 3.4.2 Estructura Panaloide.
Fuente: Rico y Del Castillo, 1982.

Los suelos eólicos que tienen esta estructura constituyen lo que se conoce con el nombre de suelos colapsables, que son aquellos que pierden repentinamente su estructura por saturación, son más comprensibles que los suelos que tienen estructura simple y la relación de vacíos puede variar de 1 a 3.

- **Estructura Floculenta:** está formada por grumos de partículas sólidas y coloides (Fig. 3.4.3), es típica de los suelos lacustres ya que los grumos de esas partículas sólo se llegan a sedimentar cuando el agua está prácticamente en reposo. La relación de vacíos puede variar de 3 a 10, ésta estructura es muy compresible y tiene baja resistencia al esfuerzo cortante.

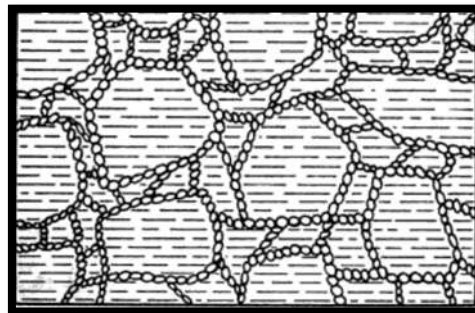


Fig. 3.4.2 Estructura Floculenta.
Fuente: Rico y Del Castillo, 1982.

- **Estructura Compuesta:** las tres estructuras anteriores rara vez se encuentran puras en la naturaleza, ya que el depósito y la sedimentación se presenta en partículas de todos los tamaños. Al combinarse, da lugar a lo que se conoce



como estructura compuesta (Fig. 3.4.3), que tiene una configuración o acomodo.

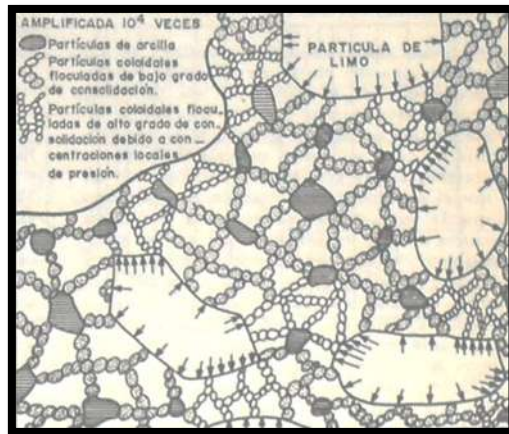


Fig. 3.4.3 Estructura Compuesta.
Fuente: Rico y Del Castillo, 1982.

3.4.2.- Estructuras Modernas:

Son estructuras que reciben este nombre debido a que fueron descubiertas posteriormente a las estructuras clásicas; se clasifican de la siguiente manera:

- **Estructura de Castillo de Naipes:** son las que se forman porque en las partículas de los suelos finos arcillosos se presenta una distribución de cargas eléctricas que permite que el borde de las partículas atraiga la superficie de otras (Fig. 3.4.4).

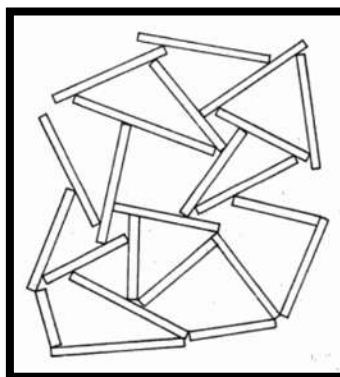


Fig. 3.4.4 Estructura de Castillo de Naipes.
Fuente: Rico y Del Castillo, 1982.



Como se observa en la figura anterior, la superficie de una partícula atrae el borde de otra, repitiéndose este acomodo o arreglo y así formando la estructura de castillo de naipes; aunque también se sabe que existe una fuerza de atracción entre los bordes y superficies de las partículas, por lo que da a esta estructura cierta consistencia y resistencia.

- **Estructura Dispersa:** es una estructura de naipes destruida, esto se debe a que si las partículas sólidas se sedimentan en el agua donde existan sustancias químicas que contrarresten las cargas eléctricas, las partículas sólidas tienden a apilarse (Fig. 3.4.5).

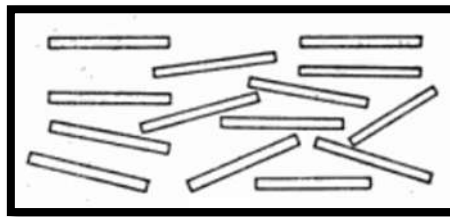


Fig. 3.4.5 Estructura Dispersa.
Fuente: Rico y Del Castillo, 1982.

Esta estructura en la arcilla da una resistencia muy baja al esfuerzo cortante y debe tenerse precaución en estructuras formadas por éstos suelos, sobre todo si van a estar en contacto con el agua, pues son susceptibles a presentar erosión y tubificación que provoquen la falla y colapso de los mismos.

3.5.- Estabilización de Suelos.

La estabilización de suelos es un proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que se puedan aprovechar sus mejores cualidades, para obtener una estructura de pavimento estable, que sea capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones climatológicas más severas. Se le considera como la corrección a una deficiencia del terreno, en donde se le da una mayor resistencia al mismo o bien, se disminuye su plasticidad.

Como se mencionó en la Introducción al inicio de éste trabajo, en la construcción de carreteras se han buscado alternativas de mejoras para los caminos, desde la elaboración del proyecto, estudio de los materiales para su construcción, maquinaria para ejecutarla, procedimiento constructivo, ejecución de la obra, término de ella y



mantenimiento necesario durante los años de servicio de la carretera. En la etapa previa a la ejecución de la obra se hace en laboratorio las pruebas a los materiales que se van a utilizar, arrojando si son apropiados o no para cumplir con los requisitos del proyecto y del cliente.

A medida que la población se incrementa y existe una mayor necesidad por construir nuevos caminos y carreteras, es necesario explotar más bancos para extraer los materiales que se utilizarán en la construcción de dichas obras, sin embargo, cada vez será más difícil tener acceso a este tipo de bancos si se desea crear menos daño al medio ambiente. Por esto y como una forma de utilizar la mayor parte de los materiales que se tienen a lo largo de los proyectos de caminos y carreteras (aunque no cumplan con especificaciones), existen en el mercado varios productos que prometen mejorar las propiedades de los materiales que se utilizan en la sección estructural.

De acuerdo con Rico (2005) cuando un material es de mala calidad hay necesidad de *“Modificar las propiedades del Material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos”*; ésta alternativa da lugar a las Técnicas de Estabilización de Suelos. Son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los Suelos, para hacerlos apropiados para algún uso específico. Éste mismo autor enlista tipos de procedimientos de estabilización:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido.
- Estabilización por drenaje.
- Estabilización por medios eléctricos, en donde la electroósmosis y los pilotes electro metálicos son aplicables en éste medio. (es el movimiento del líquido inducido por un potencial aplicado a través de un material poroso, el tubo capilar, la membrana, micro canal, o cualquier otro fluido del conducto).
- Estabilización por medios químicos, lograda por la adición de agentes estabilizantes como el cemento, cal, asfalto u otros.

Este último proceso es el desarrollado en éste trabajo, consiste en agregar al suelo sustancias que modifiquen su estructura original, provocando cambios en su composición molecular y una mejoría en las propiedades de los suelos.

Hay que tomar en cuenta que se debe tener en claro el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y



dinero que en ello haya de invertirse. Balanceando éstos factores se logrará obtener un correcto empleo de la estabilización de suelos, y se podrán satisfacer los aspectos a que da lugar, como son:

- Estabilidad Volumétrica.

Se refiere a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad, así que la estabilización ofrece una alternativa de tratamientos para éstos suelos. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión. Esto se logra por tratamientos químicos o térmicos.

La experiencia, orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas.

- Resistencia.

Será tratado más adelante, justo después del concepto de Durabilidad.

- Permeabilidad.

Ser un suelo permeable significa que el agua puede pasar a través de él, pero ello implica que se puedan formar efectos no gratos en el suelo, sobre todo si este último es expansivo, ya que si hay presencia de agua surgirán cambios volumétricos en el suelo y deformaciones en toda una estructura formada por este.

Lograr que un suelo sea impermeable es posible llevarse a cabo incluso mediante la compactación; para materiales arcillosos el uso de de floculantes (polifosfatos) reduce la permeabilidad.

Cabe mencionar que si bien son introducidas algunas sustancias en el suelo en forma de emulsión para reducir su permeabilidad, esto seguramente llevará a efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante. Lo que lleva a la siguiente conclusión citada por Rico (2005): *“En términos generales, y eliminando la estabilidad mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar*



bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia”.

- Compresibilidad.

Definitivamente la compactación es la que de antaño se conoce como una forma de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad, puede decirse que los métodos de estabilización mencionados con anterioridad tienen influencia en dicho concepto.

- Durabilidad.

Suele involucrarse en este concepto lo referente a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de ésta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. Estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados como una mala elección del agente estabilizador ó un error en su uso, como podría ser el caso en que se ignora la susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

RESISTENCIA: existen varios métodos de estabilización que son útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos, pero cabe decir que todos ellos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen importantes contenidos de materia orgánica, caracterizando la falta de resistencia en estos suelos. La tabla 3.5.1 da una idea de la influencia del contenido de materia orgánica en los efectos de estabilización de suelos.

El tipo de estabilización que se empleé tendrá como finalidad(entre muchas otras) incrementar la resistencia de los suelos, algunas de las formas de estabilización más utilizadas para lograr esto son:

- Compactación.
- Vibroflotación.
- Precarga.



- Drenaje.
- Estabilización Mecánica.
- Estabilización Química con cemento, cal o aditivos.

Tipo de Suelo	Profundidad. (m)	Contenido de Materia Orgánica (%)	Resistencia a la Compresión Simple a los 7 días. Especímenes compactados al 95% AASTHO estándar (kg/cm ²)		
			Sin Estabilizar	Con 10% de Cemento	Con 10% de Cal
Tierra Vegetal	0.45	2.65	3.80	15.50	1.90
Tierra Vegetal	1.60	0.22	3.80	36.00	47.00
Arcilla Orgánica	0.10	13.70	1.05	1.83	2.25
Arcilla Orgánica	0.60	2.50	6.30	20.00	1.83
Arcilla Orgánica	0.10	11.70	3.15	7.00	5.60
Arcilla Orgánica	0.45	2.00	5.00	20.00	16.20
Arcilla Orgánica	0.10	10.30	3.90	4.20	4.90
Arcilla Orgánica	0.80	2.40	5.00	41.00	26.80
Tierra Superficial	0.10	3.10	3.90	30.00	11.20
Tierra Superficial	0.45	1.10	5.00	42.00	22.50

Tabla 3.5.1 Efecto de la materia Orgánica en los Resultados de la Estabilización de algunos suelos.
Fuente: Rico y Del Castillo, 2005.

Como se puede ver, destaca la multiplicidad de objetivos que puede tener la estabilización de suelos; con cierta frecuencia esos objetivos podrán ser contradictorios, en el sentido de que la técnica de estabilización mejore uno y perjudique a otro; por ello, existen preferencias de uno u otro método no siempre bien fundadas.

Algunos métodos de estabilización van imponiéndose en forma general, como lo son los métodos de estabilización química con cemento, cal y asfalto; estos día a día aparecen cada vez con mayor frecuencia en las técnicas constructivas de las vías



terrestres en todo el mundo, especialmente en asuntos ligados con la tecnología de los pavimentos.

¿Cómo identificar la necesidad de estabilizar un suelo?, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es usado en todo el mundo, es un gran auxiliar para identificación de una amplia gama de suelos que existen en nuestro planeta; sin embargo, definitivamente no destaca algunas características de los suelos que tienen una importancia especial en los problemas de estabilización, como lo son la composición mineralógica, la permeabilidad, la influencia de condiciones locales (clima, vegetación) y la historia geológica, especialmente en suelos finos.

Es por lo anterior que se han desarrollado sistemas específicos de clasificación de suelos con vistas a su estabilización, como los que se muestran a continuación, que permiten reconocer la composición de los suelos que el ingeniero de vías terrestres encuentra en sus obras y que pueden servirle para complementar la información obtenida de una clasificación dentro del SUCS. En la Tabla 3.5.2 se muestra una lista de suelos finos, donde se señala los componentes mineralógicos que lo forman. La Tabla 3.5.3 proporciona algunas indicaciones en cuanto a posibilidades de estabilización de diferentes materiales comunes. Y en la Tabla 3.5.4 señala algunas indicaciones en torno a la respuesta típica de algunos minerales importantes a los diferentes métodos de estabilización.



Perfil Observado:	Componentes Mineralógicos posiblemente dominantes:
Arcillas jaspeadas, con coloraciones rojo, naranja o blanco.	Caolinitas.
Arcillas jaspeadas, con coloraciones amarillas, naranja o gris.	Montmorilonitas.
Arcillas negras o gris oscuro.	Montmorilonitas.
Arcillas café y café rojizas.	Ilitas con algo de montmorilonita.
Arcillas blancas o gris claro.	Caolinitas y bauxitas.
Cristales pequeños, fácilmente disgregables.	Yesos.
Nódulos suaves, diseminados y solubles en ácido.	Carbonatos.
Nódulos duros, café-rojizo.	Minerales de Hierro.
Agrietamiento intenso, ancho, profundo y espaciado (5 ó 6 cm o menos).	Ilitas ricas en calcio o montmorilonitas.
Igual que el anterior, pero con las grietas espaciadas 30 cm o más.	Ilitas.
Suelos disgregables, de textura abierta y con apreciable contenido de arcilla.	Generalmente carbonatos y caolín. Nunca montmorilonita y rara vez Ilita.
Suelos disgregables, de textura abierta, negros y con apreciable contenido de arcilla.	Suelos orgánicos. Turbas.
Suelos disgregables, de textura abierta, con bajo contenido de arcilla.	Carbonatos. Arenas y Limos.
Suelos de apariencia rugosa cuando presentan superficies expuestas al intemperismo.	Montmorilonita. Salinidad.
Horizontes delgados de suelos blancuzcos, a menos de 60 cm de la superficie.	Sobre los horizontes blancuzcos limos finos. Abajo, arcillas inestables. Probablemente pueden existir aguas suspendidas en los horizontes blancuzcos.

Tabla 3.5.2 Información cualitativa sobre composición mineralógica a partir de la observación del perfil de suelos.
Fuente: Rico y del Castillo, 2005.



Tipo de Suelo:	Problemas y Medios de Estabilización usuales:
Suelos arenosos.	Cuando la granulometría es uniforme puede convenir la estabilización con mezcla de otros suelos. Las arenas limpias pueden mejorar sus características con cemento o asfalto.
Suelos limosos con algo de arcilla.	En general, el único tratamiento económico al que son susceptibles es la compactación.
Suelos limosos con muy poca o ninguna arcilla.	No existen tratamientos económicos. Debe evitarse su uso en superficies expuestas, por los polvos que producen cuando se secan.
Suelos agrietados.	Responden a la estabilización con cal.
Suelos arcillosos no agrietados y de textura abierta.	Responden muy bien a la compactación.
Arcillas suaves.	Susceptibles a la estabilización con cal.

Tabla 3.5.3 Problemas Típicos y posibilidades de Estabilización de algunos Suelos comunes.
Fuente: Rico y del Castillo, 2005.

Mineral o Componente del Suelo Típico:	Estabilización Recomendable:	Finalidad:
Materia Orgánica	Estabilización Mecánica	Los demás métodos no son efectivos.
Arenas	Mezcla con materiales finos no plásticos	Para estabilidad mecánica.
	Cemento	Para incrementar la resistencia.
	Asfalto	Para adquirir cohesión.
Limos	No responden a los métodos de estabilización en uso.	-----
Alófanos	Cal o mezclas de cal y yeso.	Para incrementar la resistencia.
Caolín	Arena	Para estabilidad mecánica.
	Cemento	Para incrementar la resistencia a corto plazo.
	Cal	Para mejorar la trabajabilidad y adquirir resistencia a largo plazo.
Ilita	Cemento	Para incrementar resistencia corto plazo.
	Cal	Para mejorar la trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo.
Montmorilonita	Cal	Para mejorar la trabajabilidad y adquirir resistencia a corto plazo.
Clorita	Cemento	Aún no hay experiencia concluyente sobre los efectos de esta estabilización.

Tabla 3.5.4 Respuesta de algunos minerales a los diferentes métodos de estabilización.
Fuente: Rico y del Castillo (2005).



Viendo éstas tablas, proporcionan una idea de elegir y estudiar el tipo de estabilizador para usar en el suelo que se requiera. Ya se sabe que el fin de éste trabajo es estudiar la estabilización de una arcilla CH con cemento y un aditivo; por ello, a continuación se desarrollan los temas de estabilización de suelos con cal y cemento.

3.5.1.- Estabilización con Cal:

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

Para alcanzar la estabilidad debe incorporarse un aditivo al suelo, y uno de los métodos que más rápido está creciendo en estabilización de suelos involucra el uso de cal. Este aditivo es particularmente efectivo con suelos de asentamiento de arcilla y agregados, con los cuales reacciona tanto química como físicamente para producir materiales de calidad para la construcción de carreteras. De acuerdo con M. Das (2001), los tipos de cal comúnmente usados para la estabilización de grano fino son: Cal Hidratada de Alto Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Cal Viva Calcítica (CaO), Cal Dolomítica Monohidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2\text{MgO}$) y la Cal Viva Dolomítica.

- Cal Viva: Es el resultado de la calcinación de roza caliza, constituido en su mayor parte de Óxido de Calcio (CaO), capaz de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación. Junto con la cal hidratada, la cal viva es la más utilizada para la estabilización.
- Cal Hidráulica Hidratada: Producto cementante seco, hidratado, obtenido al calcinar calizas que contiene sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente, de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio (CaO) para permitir la hidratación y, al mismo tiempo, dejando suficientes silicatos de calcio (CaSiO_3) sin hidratar, con lo que resulta un polvo seco, que cumple con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones, destacándose la propiedad de fraguar y endurecer, aún bajo el agua.
- Cal Hidratada de Alto Calcio: Cal hidratada, producto de la calcinación de calizas, contaminadas con menos del (5%)cinco por ciento de carbonato de magnesio (MgCO_3).



- Cal Dolomítica: Cal obtenida de la calcinación de calizas que contiene del treinta y cinco (35%) al cuarenta y seis (46%) por ciento de carbonato de magnesio (MgCO_3).

La cantidad usada para la estabilización de la mayoría de los suelos varían usualmente entre 5 y 10%. Cuando se agrega cal a suelos arcillosos ocurren varias reacciones químicas, intercambio catiónico y floculación-aglomeración y éstas son también puzolánicas. En las reacciones de intercambio catiónico y de floculación-aglomeración, los cationes monovalentes generalmente asociados con arcillas son reemplazados por iones de calcio divalentes. La floculación y la aglomeración producen un cambio en la textura de los suelos arcillosos, las partículas de éstos tienden a juntarse y formar partículas mayores.

La reacción química de la cal con los suelos arcillosos tiene dos aspectos:

- Primero, que aglomera las partículas finas de arcilla en partículas gruesas desmenuzables (tamaños de arena y sedimentos, a través de un fenómeno llamado intercambio de base).
- Segundo, produce una definitiva “cementación” o acción de endurecimiento, en la cual la cal reacciona químicamente con la sílice disponible y alguna alúmina en el suelo, formando silicato de calcio y aluminatos.

Los productos de la reacción son permanentes y la resistencia impartida a la capa estabilizada ayuda a promover la durabilidad y a extender la vida útil del pavimento. En general, las reacciones de cal se facilitan en la mayoría de los suelos plásticos que contienen arcilla; el rango de índice de plasticidad de dichos suelos (IP) es de 10 a 50. La única excepción podría ser los suelos orgánicos, suelos con un IP menor a 10 no reaccionan fácilmente con la cal, si bien hay varias excepciones; en suelos con bajo IP es imperativo que al menos este presente el 15% del material menor a una malla No. 200. Para suelos no plásticos y bajos en IP, que no responden a la cal, se requiere un segundo aditivo puzolánico, para producir la necesaria reacción cal-sílice.

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

- El índice de plasticidad decae porque el límite líquido disminuye, y el límite plástico se incrementa.
- El suelo se aglomera, disminuyendo substancialmente el contenido de la mezcla del suelo (partículas menores a una malla No. 40).



- La cal y el agua aceleran la desintegración (rompimiento) de los nódulos de arcilla durante el mezclado. Como un resultado del punto anterior y este, el suelo se vuelve desmenuzable y puede trabajarse fácilmente.
- La cal ayuda al secado rápido de la tierra, acelerando así la compactación.
- La contracción y el grosor característico de los suelos arcillosos se reducen notablemente.
- Después del curado, la resistencia a la compresión no confinada se desarrolla considerablemente.
- Los valores de soporte-carga, medidos a través de varias pruebas (CBR, triaxial, placa de asiento o valor-K) aumentan.
- La resistencia a tensión y flexión, medida a través de diferentes pruebas (medición a la cohesión, tensión de cuarteadoras, etc.) aumenta notoriamente.
- La capa estabilizadora de cal forma una barrera resistente al agua, la cual impide su paso por gravedad de la parte de arriba, y de humedad capilar abajo. Por lo tanto esta capa se convierte en una firme mesa de trabajo, rechazando el agua de lluvia y manteniéndose estable, por lo que se reducen las demoras de la construcción.

La estabilización con cal no es el núcleo de investigación de ésta tesis, pero por la similitud a la acción que tiene el cemento como estabilizador, se mencionó anteriormente de forma rápida.

3.5.2.- Estabilización con Cemento:

El cemento es uno de los productos que generalmente se elige cuando se desea estabilizar materiales en la construcción de carreteras, y definitivamente material primordial en el ámbito de la construcción civil.

La palabra cemento se emplea para designar toda sustancia que posea condiciones de aglutinante cualquiera que sea su origen.

El cemento portland se define, como el producto obtenido al pulverizar el clínker con adición de yeso, para regular el tiempo de fraguado de la pasta de cemento. El clínker resulta de la calcinación de arcilla y materiales calcáreos hasta obtener de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos.



Los compuestos principales del cemento portland son: Cal (CaO), Sílice (SiO_2), Alúmina (Al_2O_3), Óxido de Hierro (Fe_2O_3). Como pocas veces se encuentran en la naturaleza juntos y en las proporciones requeridas para la fabricación del cemento, generalmente se hace necesario mezclar sustancias minerales que los contienen, como calizas por el aporte de cal y las arcillas por el aporte de alúmina y óxido de hierro. En algunas ocasiones es necesario agregar directamente óxido de hierro o arenas silíceas, para ajustar las proporciones de cada compuesto con el fin de obtener reacciones químicas equilibradas.

Generalmente, a los cementos disponibles en el mercado les adicionan otras sustancias en la etapa de la molienda del clínker, por razones económicas; esas sustancias pueden ser escorias puzolanas, calizas y humo de sílice. Cuando se les agregan escorias, se les llama Cemento Portland Siderúrgicos y cuando se les agregan puzolanas, se les llama Cemento Portland Puzolánico.

