



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Departamento de Ingeniería Civil

**ESTABILIZACION DE AGRGADOS PETREOS DE BANCO
DE MATERIAL, MEDIANTE CEMENTO PORTLAND.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOSE LUIS RODRIGUEZ ARREOLA

CD. OBREGON, SON.

ABRIL DEL 2005

DEDICATORIAS

A DIOS

Por haberme dado la vida, fortaleza día con día y brindado la salud para llegar a este momento en mi formación como profesionista, por brindarme la capacidad para desarrollarme como persona, por eso mil "Gracias".

A MIS PADRES

José Manuel Rodríguez Fierro y María del Pilar Arreola Félix por ser mi guía en mi formación educativa, darme el apoyo para continuar con mis estudios, por permanecer unida la familia, por ser los mejores padres que Dios me ha enviado, a ti papá por que aunque no demuestres lo que sientes se que me quieres muchísimo, me aprecias y te sientes orgulloso de mi, y a ti mamá por que día con día me enseñas el camino indicado, me apoyas y me demuestras tu humildad y tu cariño hacia mi, por ser un par de padres ejemplares "Gracias", los amo, los quiero y me siento muy feliz por el logro que les he brindado.

A MIS HERMANOS

Carlos Alberto Rodríguez Arreola y María Guadalupe Rodríguez Arreola, por brindarme el cariño, ayuda, apoyo, y yo como hijo mayor poder ser el ejemplo para que ustedes salgan adelante y le demuestren a mis padres que también pueden obtener el logro de ser profesionistas, yo estaré con ustedes para apoyarlos y escucharlos todo la vida, además quiero agradecer a mi hermano, ya que el me ayudo en la realización de mis pruebas de laboratorio, aun teniendo tareas y otras ocupaciones me presto su ayuda, "Gracias, los amo y los quiero muchísimo".

A MI NOVIA

Ericka Yedith Romero Peraza por brindarme el amor, la ayuda, y orientarme para que terminará con mis estudios, por que sin tu ayuda pienso que todavía no hubiera terminado con mi carrera, gracias por que estas día con día en mi vida dándome apoyo, por ser mi amiga y sobre todo por seguir a mi lado, por todo esto mil "Gracias, y recuerda que te amo, de aquí hasta el infinito (lo logramos juntos)"

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS

Por brindarme su comprensión, cariño y apoyo hacia mi culminación con mis estudios "Gracias".

José Luis Rodríguez Arreola

AGRADECIMIENTOS

A MI ASESOR

Luis Gerardo Herrera, por brindarme la ayuda para la realización de esta investigación y tenerme la confianza para terminar este proyecto, además darme un poco de su tiempo y para brindarme sus consejos y sugerencias de esta investigación, muchas "Gracias".

A MIS REVISORES

Ing. Dagoberto López, Ing. Mauricio Ayala, M.C. José Dolores Beltrán, por las sugerencias brindadas para el mejoramiento de este proyecto y el seguimiento de esta investigación. "Gracias"

A MIS MAESTROS

A todo el Departamento de Ing. Civil por compartir su conocimiento, experiencias, apoyos y guiarme hacia mi profesión. "Gracias"

A MIS AMIGOS

Manuel (chapo), Cuata, Maridan (comadre), Oscar (compadre), Lupita, Beto, Chuy, Bianca, por creer en mí, por brindarme apoyo, confianza y sus buenos deseos hacia mí como persona. "Gracias".

A MIS COMPAÑEROS

Armando, Chon, Lolo, Omar, Sixto, Saúl, Sofía, Cinthia, Erick, Ángel, Joel, por compartir sus estudios con mí y vivir experiencias juntos en la carrera de Ing. Civil "Gracias".

José Luis Rodríguez Arreola

Í N D I C E

INDICE DE TABLAS.....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	iv
I. <u>INTRODUCCION</u>	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	5
1.3 Justificación.....	8
1.4 Objetivo General.....	9
1.5 Objetivos Específicos.....	10
1.6 Delimitaciones.....	10
II. <u>MARCO TEORICO</u>	11
2.1 Estabilización de Suelos.....	13
2.2 Suelo.....	13
2.3 Cemento Pórtland.....	14
2.4 Agua.....	17
2.5 Bancos de Materiales.....	18
2.6 Métodos de Muestreo.....	19
2.7 Métodos de Estabilización de Suelos.....	20
2.7.1 Estabilización de suelos mediante su mezclado con otros suelos	20
2.7.2 Estabilización de suelos mediante la adición de cal.....	21
2.7.3 Estabilización con Productos Asfálticos.....	22
2.7.4 Estabilización con Sales.....	24
2.7.5 Estabilización con Ácidos Inorgánicos.....	26