Las calizas son rocas de origen volcánico compuestas por carbonatos de calcio, formados por material de naturaleza inorgánica, que se encuentran en estado de gran pureza o mezclados con arcillas y minerales de hierro; las de origen químico se forman por precipitación de disoluciones bicarbonatadas o por reacción entre carbonatos de amónicos y sulfato de calcio.

Las Puzolanas son materiales naturales, artificiales o subproductos industriales silicios o silicoaluminosos, o una combinación de ambos, los cuales estando finamente molidos reaccionan en presencia de agua a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio y forman compuestos con propiedades cementantes. Proceden de productos de calcinación y de algunas de las arcillas como la montmorillonita y la caolinita. Dentro de éstos materiales se consideran las cenizas volátiles que se obtienen de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados ó por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión.

El yeso es un sulfato cálcico cristalizado, abundante en la naturaleza; se encuentra en la zona de antiguos lagos o mares interiores, como resultado de la sedimentación de sulfatos que se hallan disueltos en el agua.

Las escorias de alto horno es el material obtenido por la fusión de minerales de fierro, enfriado bruscamente con agua o vapor y aire. Éste subproducto no metálico está constituido esencialmente por silicatos, aluminosilicatos de calcio. Las escorias poseen propiedades aglomerantes como el cemento portland.

El humo de sílice es una puzolana muy fina constituida esencialmente por sílice amorfa, obtenida como un subproducto de la fabricación de silicio.



En base a la Norma N-CMT-2-02-001/02 “Calidad del Cemento Portland”, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, el cemento se clasifica de la siguiente manera:

A) Según su composición:

A.1.- Tipo CPO (Cemento Portland Ordinario):

Es el producido mediante la molienda del clínker Portland y sulfato de calcio. Cuando el proyecto no establezca el tipo de Cemento Portland por usar, se entenderá que se trata de cemento tipo CPO.

A.2.- Tipo CCP (Cemento Portland Pozolánico):

Resulta de la molienda conjunta del clínker Portland, puzolanas y sulfato de calcio.

A.3.- Tipo CPEG (Cemento Portland con Escoria graduada de Alto Horno):

Es producido mediante la molienda conjunta de clínker Portland, escoria graduada de alto horno y sulfato de calcio.

A.4.- Tipo CPC (Cemento Portland Compuesto):

Se obtiene de la molienda conjunta del clínker Portland, puzolanas, escoria de alto horno, caliza y sulfato de calcio. En éste tipo de cemento, la caliza puede ser el único componente adicional al clínker Portland con el sulfato de calcio.

A.5.- Tipo CPS (Cemento Portland con humo de sílice):

Resulta de la molienda conjunta del clínker Portland, humo de sílice y sulfato de calcio.

A.6.- Tipo CEG (Cemento con Escoria Granulada de alto horno):

El producto mediante la molienda conjunta del clínker Portland, sulfato de calcio y mayoritariamente escoria granulada de alto horno.

B) Según su resistencia a la compresión:

Según su resistencia mecánica a la compresión, los cementos Portland se clasifican de acuerdo a lo que la Tabla 3.5.5 indica.



Clase Resistente	Resistencia a la Compresión (kg/cm ²)		
	A 3 días. ⁽¹⁾	A 28 días. ⁽²⁾	
	mínimo	mínimo	máximo
20	-	204	408
30	-	306	510
30R	204	306	510
40	-	408	-
40R	306	408	-

(1) Corresponde a la Resistencia Inicial del cemento.

(2) Corresponde a la Resistencia Normal del cemento.

Tabla 3.5.5 Clases resistentes de los Cementos Pórtland. “Calidad del Cemento Pórtland”
Fuente: SCT, Norma N-CMT-2-02-001/02, 2002.

Para identificar un cemento Pórtland, la clase resistente se anotará inmediatamente después de la designación del tipo de cemento que se indica en inciso A) escrito anteriormente, por ejemplo:

- CPO 30, cuando se trate de un Cemento Pórtland Ordinario con una resistencia normal mínima de treinta megapascuales (306 kg/cm²).
- CPEG 40R, si se requiere un Cemento Pórtland con Escoria Granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima de 40 MPa (408 kg/cm²) y deba cumplir con una resistencia inicial mínima de 30 MPa (306 kg/cm²).

C) Según sus características especiales:

Los Cementos Pórtland pueden presentar una o más de las características especiales que se indican en la Tabla 3.5.6 a continuación:

Para identificar un Cemento Pórtland con una característica especial, la nomenclatura de ésta será anotada inmediatamente después de la designación del tipo de cemento que se indica en el inciso A) y de la clase resistente que se señala en el inciso B). De tener dos o más características especiales, sus nomenclaturas se anotan siguiendo el orden descendente de la tabla 3.5.6 separándolas con una diagonal, por ejemplo:



Característica Especial:	Nomenclatura:
Resistente a los Sulfatos.	RS
Baja Reactividad álcali-agregado.	BRA
Bajo calor de Hidratación.	BCH
Blanco.	B

Tabla 3.5.6 Características Especiales de los Cementos Pórtland. “Calidad del Cemento Pórtland”.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-2-02-001/02, 2002.

- CPO 30 RS, cuando se trate de un Cemento Pórtland Ordinario con una resistencia normal mínima de 30 MPa (306 kg/cm²) y que sea resistente a los sulfatos.
- CPEG 40R BRA/BCH, cuando se refiera a un Cemento Pórtland con Escoria Granulada de alto horno, que tenga una resistencia normal mínima de 40 MPa (408 kg/cm²), una resistencia inicial mínima de 30 MPa (306 kg/cm²), baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes indica que la composición de los diferentes tipos de cemento pórtland estará comprendido dentro de los límites que se indican en la Tabla 3.5.7.

El cemento necesita humedad para hidratar y curar (endurecer) y convertirse en un aglomerante dematerialescomo agregados, arena, etc. Cuando el unificador (cemento) se seca, deja de volverse más fuerte, en una mínima cantidad de agua puede secarse y no reaccionará completamente. Las propiedades de dicha pasta sería menor que los de una pasta húmeda. La reacción del agua con el cemento es extremadamente importante para que sus propiedades como unificador y reacciones puedan continuar por muchos años.

Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. La hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica.

Los minerales silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) y ferroaluminato tetracálcico (C4FA), en contacto con el agua reaccionan dando los siguientes productos hidratados: Los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados (CSH) e hidróxido de calcio (CH), el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico forman Aft (etringita) y Afm (monosulfato).



Cemento Pórtland		Clínker Pórtland+ Sulfato de Calcio	Componentes Principales				Componentes Minoritarios (2)
Tipo	Denominación		Puzolanas (1)	Escoria Granulada de Alto Horno	Humo de Sílice	Caliza	
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
CPP	Cemento PórtlandPuzolánico	50 - 94	6 - 50	-	-	-	0 - 5
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de alto horno	40 - 94	-	6 - 60	-	-	0 - 5
CPC (3)	Cemento Pórtland Compuesto	50 - 94	6 - 35	6 - 35	1 - 10	6 - 35	0 - 5
CPS	Cemento Pórtland con humo de Sílice	90 - 99	-	-	1 - 10	-	0 - 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto Horno	20 - 39	-	61 - 80	-	-	0 - 5

(1) Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales y cenizas volantes.

(2) Los componentes minoritarios pueden ser uno o más de los componentes principales, salvo que estén incluidos ya como tales en el cemento.

(3) El Cemento Pórtland Compuesto contendrá dos componentes principales como mínimo, excepto cuando se trate de caliza, la que puede ser el único componente principal.

Tabla 3.5.7 Composición de los Cementos Pórtland. “Calidad del Cemento Pórtland”, Norma N-CMT-2-02-001/02, Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
Fuente: SCT, Norma N-CMT-2-02-001/02, 2002.

Durante el proceso de hidratación, el agua puede encontrarse en diferentes estados :

- Agua químicamente ligada: es aquella que forma parte del sólido generado o sea la que se combina con el cemento para producir una nueva fase.
- Agua físicamente ligada: es aquella que se encuentra adsorbida a la superficie de la partícula de gel y ocupa los poros del gel.
- Agua libre: resto de agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

Microestructura durante el proceso de hidratación:

Se presenta a continuación una descripción esquemática del proceso de formación de la estructura de una pasta cementicia (Fig.3.5.8):

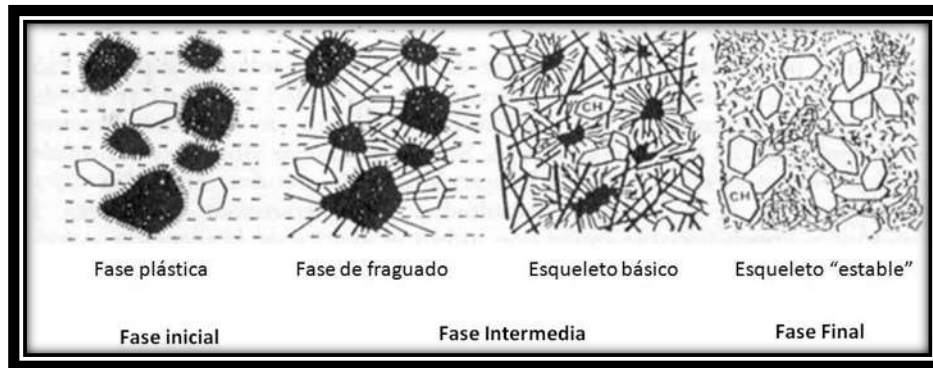


Fig.3.5.8 Fases del Proceso de Hidratación.
Fuente: Bravo y Cornejo, 2011.

Fase inicial: A los 10 minutos de mezclados el cemento con el agua ya puede observarse, con la ayuda de un microscopio electrónico, la aparición de geles alrededor de los granos de cemento no hidratado, junto con pequeñas láminas delgadas de silicato de calcio hidratado (CSH). Aproximadamente a la hora, el gel adquiere un espesor de 1 mm y bastoncillos cortos de Aft se nuclean en la superficie del mismo. En este momento de la reacción todavía no existen fuerzas que ligen las partículas unas con otras.

Fase intermedia: Esta fase se caracteriza por la hidratación del 30-40% del silicato tricálcico (C3S) y por el comienzo de la fase de endurecimiento de la pasta. Entre las 3-5 hs. se puede verificar la aparición de una cierta cohesión en la pasta. Los productos que se forman fuera de la frontera original del grano se denominan productos externos, mientras que los que se forman dentro de la misma son los denominados productos internos. Durante las 5-10 hs., la reacción del silicato tricálcico (C3S) genera productos externos de silicatos cálcicos hidratados que forman una cubierta sobre la red de bastoncillo de Aft que se ha generado.

Fase final: A las 24 hs. de comenzada la reacción, el C3S sigue reaccionando y generando productos internos. A medida que los granos completamente hidratados se van superponiendo entre sí, la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta aumentan. En esta fase la mayoría de los granos pequeños del cemento ya han hidratado completamente. Después de 2 días el espacio ocupado originalmente por el agua, es ocupado por los productos de la hidratación. Los productos externos se vuelven fibrosos y mas densos. En esta etapa se encuentran fibras de silicato de calcio hidratado (CSH) de 1 mm de longitud con un diámetro de 0.01 mm.; también se encuentran partículas de estas en forma de láminas con tamaños del mismo orden de magnitud. El esqueleto básico se forma entre los 7 y los 28 días.



De forma breve puede describirse las fases de la hidratación del cemento como sigue:

- Fase de suspensión: Granos de sólido aislados dentro de una fase líquida.
- Fase de fraguado: Los hidratos establecen conexiones mecánicas entre los granos de cemento apareciendo un esqueleto sólido y una red capilar.
- Fase de endurecimiento: Se caracteriza por el llenado de los espacios capilares por la masa sólida de hidratos.

En la Microestructura del cemento hidratado, se identifican poros capilares e intersticiales:

Los Poros Capilares representan todo aquel volumen que no ha sido llenado por los productos de la hidratación y que se reduce a medida que avanza la reacción. La porosidad capilar de la pasta de cemento depende de la relación agua/cemento (a/c) y del grado de hidratación conseguido. Según Bravo (2011), en relaciones agua/cemento mayores que 0.38, el volumen de gel no es suficiente para llenar todo el espacio disponible, por lo que quedarán espacios capilares una vez finalizada la reacción. Los poros capilares forman una red interconectada que es responsable de la permeabilidad de la pasta de cemento endurecida y de su vulnerabilidad al congelamiento.

Los Poros Intersticiales son espacios interconectados entre las partículas de gel (hidratos de los diferentes componentes). Estos poros son mucho más pequeños que los poros capilares y pueden contener gran cantidad de agua evaporable. Ocupan aproximadamente un 28% del volumen total de gel, independientemente de la relación a/c y del grado de avance de la reacción.

En la Figura 3.5.9 se muestra un esquema simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada. Los puntos negros representan las partículas de gel, los espacios intersticiales constituyen la porosidad propia del gel, los espacios marcados con “C” son los espacios o poros capilares.

Los primeros estudios realizados sobre las características mecánicas del hormigón relacionaban la resistencia de una pasta de cemento con su relación agua/cemento. En la actualidad se sabe que la resistencia de una pasta es función de la microestructura que se desarrolla durante el proceso de hidratación. La resistencia de una mezcla con una determinada relación agua/cemento depende del grado de hidratación, de las características químicas y físicas del cemento, de la temperatura a la que se hidrata, etc.; es por esta razón que se considera necesario relacionar el



desarrollo o evolución de lamicroestructura de la pasta de cemento con sus propiedades mecánicas, y en particular con su resistencia a la compresión.

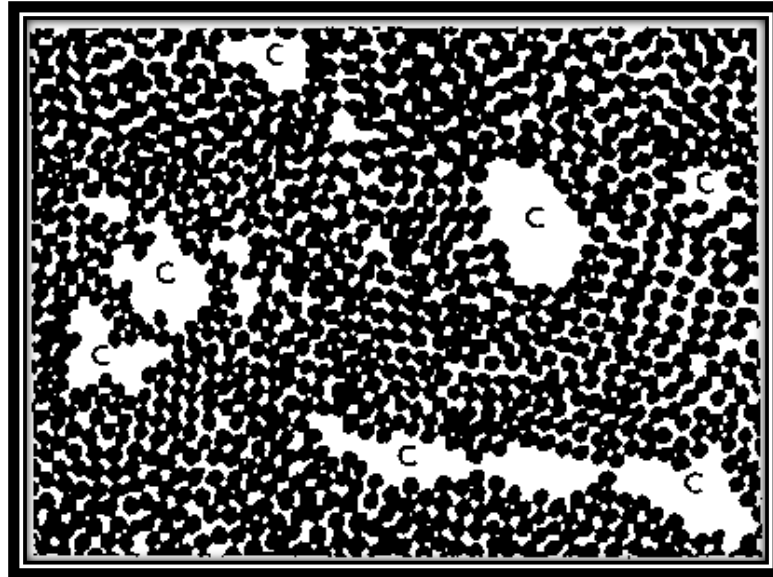


Fig. 3.5.9 Modelo de la Estructura de la Pasta de Cemento Hidratada, donde se observa la presencia de los poros capilares(partículas de gel), los poros intersticiales y poros capilares.
Fuente: Bravo y Cornejo 2011.

Hasta aquí se ha hablado del cemento en forma individual, pero ahora es necesario hablar respecto al nombre que lleva éste capítulo, “Estabilización de Suelos con Cemento”, y en particular basarnos a la estabilización de arcillas.

El proceso que se logra con un suelo fino y cemento consiste en la formación de hidrato de calcio que se forma como consecuencia del contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio, muy ávidos de agua, que la toman de la que existe entre las laminillas de arcilla; el resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y la plasticidad del suelo arcilloso, así como el aumento en su resistencia y su durabilidad.

Cuando hay presencia de materia orgánica en el suelo se presenta una acción desfavorable en la estabilización con cemento, pues los ácidos orgánicos poseen una gran atracción por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en la estabilización de las partículas laminares en las arcillas (Rico y Del Castillo, 2005). Dificulta también la estabilización cuando hay presencia en el suelo de sulfatos de calcio y de magnesio (entre otras sustancias) pues son ávidas al agua y privan a los



aglomerantes de la humedad necesaria para su función. Para ayudar a contrarrestar los efectos de materia orgánica es recomendable usar cementos de alta resistencia.

El efecto del cemento en los suelos arcillosos genera un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos hidratados de calcio, hidróxido de calcio e iones de Calcio, que elevan la concentración de electrolitos del agua intersticial, aumentando su pH. El efecto secundario producido a continuación es conformado en dos fases. La primera, se produce un intercambio iónico entre los iones de calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, todo lo cual tiende a flocular a la propia arcilla. En la segunda fase, tienen lugar reacciones químicas puzolánicas entre la cal y los elementos que componen los cristales de arcilla. Los elementos silícicos y aluminicos reaccionan con los compuestos cálcicos para formar elementos cementantes; el resultado final de esta reacción es la transformación de una estructura arcillosa originalmente floculada y vaporosa, en un agregado resistente; el hidróxido de calcio que se va consumiendo puede reponerse por la cal que se libera durante el proceso primario de hidratación del cemento.

Las partículas de cemento generalmente tienen tamaños comprendidos entre 0.5 y 100 micras. La hidratación de las partículas más grandes probablemente no llega a producirse nunca y las partículas de 10 micras pueden ya tardar meses en hidratarse, por lo que, desde éste punto de vista, convendrá la utilización de cementos finos, que en añadidura producen resistencias más altas; naturalmente, los cementos finos son más caros, por lo que la elección viene a quedar sujeta a un balance económico. En algunas técnicas se reemplazan las partículas más gruesas de los cementos ordinarios por un relleno inerte, con lo que se reducen los consumos de agua y evitan las altas temperaturas de hidratación y el agrietamiento. Sin embargo, la inmensa mayoría de las estabilizaciones con cemento se hacen con los tipos de portland ordinarios.

Cuando se lleva a cabo uso de cemento como material estabilizante, la propiedad que se estudia generalmente es la resistencia a la compresión, ya que en muchos casos se especifica que una vez que el material es compactado en campo y después de un cierto número de días, éste debe alcanzar un valor de resistencia especificado; sin embargo, es necesario que las propiedades que se estudien en laboratorio estén relacionadas con los fenómenos a los que va a estar expuesta la estructura una vez que esté en funcionamiento.

Según M. Das (2001) al igual que en el caso de la cal, el cemento ayuda a disminuir el Límite Líquido y a incrementar el Índice Plástico y la manejabilidad de los suelos arcillosos, y para estos suelos la estabilización con cemento es efectiva cuando el Límite Líquido es menor que 45-50 y el índice Plástico es menor que 25. Los



requisitos óptimos del cemento por volumen para la estabilización efectiva de varios tipos de suelos están indicados en base a éste autor en la Tabla 3.5.10 que se presenta a continuación.

Tipo de Suelo		Porcentaje de Cemento por Volumen
Clasificación AASHTO	Clasificación Unificada	
A-2 y A-3	GP, SP y SW	6 - 10
A4 y A5	CL, ML y MH	8 - 12
A6 y A7	CL, CH	10 - 14

Tabla 3.5.10 Cemento requerido por volumen para Estabilización efectiva de varios suelos.
Fuente: M. Das, Braja, 2001.

El cemento, al igual que la cal, ayuda a incrementar la resistencia de los suelos. La Tabla 3.5.11 presenta algunos valores típicos de la Resistencia a Compresión No Confinada de varios tipos de suelos no tratados y mezclas suelo-cemento hechas con aproximadamente 10% de cemento por peso.

Material	Rango de la Resistencia a Compresión	
	(lb/plg ²)	(kN/m ²)
Suelo No Tratado:		
Arcilla, turba.	< 50	< 350
Arcilla arenosa bien compactada.	10 - 40	70 - 280
Grava, arena y mezclas arcillosas, bien compactadas.	40 - 100	280 - 700
Suelo-Cemento (10% de cemento en peso):		
Arcilla, suelos orgánicos.	< 50	< 350
Limos, arcillas limosas, arenas muy mal graduadas, suelos ligeramente orgánicos.	50 - 150	350 - 1050
Arcillas limosas, arcillas arenosas, arenas muy mal graduadas y gravas.	100 - 250	700 - 1730
Arenas limosas, arcillas arenosas, arenas y gravas.	250 - 500	1730 - 3460
Mezclas de arena-arcilla o grava-arena-arcilla bien graduadas y arenas y gravas.	500 - 1500	3460 - 10,350

Tabla 3.5.11 Resistencias típicas a Compresión de Suelos y mezclas Suelo-Cemento.
Fuente: M. Das, Braja, 2001.



En cambio, Alfonso Rico Rodríguez en su libro *“La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres”*, 1ª Edición, también da propuestas de porcentaje de cemento para el inicio de la elaboración de los especímenes de acuerdo al tipo de suelo que se pretenda estabilizar (Tabla 3.5.12).

Suelo:	Porcentaje de Cemento, en peso, usualmente requerido por la capa terminada.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de compactación.	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de durabilidad.
GW, GP, GM y SW.	3-8	5-6	3-7
SC, GC	5-9	7	5-9
SP, SM	7-11	9	7-11
ML	7-12	10	8-12
CL, OL, MH	8-13	10	8-12
CH	9-15	12	10-14
OH, Pt	10-16	13	11-15

Tabla 3.5.12 Porcentaje de cemento a utilizar inicialmente en los diferentes tipos de suelo.
Fuente: Rico, Alfonso 2005.

También presenta un resumen de las propiedades que se piden usualmente en la tecnología de las vías terrestres a las mezclas de suelo-cemento, es meramente una recomendación tentativa de experiencia para orientar sus estudios de laboratorio y capacidad de elección (Tabla 3.5.13).

Tipo de Capa:	Resistencia a la compresión Simple (kg/cm²) (Tras 7 días de curado a humedad constante)
Sub-bases. Material de relleno para trincheras.	3.5 - 10.5
Sub-bases o base para tránsito muy ligero.	7 - 14
Bases para tráfico intenso.	14 - 56
Protecciones de terraplenes contra erosión y acción de agua.	> 56

Tabla 3.5.13 Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo-cemento.
Fuente: Rico, Alfonso 2005.



Pérez, Garnica, Rangel y Aguado (2011), realizaron pruebas del comportamiento de una arcilla estabilizada con cemento. Entre los estudios hechos está la prueba de compresión, realizada a una arcilla CH (clasificación del suelo objeto de estudio en éste trabajo de tesis), donde obtuvieron la siguiente gráfica (Figura 3.5.14).

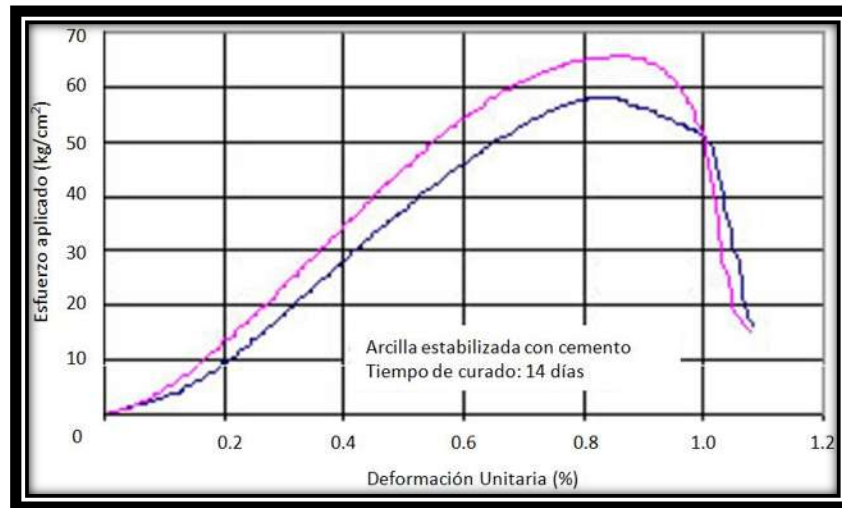


Fig. 3.5.14 Gráfica Esfuerzo-Deformación ensayadas a compresión simple. “Comportamiento de una Arcilla Estabilizada con Cemento”, Fuente: Pérez, Garnica, Rangel y Aguado, (2011).

El proporcionamiento de las mezclas de suelo-cemento viene a ser al fin de cuentas la cuestión fundamental, pues es el cemento, el elemento más costoso y fijar su proporción, determina la factibilidad técnica de la estabilización, aparte de que las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee.

El comparativo de los resultados obtenidos en la Prueba de Compresión Simple que se elaboraron para el desarrollo e investigación de éste trabajo se plasmarán en el capítulo de análisis de resultados; hasta ahí se observará qué tan cercanos son los valores que los autores antes mencionados plasman en sus libros con los que realmente se usaron en la elaboración de los especímenes objeto de estudio en esta investigación.

Aparte del uso de cal y cemento para estabilizar, investigadores de varios países siguen buscando alternativas para la mejora de las propiedades de suelos en la construcción de carreteras, entre ellos Holanda, quienes han creado un producto mejorador del cemento utilizado en la estabilización de suelos, para ayudar a tener una mayor cohesión y en conjunto se logre una resistencia alta a si sólo se hubiera mezclado agua + suelo + cemento.



En el diseño de carreteras y construcción tradicional, se han visto situaciones donde la capacidad de soporte de carga de suelos son bajos u otras condiciones geotécnicas a lo largo del camino no son convenientes. Como resultado, hay diseños de capas múltiples y estructuras basadas en la obtención de suelos de material aceptable, excediendo en ocasiones 100 cm de grosor, haciendo crecer con esto los costos de construcción; sumemos además el transporte, medio ambiente y otros conceptos que continúan en incremento debido a las distancias cada vez más largas en donde tienen que adquirirse los materiales; así mismo al incrementarse los costos de energía por excavación, transporte (por decir algunas), etc., se incrementarán los costos para el usuario final.

Es necesario que se asegure el depender menos en el importe de material y que se necesite menos éstas grandes cantidades a entregarse por los requerimientos referentes al desempeño de la construcción de carreteras.

La Empresa Holandesa asegura que con RoadCem, el diseño y construcción de carreteras permite el uso de material in situ (cualquier tipo de suelo), ésto da como resultado la reducción del grosor requerido de la estructura del camino y un diseño general a todo lo largo de éste, lo cual también contribuye a solucionar el costo de la obra, y con ello los costos para el usuario.

Veamos en el siguiente capítulo en qué consiste éste producto, de qué está conformado, qué características tiene, cómo actúan con el cemento y qué mejoras da al suelo al combinarlos.

3.6.- RoadCem.

RoadCem es un aditivo mejorador para el cemento utilizado en la estabilización de suelo y otros materiales típicos para construcción de carreteras, que hace posible aglutinar todos los materiales in-situ, incluso fango u otros materiales de desperdicio (PowerCem Technologies, 2008).

Los principales beneficios son:

- Menores costos de construcción.
- Menores costos de mantenimiento.
- Carreteras más durables.
- Se puede utilizar material in situ.
- Periodo más corto de construcción.



- Mayor durabilidad.
- Capaz de inmovilizar hasta fango altamente contaminado que puede ser utilizado como material de construcción.

RoadCem (Fig. 3.6.1) es un material que se utiliza en conjunto con cemento y/o ceniza volcánica como un aglutinante modificador y mejorador permitiendo el uso de un completo rango de concreto, materiales vírgenes y secundarios en la construcción de carreteras.



Fig. 3.6.1 RoadCem.
Fuente: De la Roij, 2008.

Los diseñadores de estructuras carreteras tradicionales están familiarizados con las propiedades de los materiales y métodos de construcción, así como con materiales secundarios como granulados mezclados, concreto granulado, ceniza, asfalto granulado, etc. Y materiales como grava, arena, arcilla, turba. Estos diseñadores están también familiarizados en ocasiones con propiedades de diferentes tipos como fango, y otros desechos y materiales contaminados. La aproximación tradicional ha eliminado/limitado el uso de éste último grupo de materiales y tiene como pre-requisito requerido el que únicamente ciertos materiales y en ciertas proporciones puedan ser usados en el diseño y construcción de carreteras.

El uso de RoadCem cambia tanto una situación como materiales, los cuales en una aproximación tradicional tuviese un valor que necesitase ser removido y/o dispuesto a un costo significativo. Ahora repentinamente estos materiales tienen un valor positivo. Estos materiales pueden ser utilizados en la construcción de carreteras y a



veces están disponibles sin ningún costo o bien a un costo que es una fracción de los materiales tradicionales. Al mismo tiempo, estos materiales no tradicionales alcanzan los mismos requerimientos de desempeño como resistencia a la deformación y fractura en un grosor más bajo que el grosor de la capa utilizada en el pasado.

La construcción está puramente basado en parámetros económicos y realizada con RoadCem afirma la empresa patente, en ocasiones resulta en un 30% a 70% de reducción de costos de la construcción de una carretera. Otros factores como la reducción de la huella ambiental /ecológica hacen que la ventaja sea mucho más importante.

RoadCem mejora e incrementa la fuerza y flexibilidad de capas de una carretera estabilizada y mejora el desempeño total de los materiales conformados de cemento utilizados en la construcción de carreteras. Modifica y extiende la química del proceso de hidratación del cemento y extiende el proceso de cristalización formando agujas largas de estructura cristalina. Es posible retrasar o acelerar el proceso de hidratación del cemento y así entonces puede ser utilizado como una herramienta para diseñar a la medida las mezclas para el desempeño requerido. Cualquier tipo de material que pueda ser unido con RoadCem y fortalezca la construcción, puede ser utilizado en la pavimentación de una carretera. Esto elimina la necesidad de importar y exportar material, y de esta manera reducir significativamente el costo de construcción carretera y como consecuencia, el impacto ambiental.

En la siguiente figura (Fig. 3.6.2) se observan las formas de distintas partículas que contiene el estabilizador, obtenidas mediante Microscopio de Barrido del Centro de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Los resultados nos arrojan que el producto está compuesto de Cloro, Magnesio, Calcio en su mayoría, y en cantidades pequeñas están Potasio, Aluminio y Silicio.

Es un producto que siempre es utilizado en combinación con cemento y/u otros materiales puzolánicos. A manera de entender cómo trabaja RoadCem, tenemos que explicar brevemente cómo actúan el cemento en los materiales puzolánicos como materiales unificadores.

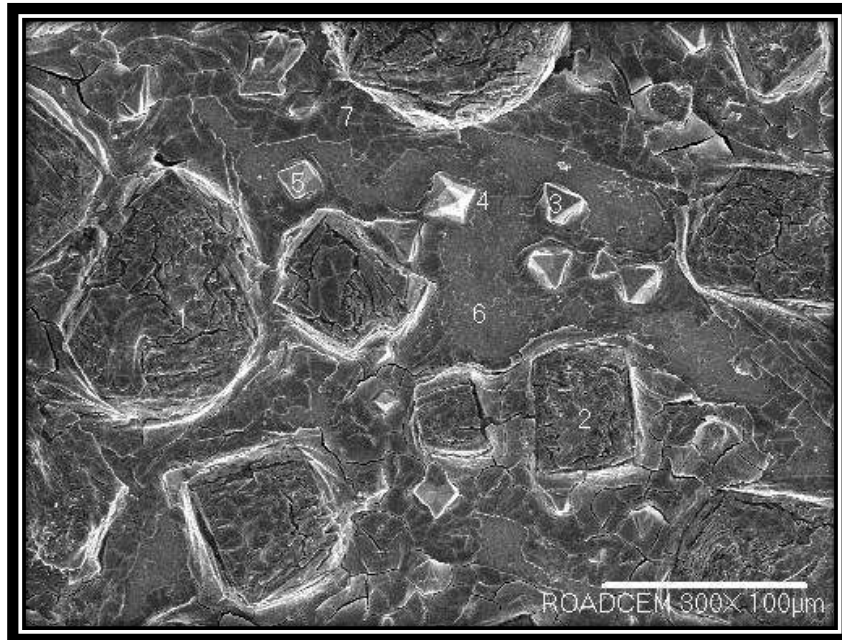


Fig. 3.6.2 Micrografías del RoadCem.

Fuente: Propia con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la UMSNH.

3.6.1.- Cemento Portland con RoadCem como Aditivo.

Menciona De la Roij (2008) que cuando se utilice RoadCem como aditivo, la humedad es muy necesaria para la hidratación y el endurecimiento; el grado en el cual ocurre la hidratación más importante y la relativa distribución de productos de hidratación cambian como resultado del hecho que se agregue RoadCem. En conclusión, la cristalización del hidróxido de calcio acontece a diferentes niveles y la reducción de la generación de calor ocurre partiendo de las reacciones de hidratación.

Al agregarse RoadCem, la cantidad de agua atrapada como agua libre se reduce y cristales crecen ocupando los espacios vacíos. Esto hace al producto menos permeable al agua y más resistente a todo tipo de ataque. Una fracción más grande de agua es convertida en agua cristalina; la reducida porosidad y la incrementada matriz de estructura cristalina aumenta la compresión, fuerza de flexión y disminuye el rompimiento del producto.



El calor generado durante la hidratación es reducido especialmente en las fases III y IV en la figura 3.6.3 que indican que algunas de las reacciones de la fase III y IV pudiesen o no estar ocurriendo.

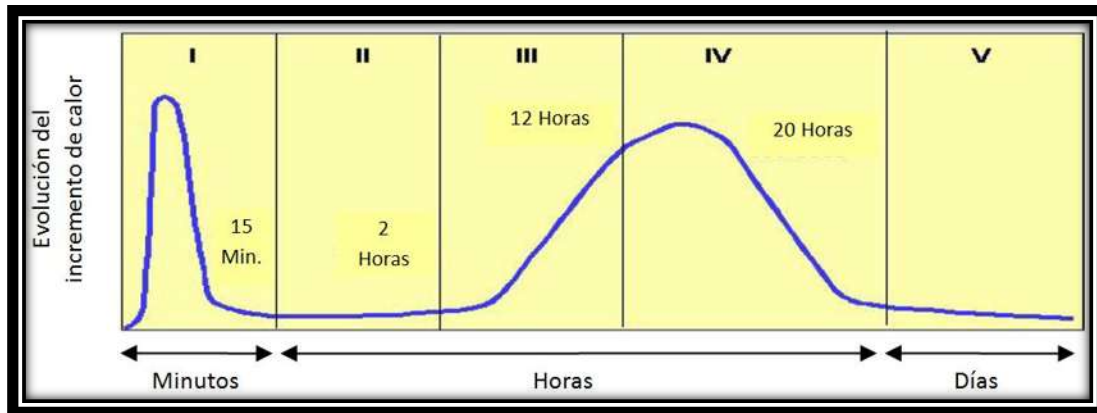


Fig. 3.6.3 Evolución del Calor durante la Hidratación del Cemento Portland.
Fuente: De la Roij, 2008.

El espacio vacío (porosidad) es en éste proceso aún determinado por el agua alrededor del cemento, dichos vacíos se llenarán por el resultado del proceso de cristalización; dicho proceso cambia significativamente cuando se usa RoadCem, el mecanismo de unión cambia de “pegar” a “envolver”.

El efecto de “envoltura” asociado con los productos cristalinos de las reacciones de hidratación, las cuales continúan con el tiempo, son en efecto también responsables de la habilidad del cemento modificado con RoadCem para unir incluso arcillas; ésto también es aplicable para la unión de otros materiales comúnmente muy difícil de unir como el fango y diferentes flujos de desecho. Con sólo cemento en sí, ésto no puede hacerse satisfactoriamente.

Para explicar la característica del encapsulamiento que se forma, ejemplifiquemos con un vaso de cristal con gran contenido de plomo, cuando dicho vaso es usado o cuando un vidrio se rompe, no se libera el plomo porque las partículas de plomo están encerradas en una estructura cristalina, éstas están “envueltas” en fibras de cristal. A manera similar, RoadCem es capaz de encapsular sustancias peligrosas y tóxicas y mantener esas sustancias contaminadas fuera del medio ambiente así como prevenir su liberación. La “envoltura” y encapsulamiento de sustancias contaminantes dentro de una estructura cristalina (que es un producto de reacciones de hidratación de cemento mejorado con RoadCem) crea un material fuerte y estable, el cual tiene cualidades estructurales que son deseables en la construcción carretera, por ejemplo: gran fuerza de compresión, gran fuerza de flexión y gran resistencia al rompimiento. Además, se logra una mayor distribución de la carga que



ejercen las ruedas de los vehículos hacia las capas de material estabilizadas *in situ* con cemento y Roadcem (Fig. 3.6.4).

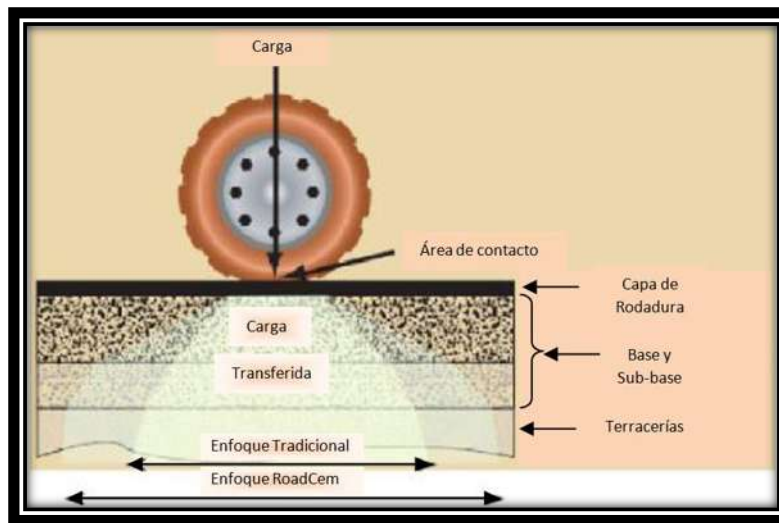


Fig. 3.6.4 Efecto de la distribución de la carga que ejerce las ruedas de un vehículo, a través de la modificación de material *in situ* estabilizado con cemento y RoadCem.

Fuente: De la Roij, 2008.

3.6.2.- Especificación de la Mezcla Estabilizada con Roadcem.

Entre las principales propiedades de un suelo que pueden interesar a un Ingeniero podemos contar las siguientes:

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

Ésto se busca al usar éste producto para estabilizar, y el usarlo es una función de muchos parámetros específicos, siendo éstos los siguientes:

- Características del material *in situ*.
- Condiciones geotécnicas a lo largo de la carretera a construir.
- Tipo de cemento.
- Carga de Tráfico, Intensidad y Crecimiento.
- Durabilidad requerida de la carretera.
- Especificaciones de mantenimiento.



Esto requiere que cada caso específico tiene que ser considerado por separado a manera de preparar un diseño óptimo y una solución a la medida más económica. Para hacer esto, se requiere que las muestras de laboratorio estén preparadas y probadas antes de que se especifique el diseño final.

Las especificaciones de mezcla del Manual de RoadCem han sido preparadas teniendo en cuenta la situación anterior y para proveer suficientes elementos para el diseño. El manual puede ser utilizado en una etapa temprana del proyecto cuando sean considerados diferentes diseños alternativos y cuando sea necesario hacer una selección apropiada de éstos.

Se inicia el diseño con el S. U. C. S., cada uno de los grupos de suelo dentro de éste Sistema la dosis de Cemento y Roadcem está definido, siendo punto inicial para un análisis más detallado en las etapas posteriores del proceso de diseño. (Tabla 3.6.5). En principio, se aplicarán las siguientes reglas:

- Mientras más bruto sea el material, más baja será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más fino sea el material, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más alta sea la fracción orgánica en el suelo, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más altos sean los contenidos de Légamo en el suelo, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más altos sean los contenidos de arcilla en el suelo, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.

Otro factor que influye en la dosis de Cemento y Roadcem es la intensidad de Tráfico y la carga máxima esperada en la carretera durante el diseño de tiempo de vida de ésta. Esto está relacionado a la fatiga del material estabilizado después del tratamiento. Por ello, se aplicarán las siguientes reglas:

- Mientras más largo sea el diseño de vida, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más alta sea la carga de ruedas esperada, más alta será la dosis de cemento y Roadcem.
- Mientras más alta sea la intensidad de Tráfico esperada, más alta será la dosis de Roadcem.



Tipo de suelo	Descripción del suelo	Cantidad indicativa de RoadCem en kg/m ³ sobre MPD, basada en los requisitos impuestos en el sector de la ingeniería civil e hidráulica.	Cantidad indicativa de cemento en kg/m ³ sobre MPD, basada en los requisitos impuestos sobre la base de los requisitos impuestos en el sector de la ingeniería civil e hidráulica
GW	Gravas limpias y bien graduadas	1.7	170
GP	Gravas limpias, pobremente graduadas	1.7	170
GW-GM	Gravas bien graduadas con limos	1.8	180
GW-GC	Gravas bien graduadas con arcillas	2.0	200
GP-GM	Gravas pobremente graduadas con limos	1.8	180
GP-GC	Gravas pobremente graduadas con arcillas	2.0	200
GM	Gravas Limosas	1.8	180
GC	Gravas Arcillosas	2.0	200
GC-GM	Gravas Arcillosas y Limosas	2.0	200
SW	Arenas limpias y bien graduadas	1.9	190
SP	Arenas limpias y pobremente graduadas	1.9	190
SW-SM	Arenas bien graduadas con limos	1.8	180
SW-SC	Arenas bien graduadas con arcillas	2.0	200
SP-SM	Arenas pobremente graduadas con limos	1.8	180
SP-SC	Arenas pobremente graduadas con arcillas	2.0	200
SM	Arenas Limosas	2.0	200
SC	Arenas Arcillosas	2.0	200
ML	Limos inorgánicos con arenas finas	2.0	200
CL	Arcillas inorgánicas con baja plasticidad (arcilla magra)	2.0	200
OL	Limos orgánicos con baja plasticidad	2.1	210
MH	Limos inorgánicos con alta plasticidad (limo elástico)	2.1	210
CH	Arcillas inorgánicas con alta plasticidad (arcilla grasa)	2.2	220
OH	Arcillas orgánicas con alta plasticidad (limo orgánico)	2.2	220
PT	Turbas y suelos con alto contenido orgánico.	2.4	240

Tabla 3.6.5 Tabla de dosificación de Cemento y Roadcem de acuerdo al tipo de suelo conforme al S. U. C. S.
Fuente: De la Roij, 2008.

El aspecto final a considerar es el grosor de la estructura de pavimento. Aquí también se aplican algunas reglas generales, pero este factor esta de igual manera bajo la influencia del tiempo de vida esperado o el diseño de tiempo de vida de la carretera sin ningún o un mínimo de mantenimiento.

Las reglas generales son:

- Mientras más alta sea la carga de ruedas, más gruesa es la capa de la estructura de pavimento.
- Mientras más alta sea la intensidad de tráfico, más gruesa es la estructura de pavimento.
- Mientras más largo sea el diseño de vida del pavimento, más gruesa es la estructura depavimento.



Es necesario preparar más de una mezcla con distintas dosis de Cemento y Roadcem para encontrar la dosificación óptima para una aplicación en particular, basándose en el Diseño que se muestra en el siguiente diagrama(Fig. 3.6.6); éstas muestras preparadas serán probadas a compresión simple a los 7, 14 y 28 días.

Éste proceso es iterativo y se requerirá de algunas cuantas iteraciones antes de que se obtenga un diseño óptimo. Deberá enseguida analizarse y tomar muy en cuenta el costo por el Cemento y Roadcem que se utilizará en la dosificación que mejores características mecánicas haya arrojado. Siempre tomando en cuenta los requerimientos del cliente.

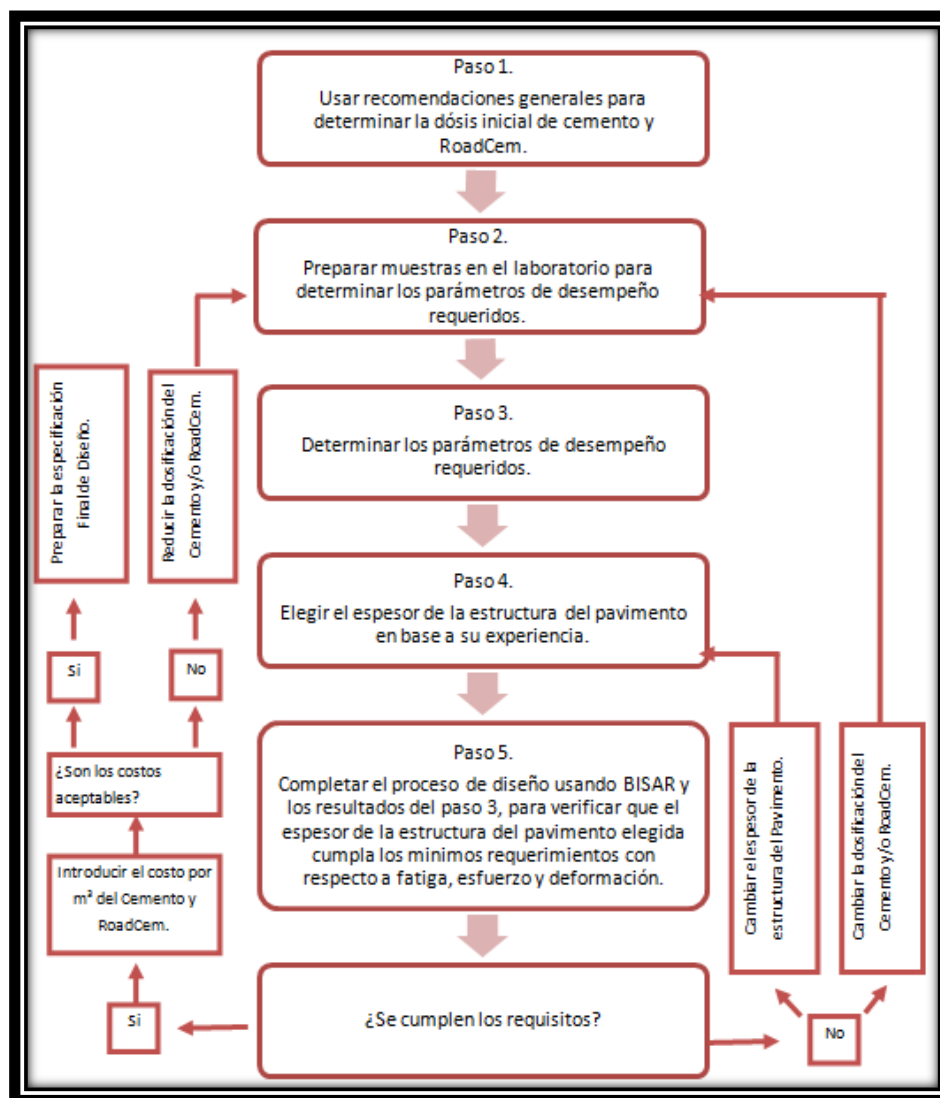


Fig.3.6.6 Diagrama del Diseño del Proceso de Optimización.
Fuente: De la Roij, 2008.

3.7.- Parte Experimental (Laboratorio).

Las pruebas de laboratorio realizadas para éste estudio del comportamiento a compresión simple de arcilla estabilizada con cemento más aditivo, son en base a un manual que la empresa patente del producto hizo, y el cual exigen seguir la aplicación de éste en cualquier parte del mundo donde se haga uso del producto; apoyado de Normas que la S.C.T. indica para realizar pruebas como caracterización del material, límites y prueba a compresión.

3.7.1.- Pruebas de Laboratorio.

1.- Muestreo del Material.

En base al Manual M-MMP-1-01/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) para obtener muestras de suelos para terracerías, subyacente y subrasante, se realizó el muestreo del material objeto de estudio de éste trabajo.

a).- En la zona de ubicación del suelo, se escogió un área con la menos presencia de vegetación.

b).- Se excavó a una profundidad de aproximadamente 30 cm y en un diámetro de 1 m. (Fig. 3.7.1).



Fig. 3.7.1 Perfil del terreno donde se encuentra la arcilla en estudio.



c).- Se obtuvo material disgregado y en terrones de excavación originada dentro del pozo anteriormente mencionado y fue colocado en costales. (Fig. 3.7.2)



Fig. 3.7.2 Material in situ que se extraerá para el estudio en laboratorio.

d).- El material fue llevado a laboratorio.

2.- Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras.

De acuerdo al Manual M-MMP-1-03/03 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), describe los pasos que deben seguir para separar muestras representativas de material obtenido para terracerías mediante el secado, disgregado y cuarteo para el análisis en el laboratorio.

Secado:

El secado se realiza con el fin de que se facilite el desmoronamiento y disgregado del material, para su manejo fácil al hacerle las pruebas.

a).- Para secar al sol o aire a temperatura ambiente, se elegirá un lugar plano que deberá estar limpio, tener una superficie lisa que resulte fácil al momento de recoger el material para perder lo menos posible de finos y no se contamine. (Fig. 3.7.3)



b).- Si se procede a un secado en horno, la(s) muestra(s) de material será(n) colocada(s) en charolas dentro de éste, a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

c).- En los procedimientos de los puntos anteriores (cual sea que se aplique), se deberá revolver el material periódicamente ayudado de pala o cucharón, con la finalidad de obtener un secado uniforme en todo el material.



Fig. 3.7.3 Tendido y Secado del material.

Disgregado:

Consiste en el desmoronamiento (desprendimiento) del material que está en forma de terrones, donde las partículas del suelo están unidas y no se pueden separar fácilmente; cuando hay gruesos se separan las partículas pequeñas que están adheridas, sin reducir de tamaño las partículas mayores, quedando de tal manera que no se modifique el tamaño de las partículas que componen al suelo tal cual se presenta en campo y tal cual se usará en obra.

a).- Después de secada la muestra, se disgregó el material con un mazo de concreto para que se facilitara el desmoronamiento de grandes terrones, después se utilizó el mazo de madera que señala éste manual (con masade aproximadamente 1.0 kg, de forma prismática rectangular, con una altura de 15 cm y base de 9.5 cm de lado). (Fig. 3.7.4 y Fig. 3.7.5).



Fig. 3.7.4 Disgregado del material.



Fig. 3.7.5 Secado del material después de ser disgregado.



- b).- El material se cribó en la malla N° 4, apartando el material que pasa.
- c).- El material retenido se coloca en una charola y se le aplica golpes hasta disgregarlo más; cribándose de nuevo en la malla N° 4.
- d).- Se reintegra todo el material que pasó la malla para posteriormente llevar a cabo el mezclado y cuarteo de éste.

Cuarteo de Muestras:

El cuarteo se realiza con el fin de obtener de toda una muestra, proporciones representativas de todos los distintos tamaños de partículas que tiene el material para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran hacer.

a).- Se inicia colocando el material cribado (pasa malla N° 4) en una superficie lisa, limpia y seca.

b).- Se traspalea el material de un lugar a otro (de 3 a 5 veces), formando en cada revoltura un cono, colocando el suelo en cada palada en el vértice de éste, para que al caer el suelo se acomode por sí solo y se realice una distribución uniforme de todas las distintas partículas. (Fig. 3.7.6).



Fig. 3.7.6 Traspaleo del material después de ser disgregado, colocado en una superficie que permite recogerlo fácilmente.



c).- Ya homogenizado el material, se aplasta el vértice del cono original con la ayuda de la pala (formando ahora un cono truncado), se hace girar para ir desplazando el suelo a los alrededores y disminuya la altura del cono para quedar de 15 a 20 cm de altura. (Fig. 3.7.7).

d).- Se divide en cuatro partes el cono truncado, ayudado de la pala o de una regla grande (acorde al volumen de la muestra). Se alejan las 4 partes un poco una de la otra. Fig. 3.7.8).



Fig. 3.7.7 Formación del Cono Truncado y la formación de los cuadrantes en el cuarteo de la muestra.



Fig. 3.7.8 Formación de los cuadrantes sobre el cono truncado.

e).- En una charola, se va colocando material de dos cuadrantes opuestos (se debe turnar el colocar una cucharada de un cuadrante y enseguida una cucharada del otro); las veces que sea necesario hasta obtener la muestra que se requiera para la aplicación de la prueba. (Fig. 3.7.9)





Fig. 3.7.9 Toma de la muestra representativa de todo el material uniformizado, colocando en una charola el suelo de dos cuadrantes opuestos.

f).- Tener cuidado de perder lo menos posible de finos.

3.- Límites de Consistencia.

Basada en el Manual M-MMP-1-07/07, que describe los pasos para determinar los límites de consistencia de los materiales para terraplén, subyacente y subrasante.

Esta prueba se aplica para material que pasa la malla N°40, nos permite conocer su límite plástico y líquido. (Fig. 3.7.10).

- a) Límite Líquido: determina el contenido de humedad para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte (25 g/cm^2), característica que se presenta cuando se llega a la frontera entre los estados semilíquido y plástico.
- b) Límite Plástico: determina el contenido de humedad en el cual un rollito de 3 mm de diámetro se rompe en 3 partes, característica que se presenta cuando se llega a la frontera entre los estados plástico y semisólido.

El Índice Plástico es igual a Límite Líquido – Límite Plástico.

Estos valores que se obtengan ayudan a la identificación y clasificación del suelo





Fig. 3.7.10 Material que pasa la malla N° 40.

Preparación de la Muestra:

- a) Del material que se obtuvo en los pasos de secado, disgregado y cuarteo de muestras, se criba por la malla N° 40 la cantidad suficiente hasta obtener unos 300 gramos (material que pasa).
- b) Se coloca en un recipiente (cápsula de porcelana) el material y se satura de agua (lo suficiente, que no llegue a cubrir el material porque sería demasiada agua), dejando así reposar durante 24 hrs.

Límite Líquido:

Esta prueba se realiza con la copa de Casagrande, calibrada para una altura de caída de 1 cm y 2 golpes por segundo, provista de un ranurador plano; teniendo dimensiones específicas.

- a) Se toma aproximadamente 200 grs. del material saturado en reposo y se coloca en una cápsula de porcelana, se homogeniza revolviendo con una espátula.
- b) En la Copa de Casagrande (ya calibrada) se coloca una cantidad de material, tal que al ser extendido con la espátula se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa, considerándose lo siguiente:
 - b.1) Para que el material que se coloque en la copa no resulte ser insuficiente, es conveniente poner una cantidad ligeramente mayor y eliminar el sobrante al enraizar con la espátula.
 - b.2) Para extender el material se parte del centro y hacia los lados sin aplicar presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula.
- c) Mediante una pasada firme del ranurador, pasándolo por el centro del material ya contenido en la copa, se hace una abertura; el ranurador se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa. (Fig. 3.7.11).



Fig. 3.7.11 Ranura hecha al material para iniciar con la prueba de Límite Líquido.

- d) Inmediatamente del ranurado se procede a la acción de la Copa de Casagrande, registrando el número de golpes necesarios para que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de $\frac{1}{2}$ ". (Fig. 3.7.12).

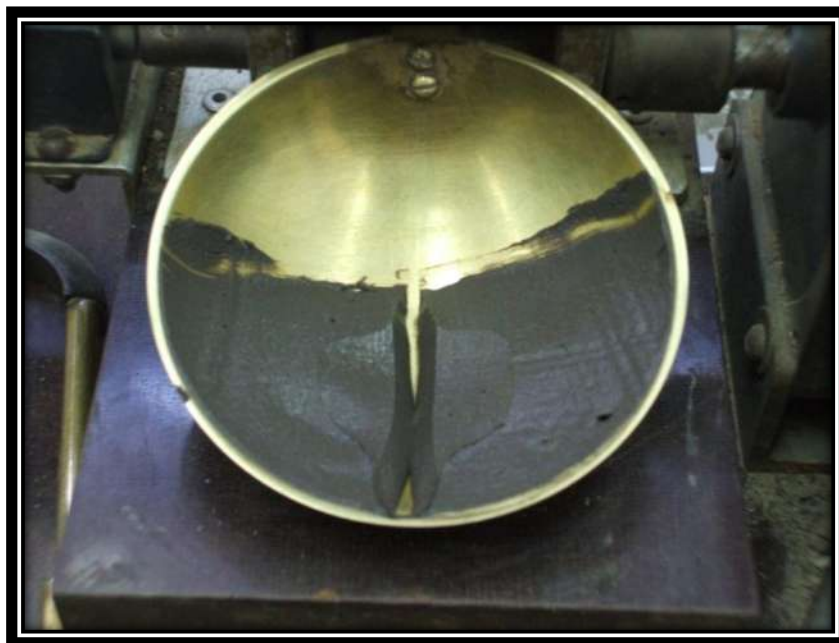


Fig. 3.7.12 Contacto de los bordes inferiores del material.

- e) Enseguida que se logra lo anterior, se toma una porción de unos 10grs. del material de la porción cerrada, colocándose ésta en una pequeña cápsula o vidrio de reloj (Fig. 3.7.13), enseguida se pesan en conjunto y se mete al horno para posteriormente determinar su humedad. (Previo se debe conocer el peso de la cápsula o vidrio de reloj).



Fig. 3.7.13 Proporción del material que tuvo contacto 1/2", para determinarle el contenido de agua, y las contracciones volumétrica y lineal.

- f) Se regresa el material que ha sobrado en la copa a la cápsula de porcelana donde se encuentra nuestro material saturado; se le agrega un poco más de agua, se homogeniza con la espátula y se repiten los pasos b) al e) hasta que las variaciones de las distintas cantidades de agua provoquen en 4 determinaciones el que la muestra se cierre entre 10 y 35 golpes en la Copa de Casagrande; será necesario obtener 2 puntos arriba y 2 puntos abajo de los 25 golpes. (Fig. 3.7.14).
- g) Se grafican los puntos de cada determinación, representando el eje de las "X" el número de golpes, y en el eje "Y" el contenido de agua en % (Tabla 3.7.15). Se traza una línea recta que pase aproximadamente por los puntos obtenidos y graficados.
- h) De la gráfica, se proyecta una línea vertical donde esté ubicado 25 golpes hasta intersectar la línea que se hizo en el punto g), se proyecta horizontalmente y se lee qué porcentaje agua se obtiene. Siendo éste el Límite Líquido. (Fig. 3.7.16).



Fig. 3.7.14 Proporción del material que tuvo contacto 1/2", para la determinación del contenido de agua, después del secado en horno.

LÍMITE LÍQUIDO								
Cápsula N°	N° Golpes	Peso cápsula+suelo húmedo	Pesocápsula+suelo seco	Peso del Agua	Peso de la Cápsula	Peso del Suelo Seco	Peso del Suelo Húmedo	Contenido de Agua (W) en %
9	33	13.75	11.72	2.03	8.25	3.47	5.5	58.5
5	24	37.27	27.45	9.82	12	15.45	25.27	63.56
44	17	28.79	22.01	6.78	11.78	10.23	17.01	66.28

Tabla 3.7.15 Tabla obtenida en la prueba de Límite Líquido, con ayuda de la copa de Casagrande con 3 distintas cantidades de agua.

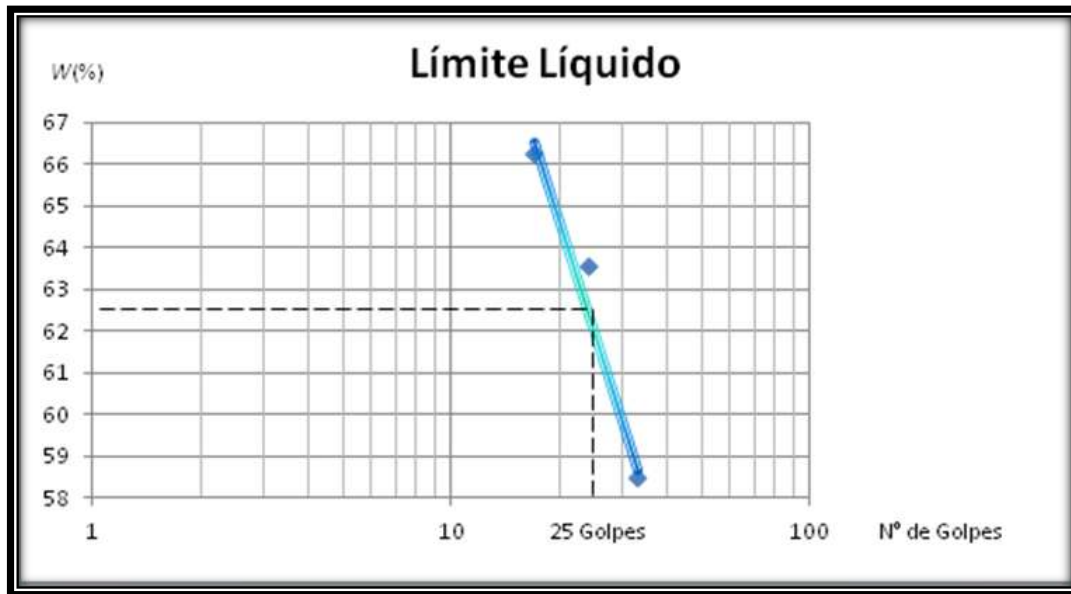


Fig. 3.7.16 Curva de Fluidez.

Observando la gráfica, obtenemos que el **Límite Líquido = 62.5%**

Límite Plástico:

Esta prueba nos ayuda a determinar el contenido de humedad en el cual un rollito de 3 mm de diámetro se rompe en 3 partes, característica que se presenta cuando se llega a la frontera entre los estados plástico y semisólido.

a) Del material que se puso en saturación, se toma una pequeña porción tal que se pueda hacer una bolita de 1 cm de diámetro aprox., se amasará con los dedos para que pierda humedad y con ayuda de las palmas de las manos se empieza a dar forma de tubo o cilindro.

b) Enseguida se apoya en una placa de vidrio para hacer girar con los dedos el pequeño cilindro y que su diámetro vaya disminuyendo hasta obtenerlo de 3 mm.

c) Al ocurrir lo anterior, se debe notar que el pequeño cilindro se rompa en 3 secciones; de no ser así significa que tiene exceso de agua, y que aún no se ha llegado a la frontera entre los estados plástico y semisólido. Así que para la pérdida de agua se vuelve a manipular con las manos, amasando la bolita de suelo y repetir los pasos 2 y 3 hasta conseguir que el rollito de diámetro mencionado se parta en tres secciones. (Fig. 3.7.17).



Fig. 3.7.17 Rollitos del material al presentarse la ruptura en 3 secciones, para la determinación del contenido de agua.

d) Enseguida los rollitos se deben de poner inmediatamente en un vidrio de reloj (previo a esto, se debe conocer el peso del vidrio); se pesa *vidrio de reloj + suelo húmedo*, y se hace lo necesario para calcular su humedad. (Fig.3.7.18).



Fig.3.7.18 Rollitos de material, recién salidos del horno, enfriándose a temperatura ambiente para determinar su contenido de agua.



e) Dicha cantidad de agua en % será el Límite Plástico. (Fig. 3.7.19 y Tabla 3.7.20).



Fig. 3.7.19 Obteniendo el peso de los rollitos de material, después de que estuvieron en el horno y enfriados a temperatura ambiente.

Cápsula N°	Peso capsula+suelo húmedo	Peso capsula+suelo seco	Peso del Agua	Peso de la Cápsula	Peso del Suelo Seco	Peso del Suelo Húmedo	Contenido de Agua (W) en %
6	14.22	13.1	1.12	8.39	4.71	5.83	23.78

Tabla 3.7.20 Cálculos de la obtención del Límite Plástico.

Índice Plástico:

Ya obtenidos los valores del Límite Líquido y el Plástico, se puede conocer el valor del Índice Plástico, el cual es:

$$\text{Índice Plástico} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

$$\text{Índice Plástico} = 62.5 - 23.78$$

$$\text{Índice Plástico} = \mathbf{38.72\%}$$

Ahora si podemos conocer el tipo de suelo que es objeto de nuestro estudio y poder clasificarlo.



4.- Clasificación del Suelo.

Utilizando la Carta de Plasticidad, se entra con los valores de Límite Líquido e Índice de Plástico; el punto donde se intersectan ambas rectas quedará en alguna zona de la carta, definiendo así qué tipo de suelo es. Como se observa en la Fig. 3.7.21 nuestro material es CH (Arcilla Inorgánica de Alta Plasticidad).

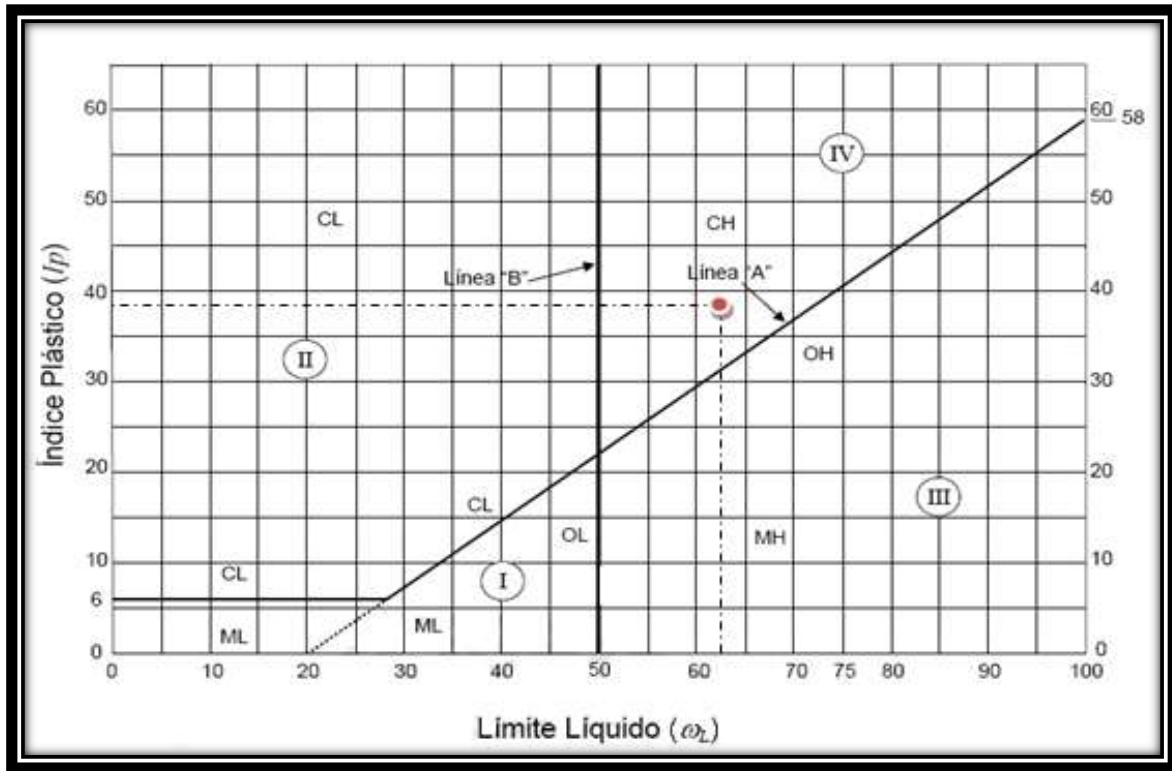


Fig. 3.7.21 Carta de Plasticidad, donde se observa que con los ahora datos obtenidos de las pruebas de Límite Líquido e Índice Plástico se conoce la clasificación del suelo en estudio; resultando ser una Arcilla CH.

5.- Compactación de Suelos.

Definamos compactación de suelos como: “proceso por el cual mediante una carga aplicada al suelo (sea repetitiva o estática) y agregando la humedad óptima se logra la unión de las partículas, tal que el suelo compactado logra una estabilidad y se opone a la deformación”.



Dicen los Autores Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Suárez, en su libro “Mecánica de Suelos”, que la compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos.

La importancia de la compactación de los suelos se basa en el aumento de la resistencia, en la disminución a la deformación y de los vacíos, logrando así que aumente el Peso Específico Seco.

Pero el método de compactación dependerá del tipo de material, pues no todos los suelos son iguales; así por ejemplo para arenas, se logra en cierta forma una compactación con un acomodo de sus partículas, ayudado de vibraciones; y por otra parte, en suelos muy finos y plásticos la compactación por carga estática es recomendable. La maquinaria ofrece el método de compactación, y es un factor para lograr una eficiencia, pero no es la única; es muy importante tomar en cuenta la humedad óptima del suelo y la energía de compactación que se aplicará por unidad de volumen.

Actualmente hay varios métodos de compactación, algunos que van desde hace varios años y que siguen siendo aún muy útiles y usados, como lo es lo desarrollado por R. Proctor cuya Técnica es conocida como “Prueba Proctor Estándar”. Mediante el paso del tiempo ha cambiado el nombre a “AASHTO Estándar”. Ésta prueba aplica para suelos con partículas que pasan la malla N° 4, consiste en compactarlo en 3 capas con ayuda de un pisón de 2.5 kg de masa, aplicando 25 golpes por capa, dentro de un molde de 10.16 cm de diámetro, y produciendo con éstas características descritas una Energía Específica igual a $6 \text{ kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$.

Pero más tarde y mediante investigaciones, se observó que cambiando la Energía Específica (que sea mayor) se lograba una cohesión más fuerte de las partículas del suelo al momento de la compactación y con una humedad óptima más baja; desarrollándose así nuevas características de la prueba AASHTO que ya se conocía, denominándose a éste método como AASHTO Modificada.

5.1.- Compactación AASHTO Modificada.

Ésta prueba fue elaborada en base a la Normativa de la SCT, cuyo procedimiento está descrito en el Manual M-MMP-1-09/06 para realizar la Compactación AASHTO Estándar y AASHTO Modificada, ayudándonos a determinar mediante la curva de compactación valores como: el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptima de los materiales para terracería a las que se refiere las Normas: Materiales para Terraplén, Materiales para Subyacente y Materiales para Subrasante.



¿Y por qué aplicar AASHTO Modificada?

De acuerdo a la siguiente figura, se observa las capas que reemplaza una estructura de pavimento estabilizada con RoadCem a una tradicional, de acuerdo a lo que nos proporciona la empresa patente. (Fig. 3.7.22).

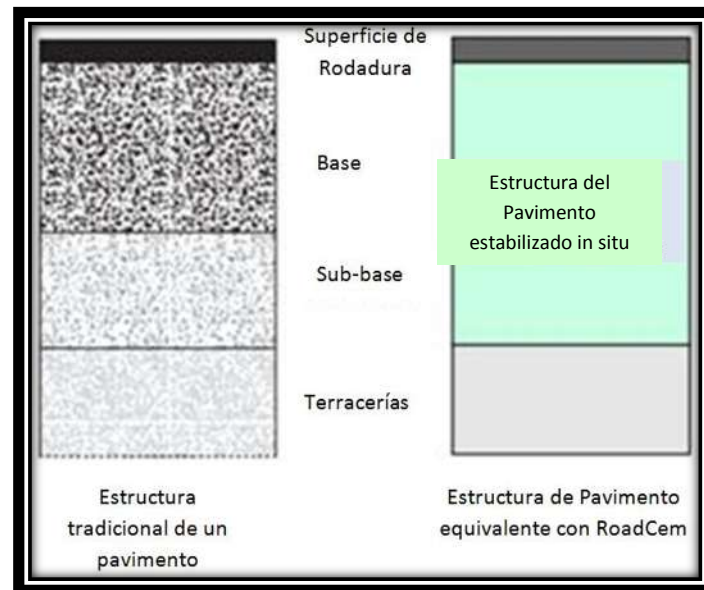


Fig. 3.7.22 Comparativo de una Estructura de Pavimento Tradicional con una Estructura elaborada con RoadCem.
Fuente: De la Roij, 2008.

Puede verse que sustituye la parte de pavimentos y no terracerías, así que de acuerdo a las Normas de la SCT para compactación del material con el que se formarán las capas de pavimento, deben elaborarse de acuerdo al Manual M-MMP-1-09/06 “Compactación AASHTO Modificada”; así que será éste como se compactará el material para encontrar: la curva de compactación, humedad óptima y la elaboración de los especímenes.

a).- Se realiza el Secado, Disgregado y Cuarteo del material, obteniéndose de dos cuadrantes opuestos una proporción de 4.0 kg del suelo (ésta cantidad será adecuada para la formación de cada espécimen compactado, recuerde que es material que pasa malla N° 4).

b).- Los moldes deberán estar limpios y engrasados al igual que el pisón y cerca del área de trabajo (recomiendo 4) para la prueba de compactación AASHTO Modificada, los cuales deben cumplir con las dimensiones y especificaciones que la SCT establece en el manual ya mencionado y que a continuación se describe.

- Moldes metálicos de forma cilíndrica, de 152.4 ± 0.7 mm de diámetro interior (diámetro para la prueba de compactación AASHTO Modificada), de volúmenes y masas conocidos. Provisto de una base metálica a la cual se asegura un cilindro y un collarín removible con un diámetro interior igual al del cilindro, con la forma y dimensiones indicadas en la Fig. 3.7.23

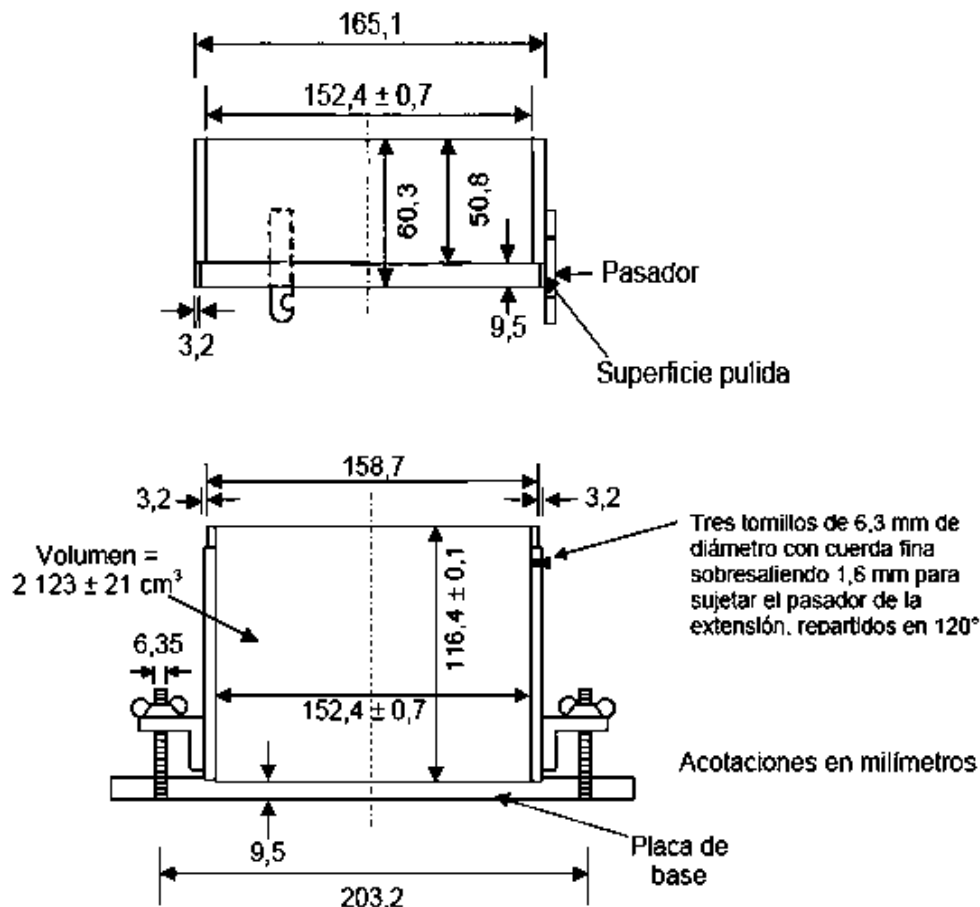


Fig. 3.7.23 Collarín y Molde para la compactación AASHTO Modificada.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-09/06, 2006.

- Pisón metálico (Fig. 3.7.25), con cara inferior de apisonado circular, de 50.8 mm de diámetro y 4.54 ± 0.01 kg de masa. Acoplado a una guía metálica tubular y con las características indicadas en la Tabla 3.7.24.

Características de los pisones		
Tipo de prueba	Estándar	Modificada
Masa del pisón, kg	$2,5 \pm 0,01$	$4,54 \pm 0,01$
Diámetro del pisón, mm	50,8	50,8
Altura de caída del pisón, cm	$30,5 \pm 0,1$	$45,7 \pm 0,1$

Tabla 3.7.24 Tabla de características del pisón para las Compactaciones AASHTO.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-09/06, 2006.

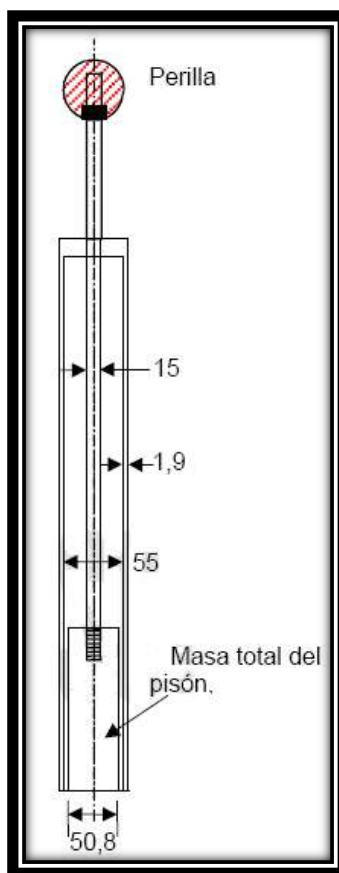


Fig.3.7.25 Pisón para la compactación AASHTO Modificada.
Fuente: SCT, Manual M-MMP-1-09/06, 2006.



- Para la AASHTO Modificada se indica un número de 5 capas, formada con 56 golpes cada una de ellas.

c).- A la proporción obtenida en el paso N° 1 se le va adicionando agua necesaria de tal manera que ya homogenizada se tome un puño de material húmedo y al apretarlo apenas se conserve un terrón. Si durante la aplicación del agua y la incorporación de ésta se formaron grumos, se revuelve el material hasta disgregarlo totalmente (Fig. 3.7.26). Éste total se dividirá en 5 partes iguales.



Fig.3.7.26 Colocación de agua en cantidades pequeñas, para ir uniformizando poco a poco la humedad en todo el suelo.

d).- Se vacía una primer parte dentro del molde, colocado éste sobre una base horizontal y resistente, con el pisón se aplican 56 golpes repartiéndolos uniformemente en la superficie de la capa. (Fig. 3.7.27).



Fig.3.7.27 Compactación AASHTO Modificada, donde se observa una repartición uniforme en toda el área del molde.

e).- Con ayuda de un cuchillo se escarifica muy bien la superficie de la capa recién compactada (Fig. 3.7.28) y enseguida se agrega otra proporción (1/5) del suelo húmedo; repitiendo los pasos d) y e) hasta que se haya colocado los 4.0 kg de suelo (en 5 capas en total).



Fig. 3.7.28 Escarificación de la capa, que ayudará a la siguiente a unirse a ésta cuando se le apliquen los 56 golpes con el pisón.

f).- Terminada la compactación de todas las capas, se retira la extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del cilindro en un espesor de 1.5 cm aproximadamente (pero no más), se enrasa cuidadosamente el espécimen con ayuda de una regla metálica. (Fig. 3.7.29).



Fig. 3.7.29 Espécimen enrasado.

g).- Se pesa molde + suelo compactado y se registra dicho peso (Fig. 3.7.30); se desmolda y se obtiene un pequeño corazón del suelo, se pesa (unos 200 gramos) y se determina su contenido de agua. (Fig. 3.7.31).



Fig.3.7.30 Obteniendo el peso de molde + suelo compactado.



Fig.3.7.31 Proporciones de cada espécimen compactado puesto en el horno para determinar su humedad.



h).- Tomando una nueva porción de 4.0 kg. en una charola, se le adiciona un 2% (en peso) más adicional a la cantidad de agua con el que se elaboró el primer espécimen, y se repiten los pasos c) al g).

i).- El número de especímenes elaborados terminará hasta que el peso del molde + suelo compactado disminuya respecto a los anteriores. Se espera y recomienda que sean 4 especímenes, los 2 últimos que su peso sea menor a los 2 primeros.

j).- Se llenará la tabla que a continuación se muestra (Tabla 3.7.32), donde el objetivo será obtener los valores de Peso Volumétrico Seco Máximo y Humedad Óptima.

Compactación AASHTO Modificada.

	B	B	5	B
Peso Molde + suelo húmedo (gr)	7370	7530	7550	7560
Peso molde (gr)	2790	2790	2750	2790
Peso suelo húmedo (gr)	4580	4740	4800	4770
Peso especifico húmedo (t/m^3)	1.87	1.93	1.97	1.94
Capsula N°	1	2	3	4
peso capsula + suelo húmedo (gr)	489.7	323.6	399.4	323.6
peso cápsula + suelo seco (gr)	462.3	293.0	365.4	286.2
peso del agua (gr)	27.4	30.63	34	37.4
peso capsula (gr)	289.7	123.6	199.4	123.6
Peso suelo seco (gr)	172.6	169.4	166	162.6
Contenido de agua (%)	16%	18%	20%	23%
Peso especifico seco (T/m^3)	1.61	1.64	1.64	1.58

Tabla 3.7.32 Tabla de los cálculos de la Prueba de Compactación AASHTO Modificada, donde se muestran las 4 cantidades distintas de humedad aplicada en los especímenes, para construir la curva de compactación.

k).- Se hace la gráfica: Contenido de Agua (%) vs Peso Volumétrico Seco (T/m^3) (Fig. 3.7.33), se localiza el punto más alto y se proyecta a cada eje para encontrar su coordenada que corresponderá a (Humedad Óptima, Peso Volumétrico Seco Máximo).

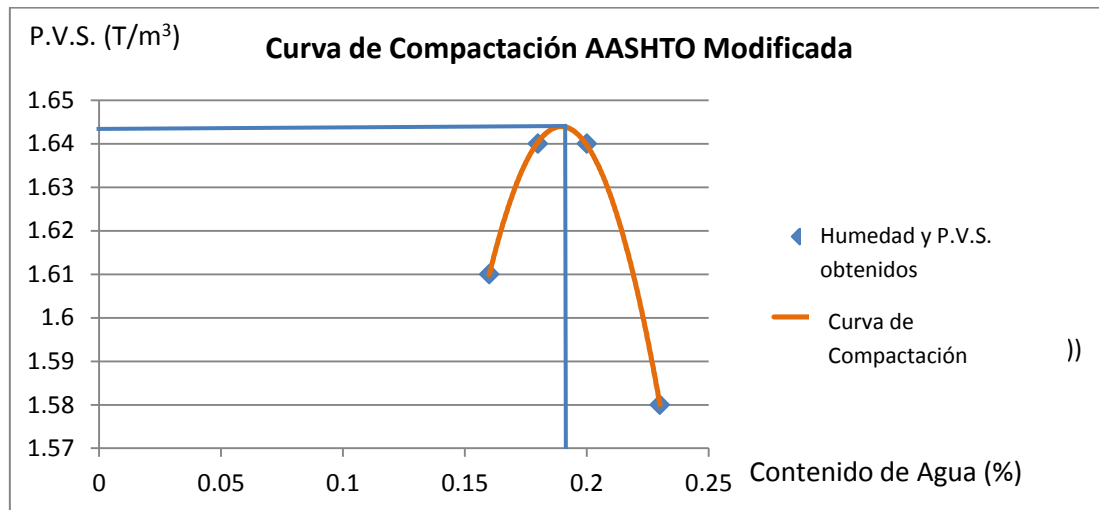


Fig. 3.7.33 Gráfica de la Curva de Compactación, donde se observa el valor del punto máximo cuya coordenada es (0.19, 1.642).

Entonces se obtiene que:

Humedad Óptima = 19.0 %

P. V. S. M. = 1.642 T/m³

6.- Determinación de la Mezcla.

Así como se realizaron las pruebas anteriores de acuerdo a lo recomendado por la empresa patente, también esta hace mención de utilizar una dosificación recomendada por ellos que va de acuerdo a la clasificación del suelo que se va a estabilizar.

6.1.- Introducción.

La composición de la mezcla es la cantidad de los diferentes productos que pueden ser mezclados para lograr una estabilización; descrito así por la empresa patente que elaboró el producto en estudio.

Dicha empresa ha realizado sus propios estudios sobre el producto, llegando ellos a obtener y elaborar una tabla (ya se vió en el capítulo 3.6.- RoadCem) que de acuerdo al tipo de suelo que se pretende estabilizar, indica la cantidad recomendada de RoadCem y cemento que se le agregará para formar la mezcla.



Así que en base a la tabla se define la dosificación a utilizar y analizar en éste trabajo; recordemos para ello que nuestro material es “CH”, por lo tanto se mezclará:

2.2 Kg de RoadCem + 220 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

En el análisis que se realizará en este trabajo, no sólo se estudiará ésta dosificación, se determinó tomar en cuenta mezclas por abajo y por arriba (en peso) de la obtenida en la tabla; llegando así a estudiar sus resistencias a compresión de las dosificaciones que a continuación se muestran:

1.8. Kg de RoadCem + 180 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

2.0. Kg de RoadCem + 200 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

2.2 Kg de RoadCem + 220 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

2.4 Kg de RoadCem + 240 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

2.6 Kg de RoadCem + 260 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla.

7.- Elaboración de los Especímenes.

Para la realización de las mezclas a escala de nuestros moldes correspondientes a la AASHTO Modificada, fue necesario hacer una regla de tres con ayuda de los 4 kg necesarios para formar un espécimen.

Ejemplo:

- *Dosificación: 1.8. Kg de RoadCem + 180 kg de Cemento + 1.642 T/m³ compactado de Arcilla*
- *Cálculo:*

$$\frac{\text{Cemento}}{4\text{kg}} = \frac{180\text{kg}}{1642\text{kg}}$$

$$\text{Cemento} = (180\text{kg} \cdot 4\text{kg}) / 1642\text{kg}$$

$$\text{Cemento} = 0.4385 \text{ kg} = 438.5 \text{ grs.}$$

La cantidad de RoadCem es el 1% de la cantidad del cemento, por lo tanto:

$$\text{RoadCem} = 4.385 \text{ grs.}$$



La humedad óptima nos lo arrojó la curva de compactación y es igual al 19%, y para evitar pérdida de agua por evaporación se usará un 2% más de agua, siendo así que:

Cantidad de Agua = 21% del peso total para formar un espécimen de ésta dosificación.

Peso Total = 4000 grs. de suelo + 438.5 grs. de cemento + 4.385 grs. de Roadcem

Peso Total de un Especimen = 4,442.885 gr.

*Cantidad de Agua = $0.21 * 4,442.885 = 933$ mL. de agua.*

Estos pesos se mezclaron en una charola y de forma manual, se compactaron con AASHTO Modificada y se conservaron en ciertas condiciones que a continuación se describen.

a).- Mezcla de Arcilla + Cemento + Roadcem, el cual se debe uniformizar mediante movimientos de revoltura para lograr una mezcla homogénea. (Fig. 3.7.34)



Fig. 3.7.34 Adición de arcilla, cemento y roadcem.

b).- Incorporación de agua (humedad óptima + 2%) a la mezcla, en cantidades pequeñas para evitar formar grumos, ayudando con las manos hasta distribuirlo. (Fig. 3.7.35).



Fig. 3.7.35 Adición de agua a la mezcla.



Al distribuir la humedad en toda la mezcla, se puede comprobar que el agua agregada logra la característica que define que el suelo contiene la humedad óptima, lográndose la formación de un terrón con el apretón de la mano, y abrirla dicho terrón no se desmorona, a menos que uno lo haga con los dedos. (Fig. 3.7.36).



Fig. 3.7.36 Formación de un terrón formado por un apretón con la mano, después de la adición del agua.

c).- Ya húmeda la mezcla, se cubre con una franela húmeda (fresca, no empapada) mientras se van elaborando cada una de las 5 capas que conforma todo el espécimen. (Fig. 3.7.37).



Fig. 3.7.37 Mezcla con el contenido de agua necesario, que es tapada con una franela húmeda para evitar pérdidas de agua.

d).- Se inicia con la compactación de la mezcla, mediante la AASHTO Modificada, conformándose de 5 capas y 56 golpes cada una. En la terminación de cada capa se debe escarificar su superficie, para luego iniciar la compactación de la siguiente. (Fig. 3.7.38).



Fig. 3.7.38 Compactación de los especímenes.

e).- Terminando la elaboración de las capas, se quita el collarín cuidadosamente y se elimina el material que sobrepasa el molde (se enrasa). (Fig. 3.7.39).





Fig. 3.7.39 Espécimen recién elaborado y después enrasado.

f).- Se tapa con una franela húmeda, para evitar la pérdida de agua en el momento del curado, teniendo el cuidado de que se mantenga fresca hasta el día de desmoldar el espécimen.

8.- Conservación de los Especímenes.

Ya enrasados en el molde, se cubren con una tela húmeda y fresca, que brindará que no se escape humedad en el momento que inicie el proceso de hidratación del cemento cuando éste empiece a endurecer.

A las 24 horas de la elaboración, se procede a desmoldar y envolver cada espécimen en una tela húmeda (fresca, no empapada) que permita el paso del aire y el curado de cada uno (Fig. 3.7.40).



Fig. 3.7.40 Envoltura de los especímenes en franela húmeda para el procedimiento de curado.

Así envueltas, se colocan cerca de un almacenamiento de agua (puede colocarlas en una plataforma por encima del espejo del agua) y no directamente sumergidas, esto para mantenerlas frescas y que la humedad en la tela se conserve por más tiempo; éstas condiciones se llevarán a cabo hasta el día de la prueba (Fig. 3.7.41).

Para evitar contaminación, se toma en cuenta poner separadas las que tienen el producto estabilizador con las que no lo tienen.



Fig. 3.7.41 Colocación de los especímenes alrededor de una pila con agua.



9.- Resistencia a la Compresión Simple.

En definición de PowerCem, la resistencia a la compresión es la máxima tensión susceptible de ser absorbida, que puede admitir un elemento que se somete a pruebas de compresión hasta que se deforma.

Resistencia a la compresión simple se interpreta como la carga que un cuerpo es capaz de soportar, teniendo éste una reacción en sentido contrario a la acción de la carga que se le está aplicando; cuando la acción es mayor a lo que puede reaccionar, el cuerpo se debilita y se deforma, provocando fractura.

Esta prueba es realizada con los pasos descritos en el Manual de la SCT denominada M-MMP-2-02-058/04 “Resistencia a la Compresión Simple”, permite determinar la resistencia a la compresión simple de especímenes cilíndricos moldeados y compactados.

Cabeceo:

a).- Se retiran los especímenes del lugar de curado y se mantienen envueltos en la tela.

b).- Se toman las medidas de altura y diámetro del espécimen.

c).- Se realiza el cabeceo con azufre, dejando calentar éste en un recipiente de aluminio a fuego bajo (en caso contrario ocurrirá que llegará a quemarse el azufre y poner muy espeso, lo cual no nos ayudará en la facilidad para cabecear).

d).- Mientras tanto, se tendrá listo el molde para el cabeceado, se debe limpiar muy bien de polvo y se aceita el área del molde donde se colocará el azufre (no deberá aceitarse las caras del espécimen).

e).- Teniendo el azufre fundido, se coloca una cantidad en la base del molde, enseguida se pone por encima una de las caras del espécimen, guiándonos con unas reglas que tiene el molde para cabeceo, lo cual permitirá que nuestro espécimen esté colocado verticalmente y perpendicular al espejo del azufre. Cuando éste se seque se pondrá sólido, así que se desprende del molde de cabeceo y ya quedará unido a la cara del espécimen.

f).- Se repiten los pasos c) al e) en la otra cara del espécimen.



9.1.- Prueba de Compresión Simple:

a).- De la prensa ThermallyProtected, marca General Electric, modelo 5KC43PG782T, de 1HP, número de serie 219573, capacidad de 120,000 kg., se limpian las superficies de sus placas superior e inferior y se coloca el espécimen en la placa en ésta última, alineando cuidadosamente su eje respecto del centro de la placa de carga con asiento esférico.

b).- La placa de carga (superior) se bajará hacia el espécimen hasta quedar a un ligero y uniforme contacto con la cara.

c).- Se inicia aplicando la carga a una velocidad constante (ésta ya la tiene definida la prensa, así que recomiendo que se trabaje con esa). Si el operador acelera la velocidad de carga, es muy probable que haya fallo del espécimen antes de lo que realmente puede resistir, y sube rápidamente la aguja del medidor de carga que puede confundir dónde marcó.

d).- Se sigue la aplicación de la carga hasta alcanzar la máxima permisible, la cual se sabrá en el momento en que la aguja se detenga y empiece a bajar. Se toma nota de la lectura y se hace los registros correspondientes.

e).- La resistencia de los especímenes se determina a la edad de 7, 14 y 28 días. Dicha resistencia a la compresión simple resulta de la fórmula:

$$R = \frac{P}{A}$$

Donde:

R = Resistencia a la Compresión Simple (kg/cm²).

P = Carga Máxima resistida (kg)

A = Área de la sección transversal del espécimen (cm²).

f).- La Resistencia a Compresión de cada espécimen se multiplicará por un factor de corrección Bonzel, el cual la empresa patente del producto en estudio indica en el manual; siendo el producto el resultado que queremos obtener.



3.8.- Análisis de Resultados (Comparativos).

La dosificación de los especímenes fue iniciado de acuerdo a la recomendación de la empresa patente del producto en estudio, que va de acuerdo al tipo de suelo resultando de la caracterización del material.

Recordemos que las 5 dosificaciones que se estudiaron con arcilla CH, están indicadas en el capítulo 3.7.- Parte Experimental, tema 6.- Determinación de la Mezcla.

Se elaboró también especímenes de arcilla, los cuales presentaron una resistencia a la compresión de 55.15 kg/cm^2 , como la máxima presentada entre los 3 especímenes; mientras que 44.50 kg/cm^2 es el promedio de la resistencia a compresión entre estos.

Aplicando compresión simple a los 7, 14 y 28 días de elaborados cada uno de los especímenes, los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

a) Proporción: 180 kg cemento - 1.8 kg roadcem - 1m^3 arcilla.

SIN ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.1, Fig. 3.8.2, Gráfica 3.8.5 y Anexos.)

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm^2)	Resistencia (kg/cm^2)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm^2)
7	12,000	191.87	62.54	0.81	1.08	67.5
14	12,400	192.61	64.38	0.81	1.08	69.5
28	19,000	189.42	100.31	0.82	1.08	108.3

Fig. 3.8.1. Tabla de la resistencia a compresión simple, proporción: 180 kg cemento con arcilla.



Fig. 3.8.2. Muestra cabeceada, con 180 kg de cemento, arcilla y sin RoadCem.

CON ROADCEM:

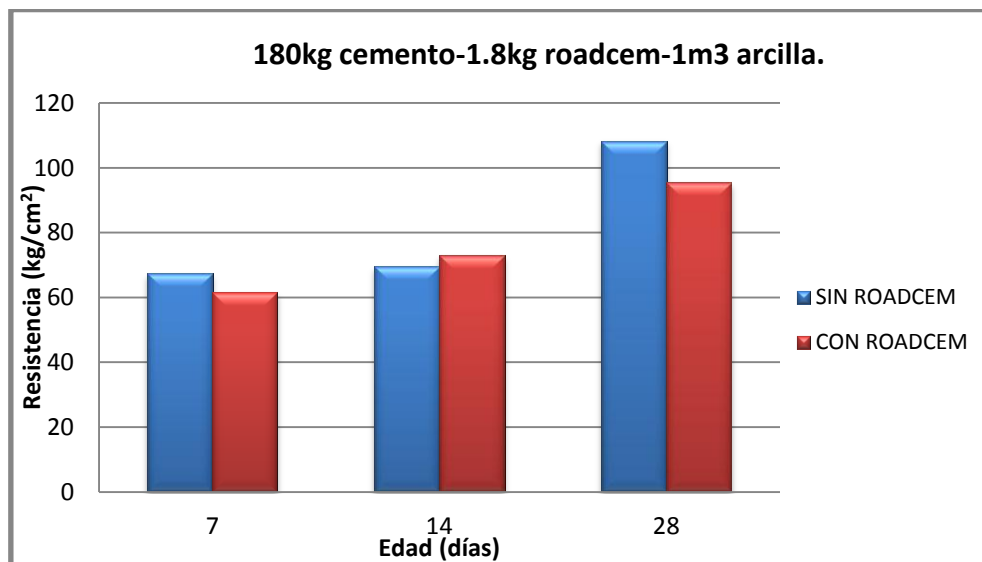
(Ver tabla 3.8.3, Fig. 3.8.4, Gráfica 3.8.5 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	11,000	193.1	56.97	0.81	1.08	61.5
14	13,000	192.12	67.67	0.81	1.08	73.1
28	17,000	192.12	88.49	0.81	1.08	95.6

Tabla 3.8.3. Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 180 kg cemento, 1.8 kg RoadCem y arcilla.



Fig. 3.8.4 Muestra cabeceada, con 180 kg de cemento, 1.8 kg de RoadCem y arcilla.



Gráfica 3.8.5 Resistencia a la compresión simple, dosificación 180/arcilla contra 180/1.8/arcilla.

De la gráfica se puede observar que no hay una diferencia notoria entre usar o no RoadCem, incluso se puede decir que para este caso, el suelo adquiere mayor resistencia al estabilizarse solo con cemento.

b) Proporción: 200 kg cemento - 2 kg RoadCem - 1m³ arcilla.

SIN ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.6, Fig. 3.8.7, Gráfica 3.8.10 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia(kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	12,000	191.87	62.54	0.81	1.08	67.5
14	14,000	189.42	73.91	0.82	1.08	79.8
28	12,200	192.61	63.34	0.81	1.08	68.4

Tabla 3.8.6.Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 200 kg cemento y arcilla.



Figura 3.8.7 Muestra cabeceada, con 200 kg de cemento y arcilla.

CON ROADCEM:

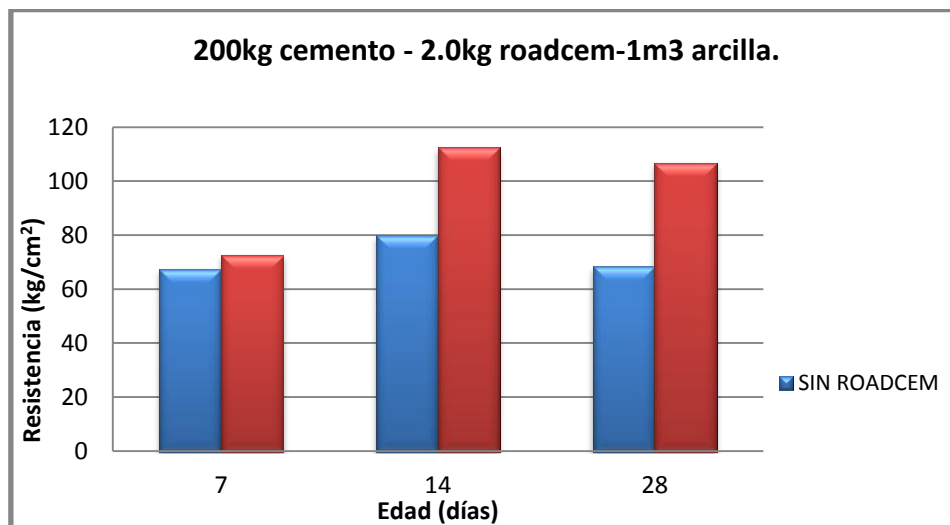
(Ver tabla 3.8.8, Fig. 3.8.9, Gráfica 3.8.10 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia(k g/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	13,000	193.1	67.32	0.81	1.08	72.7
14	20,000	192.12	104.1	0.81	1.08	112.4
28	19,000	192.12	98.9	0.81	1.08	106.8

Tabla 3.8.8. Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 200 kg cemento, 2.0 kg RoadCem y arcilla.



Figura 3.8.9 Muestra cabeceada, proporción: 200 kg de cemento, 2.0 kg de RoadCem y arcilla.



Gráfica 3.8.10 Resistencia a la compresión simple, dosificación 200/arcilla contra 200/2.0/arcilla.

De este gráfico observamos que la tendencia de la resistencia ganada con el paso del tiempo no es la esperada al disminuir la resistencia a los 28 días con respecto a la de 14 días. Sin embargo, en todos los casos las muestras presentan una mayor resistencia al usar RoadCem.

Cabe señalar que la disminución en la resistencia a los 28 días fue seguramente a causa de la disminución en la humedad de curado de las muestras, al no proporcionarle la humedad requerida hasta el día de la prueba.

c) **Proporción: 220 kg cemento – 2.2 kg RoadCem - 1m³ arcilla. (Recomendado por la empresa patente para una arcilla CH).**

SIN ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.11, Gráfica 3.8.13 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	9,800	192.61	50.88	0.81	1.08	55.0
14	21,000	191.87	109.45	0.81	1.08	118.2
28	12,400	189.42	65.46	0.82	1.08	70.7

Tabla 3.8.11 Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 220 kg cemento y arcilla.

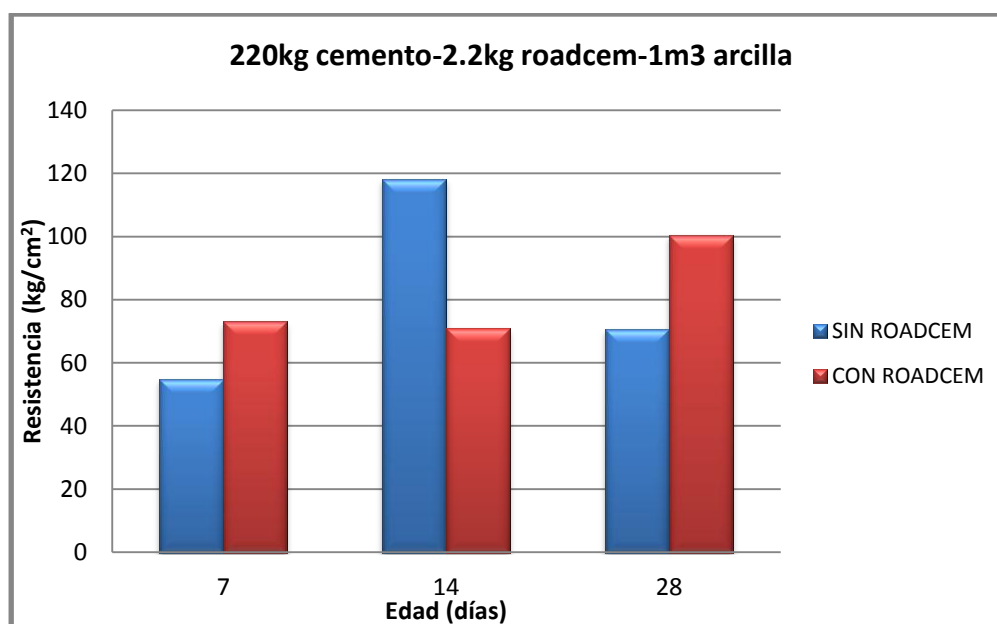


CON ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.12, Gráfica 3.8.13 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia(kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	13,000	192.12	67.67	0.81	1.08	73.1
14	12,600	192.12	65.58	0.81	1.08	70.8
28	16,600	193.1	85.97	0.69	1.17	100.6

Tabla 3.8.12 Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 200 kg cemento, 2.2 kg RoadCem y arcilla.



Gráfica 3.8.13 Resistencia a la compresión simple, dosificación 220/arcilla contra 220/2.2/arcilla.

La proporción de estas muestras son las recomendadas por el fabricante de RoadCem. No se observa una tendencia clara en las resistencias ya que sin RoadCem disminuye después de 14 días de edad y con RoadCem aumenta a los 28 días. Sin embargo la resistencia que se obtuvo con sólo cemento a los 14 días fue prácticamente el doble que con RoadCem.

d) Proporción: 240 kg cemento- 2.4 kg roadcem-1m³ arcilla.

SIN ROADCEM:

(Ver Tabla 3.8.14, Figura 3.8.15, Gráfica 3.8.18 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia(kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	10,000	192.61	51.92	0.81	1.08	56.1
14	18,800	191.87	97.98	0.81	1.08	105.8
28	6,400	189.42	33.79	0.82	1.08	36.5

Tabla 3.8.14. Tabla de la resistencia a compresión simple, proporción: 240 kg cemento con arcilla.

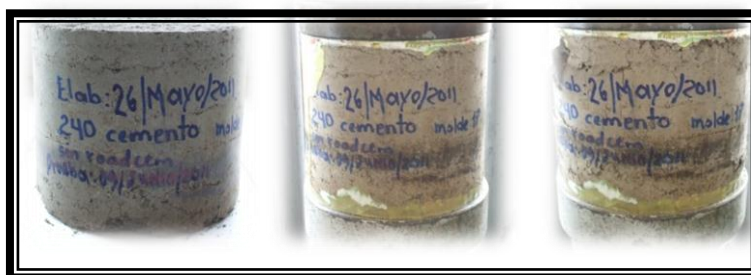


Figura 3.8.15 Antes, durante y después de la prueba a compresión simple (dosificación 260/arcilla).

CON ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.16, Figura 3.8.17, Gráfica 3.8.18 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	18,000	192.12	93.69	0.81	1.08	101.2
14	19,400	192.12	100.98	0.81	1.08	109.1
28	12,000	193.1	62.14	0.81	1.17	72.7

Tabla 3.8.16 Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 240 kg cemento, 2.4 kg RoadCem y arcilla.

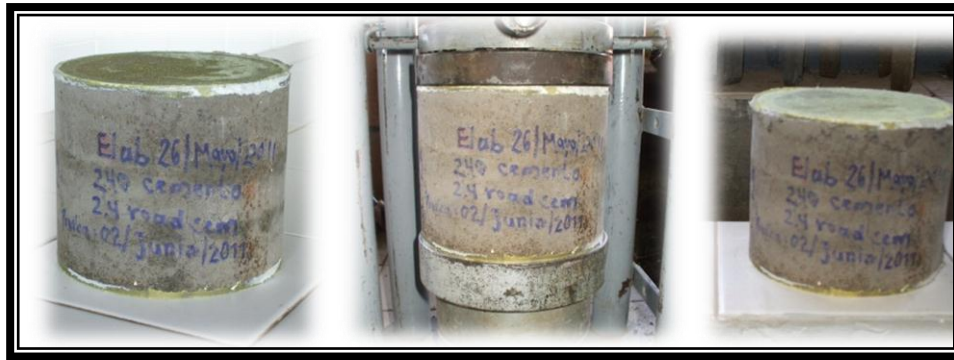
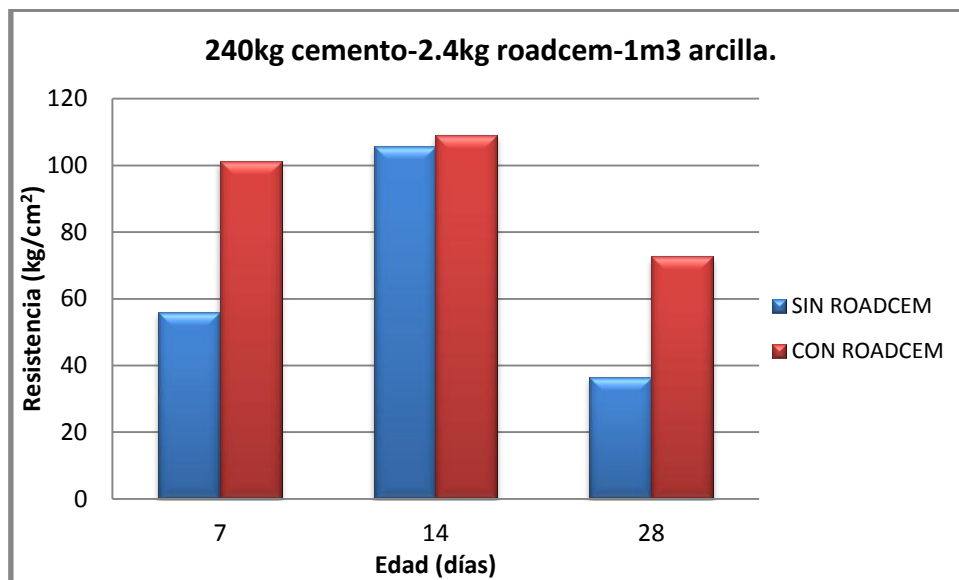


Figura 3.8.17 Antes, durante y después de la prueba a compresión simple (dosificación 240/2.4/arcilla).



Gráfica 3.8.18 Resistencia a la compresión simple, dosificación 240/arcilla contra 240/2.4/arcilla.

Se observa una resistencia mayor usando RoadCem, aun cuando las muestras ensayadas a los 14 días prácticamente se comportan de igual manera.

Considérese que el espécimen sin RoadCem ensayado a los 28 días presentaba una superficie muy propensa a desmoronarse, que pudo ser a causa de falta de humedad durante los días de curado.

e) Proporción: 260 kg cemento - 2.6 kg roadcem - 1m³ arcilla.

SIN ROADCEM:

(Ver tabla 3.8.19, Figura 3.8.20, Gráfica 3.8.23 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resistencia(kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	17,000	192.61	88.26	0.81	1.08	95.3
14	20,000	191.87	104.24	0.81	1.08	112.6
28	20,000	189.42	105.59	0.82	1.08	114.0

Tabla 3.8.19. Tabla de la resistencia a compresión simple, proporción: 260 kg cemento con arcilla.



Figura 3.8.20 Antes, durante y después de la prueba a compresión simple (260/arcilla).

CON ROADCEM:

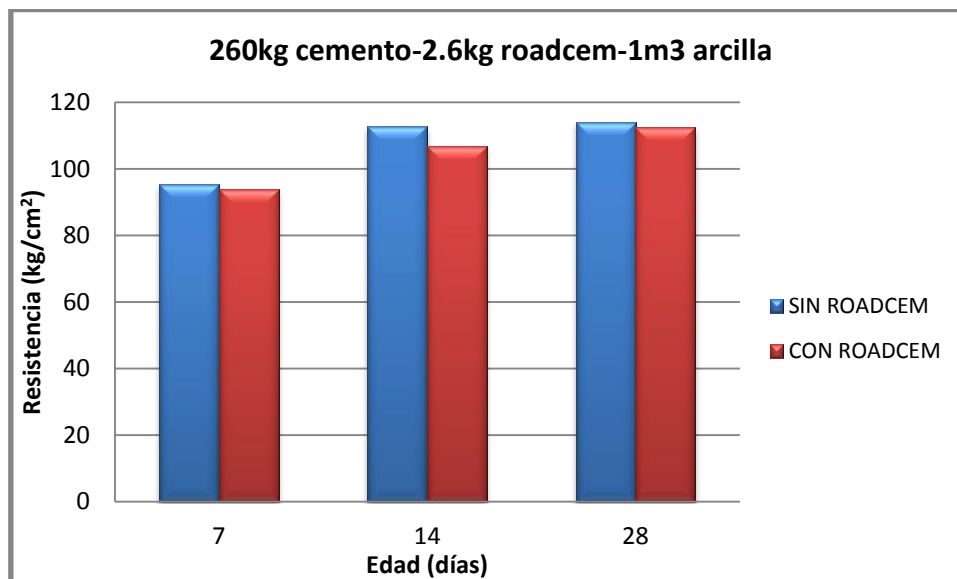
(Ver tabla 3.8.21, Figura 3.8.22, Gráfica 3.8.23 y Anexos).

Edad (días)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Resiste (kg/cm ²)	a/d	Factor Corrección	Resist. a Compresión Corregida (kg/cm ²)
7	16,800	193.1	87	0.81	1.08	94.0
14	19,000	192.12	98.9	0.81	1.08	106.8
28	20,000	192.12	104.1	0.81	1.08	112.4

Tabla 3.8.21 Valores de la resistencia a compresión simple, proporción: 260 kg cemento, 2.6 kg RoadCem y arcilla.



Figura 3.8.22 Antes, durante y después de la prueba a compresión simple (dosificación 260/2.6/arcilla).



Gráfica 3.8.23 Resistencia a la compresión simple, dosificación 260/arcilla contra 260/2.6/arcilla.

En esta gráfica no se tiene una diferencia notable entre usar o no el aditivo estabilizante, lo que por sentido común nos lleva a que bajo esta dosificación es preferible usar solo cemento como material estabilizante.

A continuación se presentan micrografías que con el apoyo del Centro de Investigaciones Metalúrgicas se obtuvieron en el microscopio de barrido (Fig. 3.8.24, Fig. 3.8.25 y Fig. 3.8.26), donde puede verse la comparativa de las estructuras microscópicas de la arcilla, el uso de cemento, y adicionando RoadCem.

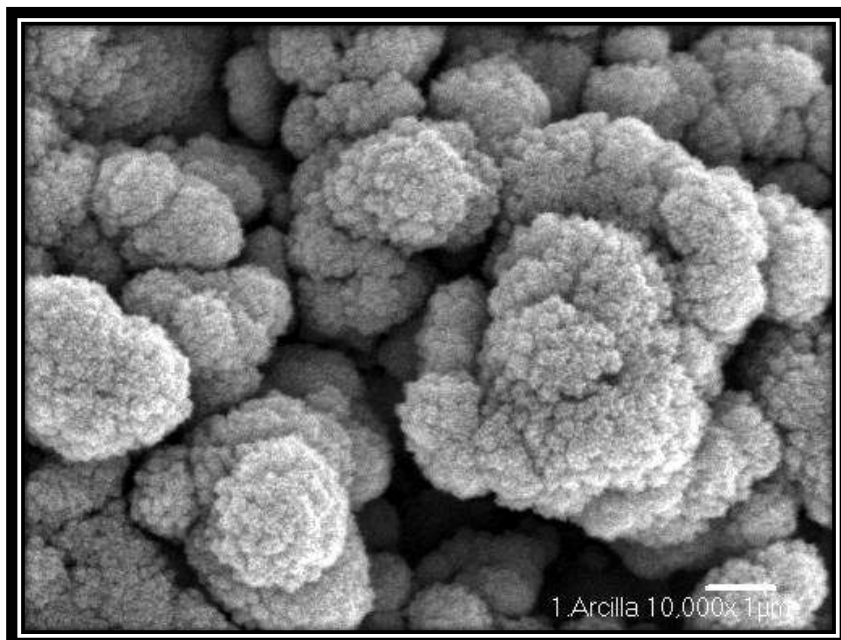


Fig. 3.8.24 Micrografía Arcilla.

Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

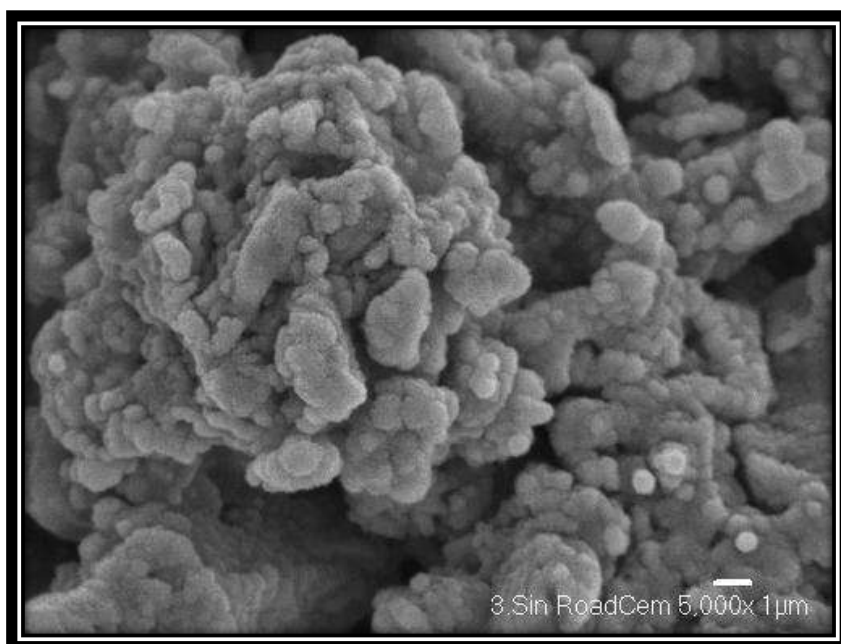


Figura 3.8.25 Micrografía arcilla más cemento.

Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

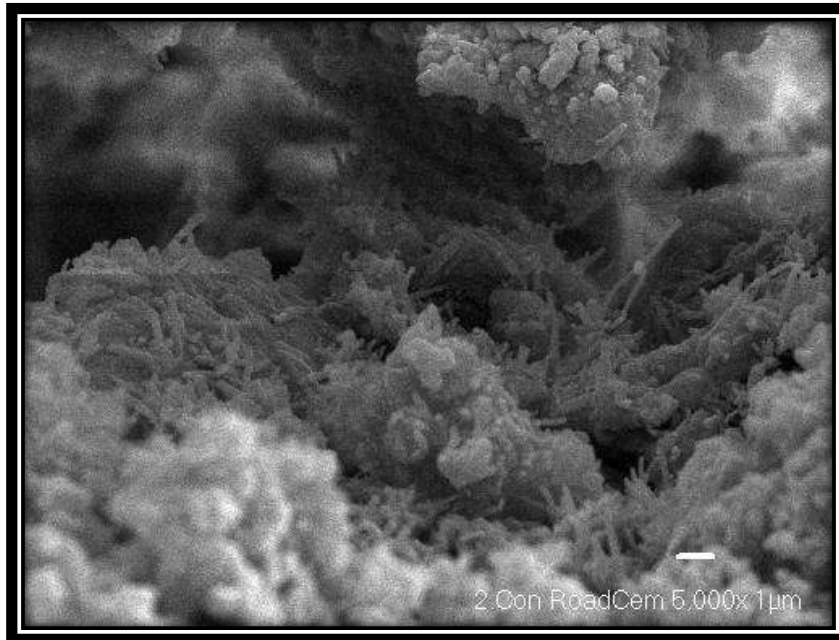


Figura 3.8.26 Micrografía arcilla/cemento/RoadCem.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

Factibilidad Económica:

El siguiente análisis es elaborado considerando que tanto para la opción de estabilizar el suelo o de optar por una capa de calidad de base hidráulica, se requieren actividades similares en lo referente al tendido, mezclado y compactado de ambos materiales. Por lo que solo se hará énfasis del costo del material más el costo por acarreo (de ser el caso).

El costo del aditivo RoadCem es de 22€ por kg, lo que convertido a pesos mexicanos nos da cerca de \$ 415.58 por kg (tomando en cuenta que 1€ = \$18.89).

Las máximas resistencias que se obtuvieron con las distintas dosificaciones se presentan a continuación (Tabla 3.8.27).

Dosificación Cemento/RoadCem	Resistencia kg/cm ²	
	Sin RoadCem	Con RoadCem
180/1.8	108.3	95.6
200/2.0	79.8	112.4
220/2.2	118.2	100.6
240/2.4	105.8	109.1
260/2.6	114.0	112.4

Tabla 3.8.27 Resistencias máximas obtenidas en las distintas dosificaciones.



En base a los resultados de la tabla anterior y aunque de entrada es claro que para las muestras con resistencias sin RoadCem son mayores a aquellas en las cuales si se utiliza el aditivo, resulta más económico utilizar únicamente cemento como agente estabilizador, por lo que para hacer un análisis práctico, se va a considerar la máxima resistencia obtenida con RoadCem (dosificación 200/2.0/arcilla) y comparar el costo contra una resistencia similar usando solo cemento (dosificación 260/arcilla).

Tenemos que para obtener 1 m³ de suelo estabilizado con RoadCem se requiere:

Materiales	Cantidad	\$/kg.	Importe
Cemento	200	\$ 2.00	\$ 400.00
RoadCem	2	\$ 415.00	\$ 830.00
Total			\$ 1,230.00

Tenemos que para obtener 1 m³ de suelo estabilizado solo con cemento se requiere:

Materiales	Cantidad	\$/kg.	Importe
Cemento	260	\$ 2.00	\$ 520.00
RoadCem	0	\$ 415.00	\$ -
Total			\$ 520.00

Podemos observar que la diferencia en costo es considerablemente mayor, que se tendría que gastar más del doble utilizando el aditivo y la resistencia que se obtiene es muy similar, y aun cuando en la dosificación con solo cemento se requieren 60 kilogramos adicionales, tenemos que estabilizar el suelo con solo cemento resulta mucho más económico.

Ahora consideremos el análisis de emplear una capa con calidad de base hidráulica en lugar de optar por estabilizar el suelo:

Actualmente el costo aproximado únicamente del material para base hidráulica es de \$120.00, adicionalmente el acarreo en el primer kilómetro es de \$6.50 y en los kilómetros subsecuentes de \$4.50.

De esta manera tenemos que el precio final del material para base hidráulica lo determina la distancia de acarreo, por lo que podemos expresar su costo de la siguiente manera.

$$\$BaseH. = 120 + 6.5 + 4.5 * D$$

Donde:

D es la distancia existente entre el banco de material y el lugar de la obra.



Si tomamos como referencia el resultado del costo por m³ de material estabilizado con cemento más RoadCem, tenemos que su precio es de \$1,230.00; sustituyendo este valor en la fórmula anterior como el costo del material y despejamos el valor de la distancia (*D*) máxima que debe haber entre el sitio de la obra y el banco de material para que sea de igual costo estabilizar el suelo o incorporar una capa de base hidráulica, resulta lo siguiente.

$$1230 = 120 + 6.5 + 4.5 * D$$

$$D = 244 \text{ km}$$

Lo que quiere decir que se justificaría estabilizar el suelo en la dosificación 200/2.0 de cemento y aditivo respectivamente, para la arcilla en estudio, sólo si la distancia al banco de material fuese mayor a 244 km.



4.- CONCLUSIONES.

Que las carreteras han sido el principal detonador del desarrollo de las civilizaciones y que actualmente juegan un papel muy importante en la vida diaria de las personas, ya que es a través de estas que se puede tener acceso a servicios de salud, educación y trabajo, entre otros; además de ser el medio por el cual se mueve la mayor parte del transporte de pasajeros y de carga.

Mediante la estabilización de suelos podemos hacer uso del material que se encuentra en el sitio aunque su calidad sea no deseable en construcción, teniendo en cuenta que su comportamiento estará dado en función de la plasticidad y el contenido de materia orgánica principalmente. Todo esto en beneficio de no tener que explotar bancos de material y el impacto al medio ambiente que ello conlleva.

El RoadCem es un aditivo mejorador del cemento, compuesto principalmente de Cloro, Magnesio, Calcio, y en cantidades pequeñas contiene Potasio, Aluminio y Silicio, el cual al entrar en contacto con el agua propicia la formación de cristales que ocupan espacios vacíos reduciendo la porosidad e incrementado la resistencia de su estructura interna.

El suelo de los alrededores de C.U. es una arcilla de alta plasticidad que se puede encontrar frecuentemente en la ciudad de Morelia, sobre todo en la zona de valle, debido a que se formó por un proceso de depósito lo cual lleva a tener suelos con estas propiedades.

De acuerdo a la variación en las dosificaciones no se pudo observar claramente un aumento o disminución en la resistencia al utilizar el aditivo a dosificaciones menores y mayores que las recomendadas por el fabricante de acuerdo al tipo de suelo.

En base a los resultados de resistencia a la compresión simple y el costo que implica la utilización de este aditivo, no se puede determinar como factible la estabilización del suelo en estudio a menos que el material de banco con calidad de base hidráulica se encontrara a más de 244 km. de distancia de la obra.

Como conclusión general, después del análisis de las variables que se han considerado en este trabajo, no podemos decir que se justifique el uso del estabilizador geológico desde el punto de vista técnico ni desde el punto de vista económico. Al menos no para el material de este estudio.



5.- BIBLIOGRAFÍA.

Juárez, E. y Rico, A., “*Mecánica de Suelos*”, Tomo 1, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, editorial Limusa, 2005.

Reyes, Cal y Mayor y Cárdenas, James, “*Ingeniería de Tránsito*”, Fundamentos y Aplicaciones, editorial Alfaomega, 2007.

Crespo V., Carlos, Mecánica de suelos y cimentaciones, Editorial Limusa, 2004.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-1-02/03, “*Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*”.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes Manual M-MMP-1-06/03, “*Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*”, 2003.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-1-01/02, “*Materiales para Terraplén*”, 2002.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-1-02/02, “*Materiales para Subyacente*”, 2002.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-1-03/02, “*Materiales para Subrasante*”, 2002.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-4-02-001/04, “*Materiales para Subbases*”, 2004.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-4-02-002/04, “*Materiales para Bases Hidráulicas*”, 2004.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-4-02-003/04, “*Materiales para Bases Tratadas*”, 2004.

Rico, A. y del Castillo, H., “*La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*”, volumen 2, Editorial Limusa, 2005.

Rico, A. y del Castillo, H., “*La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres*”, volumen 1, Editorial Limusa, 1982.

Pérez, N., Garnica, D., Rangel, D., Aguado, E., Publicación bimestral de Divulgación Externa , “*Comportamiento de una Arcilla Estabilizada con Cemento*”, Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Querétaro, 2011.



Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-2-02-001/02, “*Calidad del Cemento Pórtland*”, 2002.

M. Das, Braja, “*Principios de Ingeniería de Cimentaciones*”, editorial ThomsonLearning, 2001.

National Lime Association Lime, Boletín 326, “*Estabilización y Modificación con Cal*”, Enero 2004.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma N-CMT-4-03-001/02, “*Cal para Estabilizaciones*”, 2002.

De la Roij, R., PowerCem Technologies, “*Roadcem, La Carretera del Futuro*”, 2008.

PowerCem Technologies, “*Manual de Laboratorio de Roadcem*”, 2008.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-1-01/03, “*Muestreo de Materiales para Terracerías*”, 2003.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-1-03/03, “*Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras*”, 2003.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-1-07/07, “*Límites de Consistencia*”, 2007.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-1-09/06, “*Compactación AASHTO*”, 2006.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Manual M-MMP-2-02-058/04, “*Resistencia a la Compresión Simple de Cilindros de Concreto*”, 2004.

Domínguez, José y Schifter Issac, “*Las arcillas: El barro noble*”, Editorial Fondo de Cultura Económica, México, 1995.

Bravo, Ernesto y Cornejo, Antonio, “*cemento portland*”, tomado de la página web: http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf, última visita Agosto de 2011.

6.- ANEXOS.

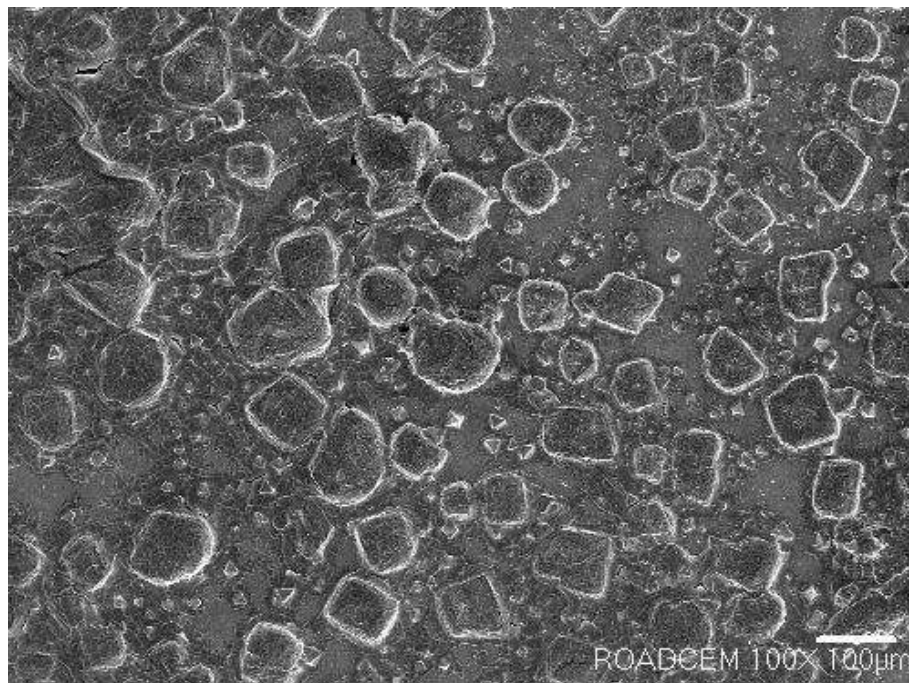


Figura 6.1 Micrografía de RoadCem 100X100µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

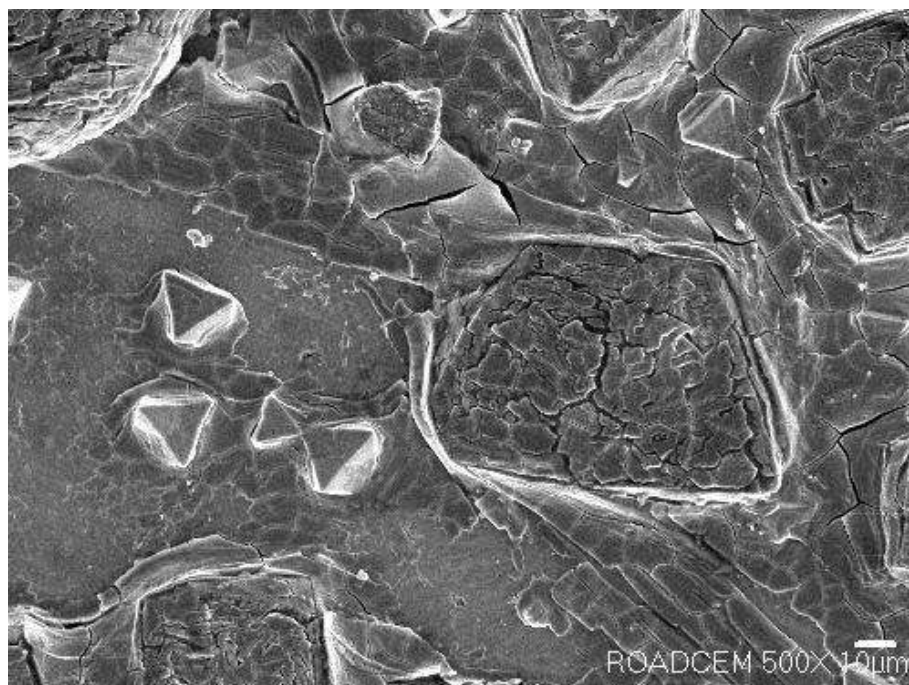


Figura 6.2 Micrografía de RoadCem 500X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

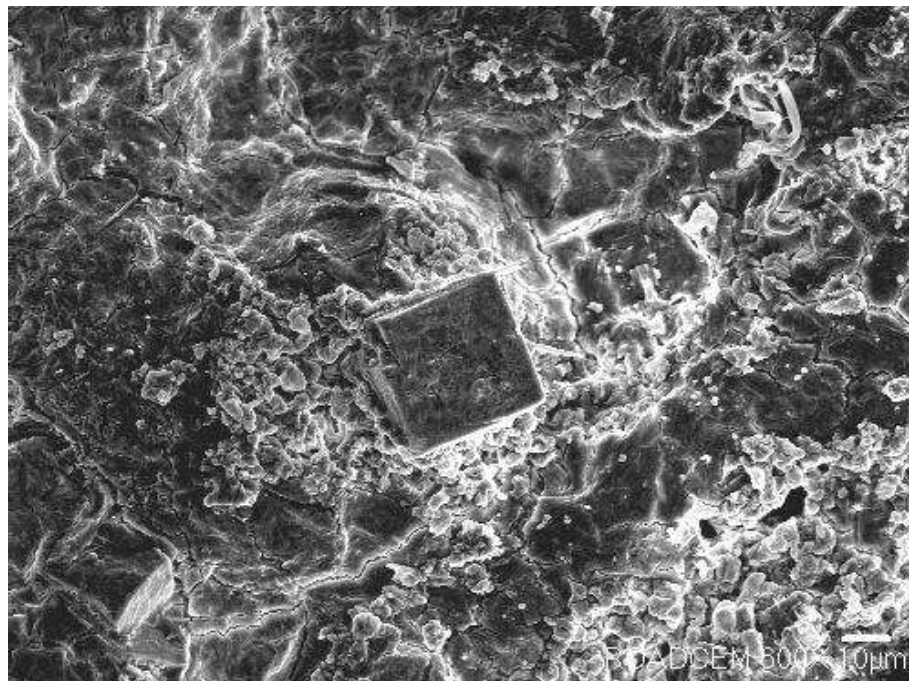


Figura 6.3 Micrografía de RoadCem 600X10μm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

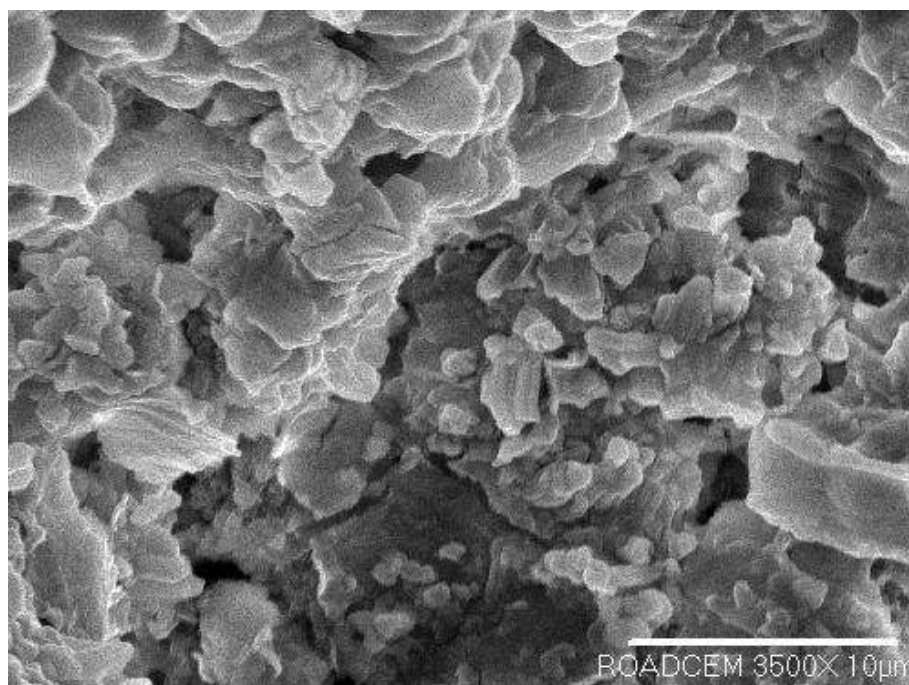


Figura 6.4 Micrografía de RoadCem 3500X10μm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

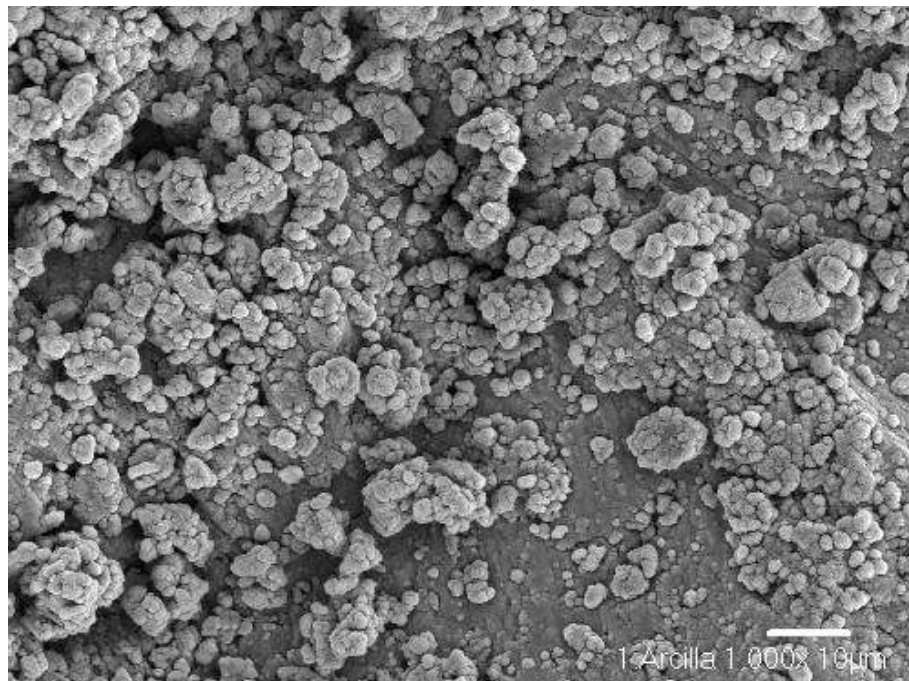


Figura 6.5 Micrografía de Arcilla 1,000X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

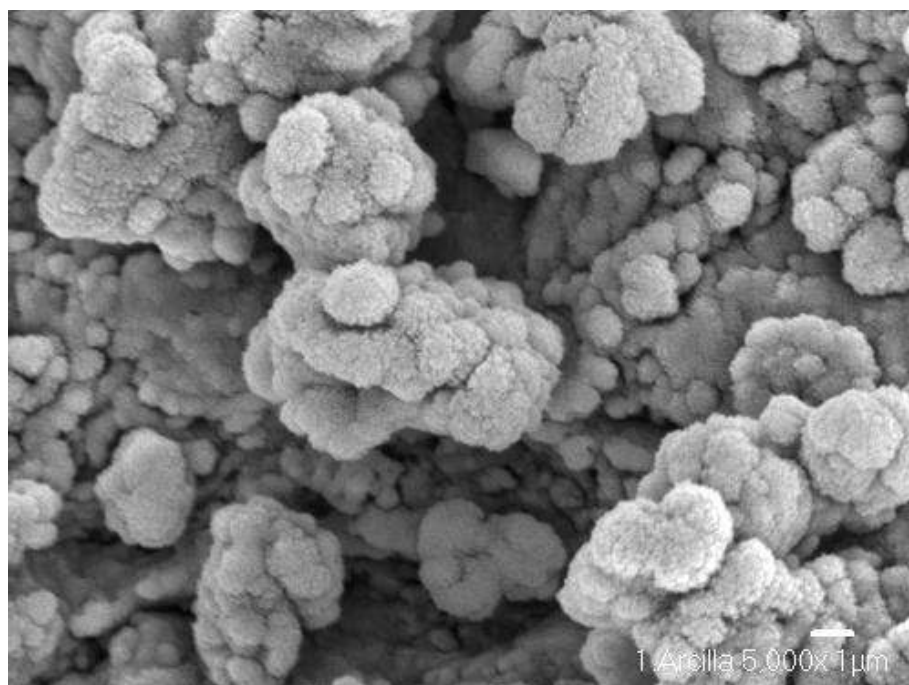


Figura 6.6 Micrografía de Arcilla 1,000X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

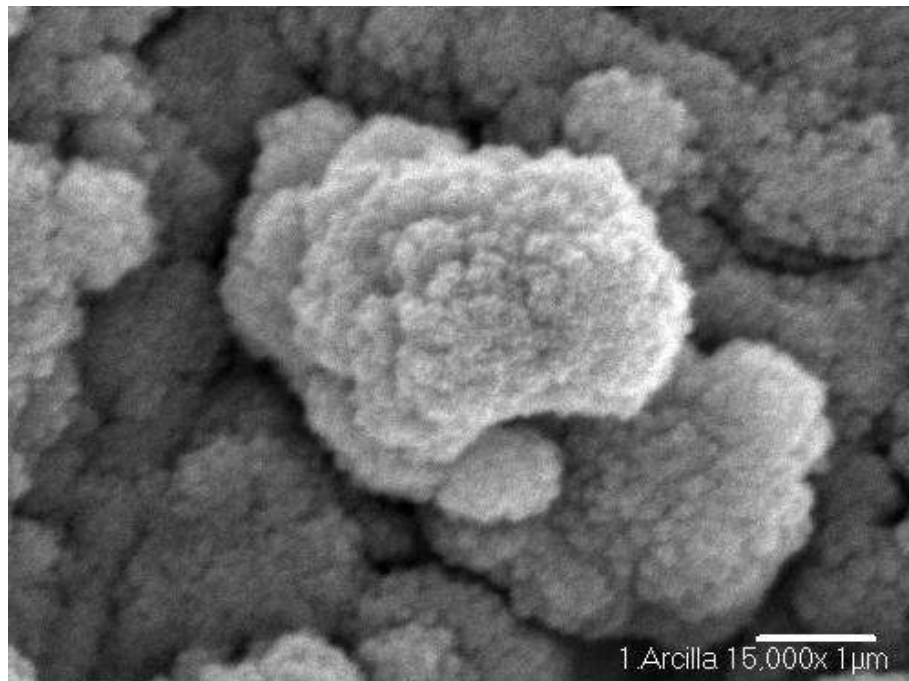


Figura 6.7 Micrografía de Arcilla 15,000X1µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

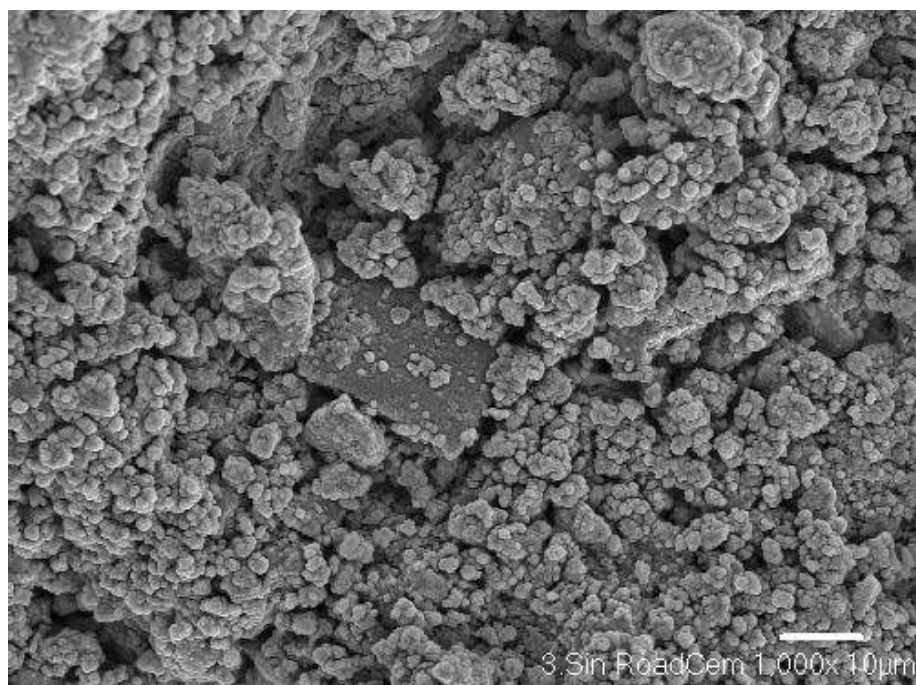


Figura 6.8 Micrografía de arcilla con cemento 1,000X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

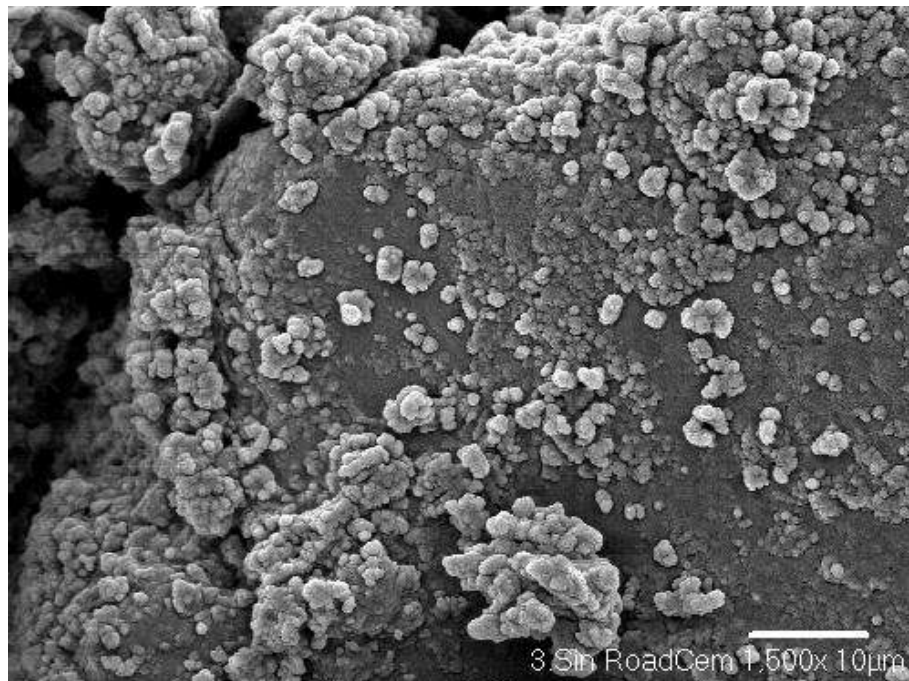


Figura 6.9 Micrografía de arcilla con cemento 1,000X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

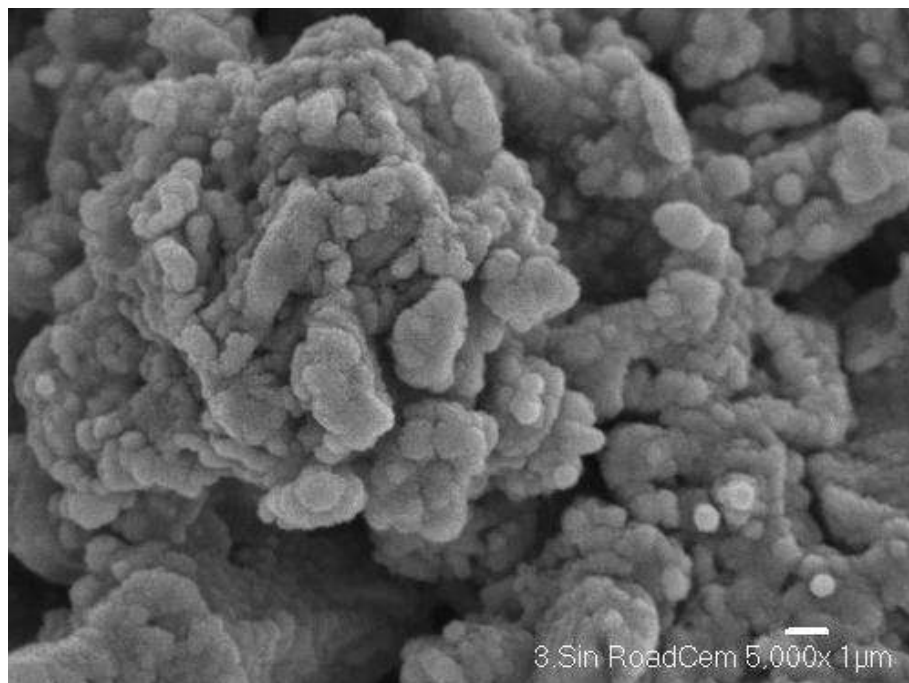


Figura 6.10 Micrografía de arcilla con cemento 1,000X10µm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

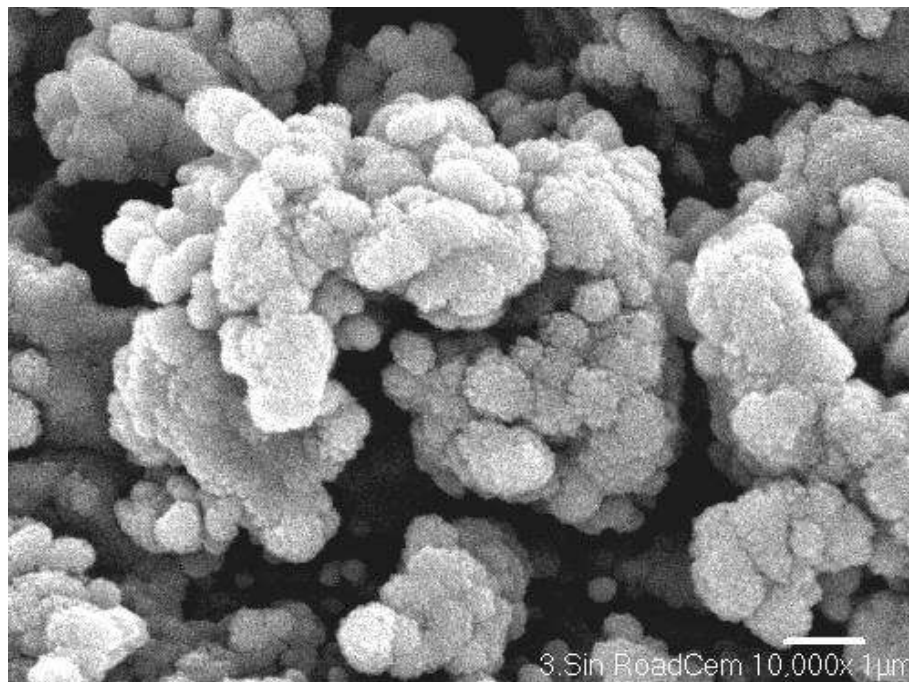


Figura 6.11 Micrografía de arcilla con cemento 1,000X10μm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

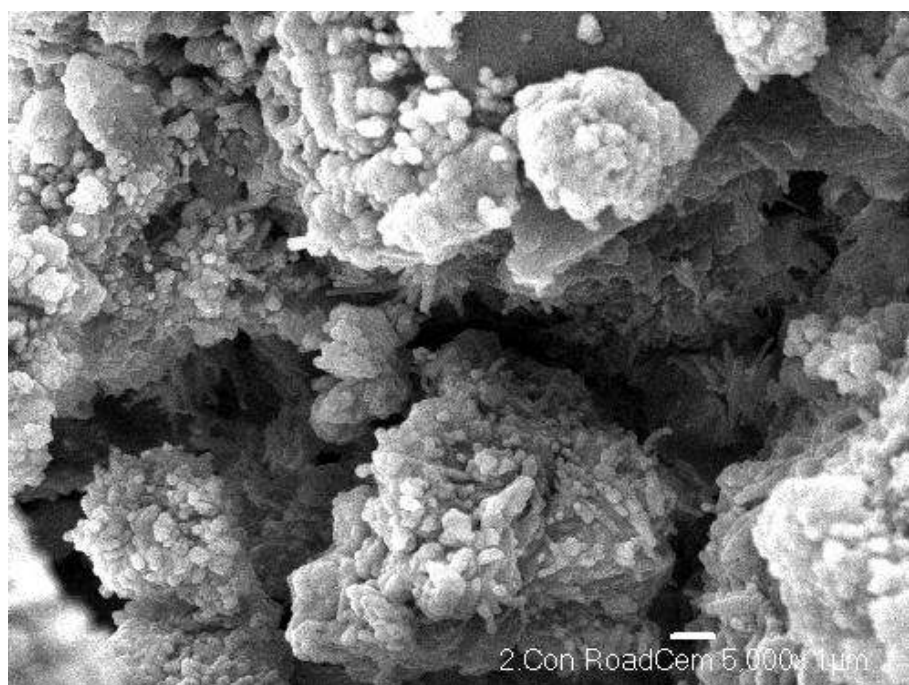


Figura 6.12 Micrografía de arcilla con cemento y roadcem 1,000X10μm.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

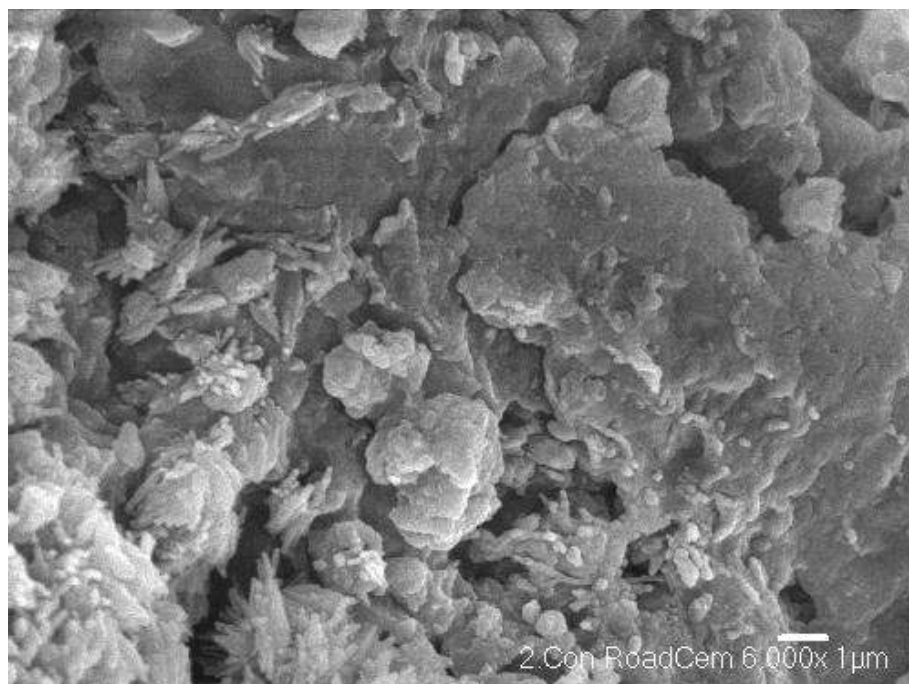


Figura 6.13 Micrografía de arcilla con cemento y roadcem 6,000X1 μ m.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

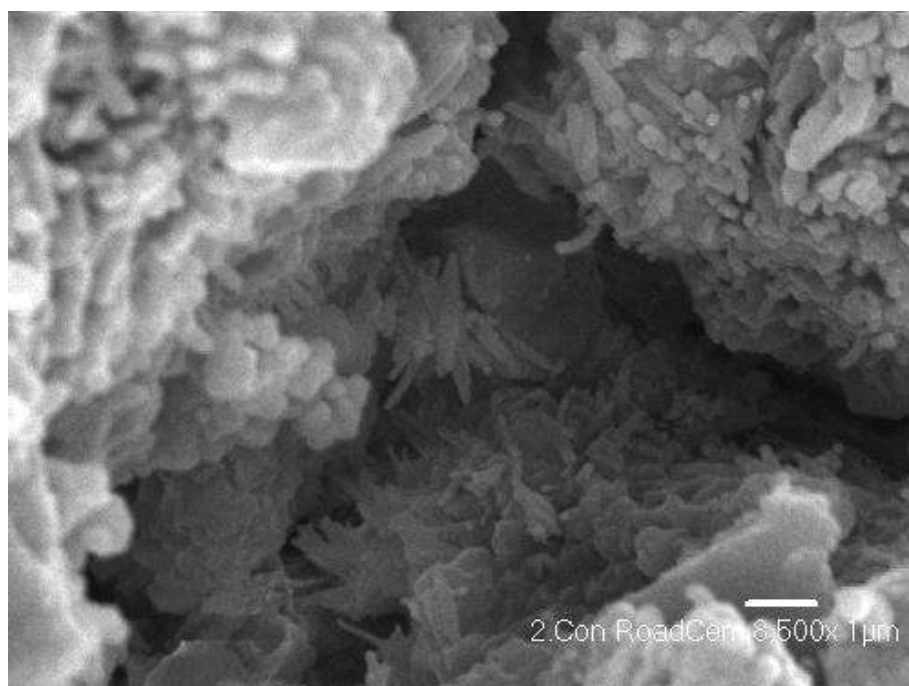


Figura 6.14 Micrografía de arcilla con cemento y roadcem 8,500X1 μ m.
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

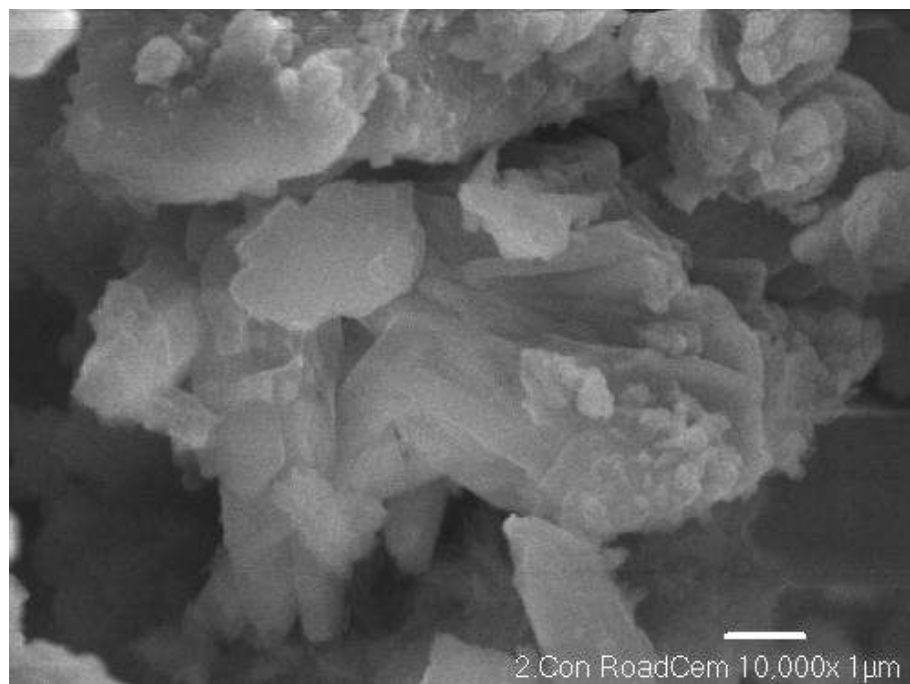


Figura 6.15 Micrografía de arcilla con cemento y roadcem 10,000X1 μm .
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.

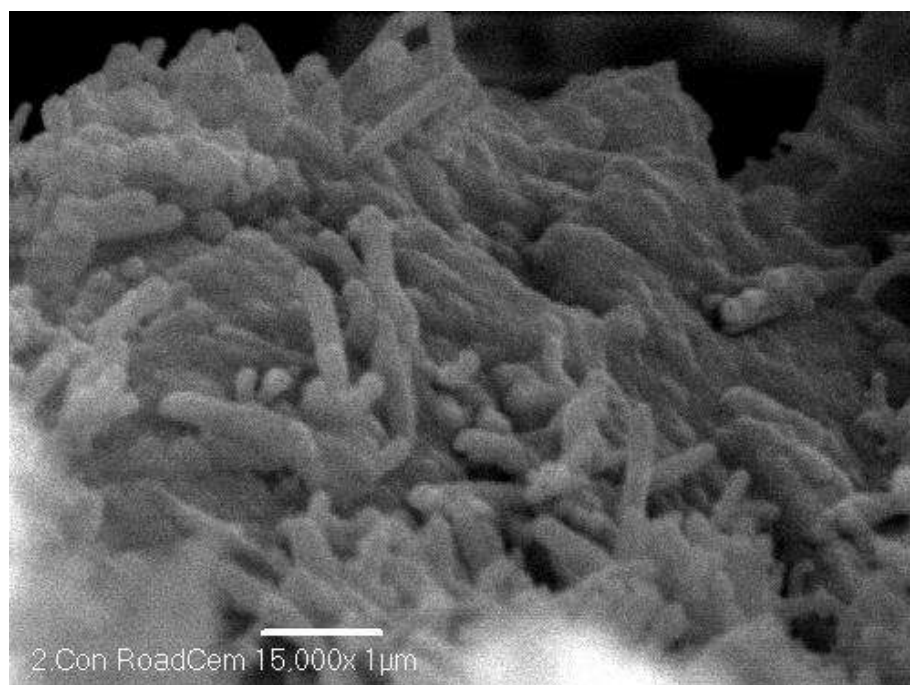


Figura 6.16 Micrografía de arcilla con cemento y roadcem 15,000X1 μm .
Fuente: Propia, con la colaboración del Laboratorio de Metalurgia de la U.M.S.N.H.