2.7.6 Tratamiento con Resinas o Polímeros.....	28
2.8 Estabilización de Suelos con Cemento Pórtland.....	29
2.8.1 Mecanismos de la Estabilización de Suelos con Cemento Pórtland	29
2.8.2 Proyecto de la Estabilización.....	30
2.8.3 Suelo – Cemento.....	31
2.8.4 Principales usos del suelo-cemento.....	32
2.8.5 Principales Ventajas.....	33
2.8.6 Principales Desventajas.....	35
2.8.7 Suelos Recomendados para la Estabilización.....	36
2.8.7 Procedimiento de Construcción.....	38
III. <u>METODOLOGIA</u>	45
3.1 Planteamiento del Problema	45
3.2 Instrumentos.....	46
3.3 Procedimiento de Muestreo.....	47
3.4 Procesamiento de la Información.....	48
3.5 Programación de las Pruebas de Laboratorio.....	48
3.5.1 Determinación del Peso Volumétrico seco suelto.....	50
3.5.2 Determinación de la Granulometría.....	50
3.5.3 Límites de Atterberg (<i>IP, LL, LP, CL</i>)	51
3.5.4 Valor Relativo de Soporte (<i>V.R.S.</i>)	54
3.6 Pruebas especialmente diseñadas para el suelo-cemento.....	56
3.6.1 Prueba de Compactación para suelo-cemento.....	56
3.6.2 Prueba de resistencia a la compresión simple para suelo-cemento	59
3.6.3 Método de curado para especímenes de suelo-cemento.....	60
3.7 Método de diseño de las mezclas.....	61
IV. <u>RESULTADOS</u>	65
4.1 Resultados.....	65
V. <u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	79
5.1 Conclusiones.....	79
5.2 Recomendaciones.....	82
BIBLIOGRAFIA.....	84

APENDICE A. Muestra la memoria de calculo del banco del km 9 “El Pueblito”.....	85
APENDICE B. Muestra la memoria de cálculo del banco del km 19 “Montaño”.....	94
APENDICE C. Muestra la memoria de cálculo del banco de la Criba Godoy.....	103
APENDICE D. Muestra la comparación de resultados de los 3 bancos de mate- riales.....	112
 ANEXOS.....	 117

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.3.1 Cantidades de cemento requeridas para varios tipos de suelos, PCA.....	16
--	----

INDICE DE FIGURAS

FIG. 1.1.1 Primeras fallas en la obra de la calle Guerrero debido a la expansión De las arcillas.....	4
FIG. 1.2.1 Croquis de localización de los bancos de materiales más demandados por las constructoras del municipio de Cajeme hoy en día.....	7
FIG. 2.1.1 Usos, propiedades y aplicaciones en obra de suelo-cemento.....	12
FIG. 2.5.1 Banco de material del km 9 llamado “El Pueblito” carretera Esperanza- Hornos.....	19
FIG. 2.8.1 Relleno de material base para la calle 1300 y 9 en Pueblo Yaqui.....	39
FIG. 2.8.2 Rompimiento de los sacos de cemento mediante Motoconformadora, retiro de los sacos, y por ultimo homogenización de suelo-cemento en húmedo.....	40
FIG. 2.8.3 Riego ligero a todo lo ancho del camino para obtener mejor homogeni- zación.....	41
FIG. 2.8.4 Jalón de sacos de cemento y colocación de los sacos a distancias re- queridas.....	42
FIG. 2.8.5 Compactación con rodillo metálico vibratorio.....	44
FIG. 3.3.1 Muestras integrales de material acamellonado de los bancos del km 9 y 19.....	47
FIG. 3.5.2 Determinación Granulométrica, lavado por la malla 200, secado y agi- tado del material Menor.....	51

FIG. 3.5.4 Prensa para efectuar la prueba del VRS para materiales en estado natural y para suelo-cemento.....	55
FIG. 3.6.1 Adición del % optimo de cemento y mezclado en seco del suelo-cemento.....	56
FIG. 3.6.2 Adición del agua, mezclado en húmedo y papel húmedo para evitar pérdida de humedad....	57
FIG. 3.6.3 Compactación de la mezcla de suelo-cemento con % optimo de cemento y agua.....	57
FIG. 3.6.4 Extracción del espécimen del molde de compactación mediante gato hidráulico.....	58
FIG. 3.6.5 Maquina para la resistencia a la compresión para especimenes de suelo-cemento.....	59
FIG. 3.6.6 Colocación de cartón húmedo sobre el espécimen de suelo-cemento.....	60
FIG. 3.6.7 Colocación del espécimen sobre bolsas térmicas.....	60
FIG. 3.6.8 Saturación por inmersión en agua durante 4 hrs. Antes de ser ensayados.....	61

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar el porcentaje óptimo de cemento Pórtland que deberá agregarse a un suelo extraído de bancos de materiales de Municipio de Cajeme, que serán utilizados para bases y sub-bases en estructuras y caminos, esto se hará por medio del Método Corto proporcionado por la PCA (Pórtland Cement Association).

El material y método utilizado en esta investigación se basó en lo siguiente:

- Localización de 3 bancos de materiales en base a información proporcionada por constructoras con más demanda del municipio, se enlistan a continuación:
 - ⇒ Banco de materiales; ubicado en el Km-9 de la carretera Esperanza-Hornos, con desviación izquierda 1.5 km, es llamado “El pueblito”.
 - ⇒ Banco de materiales; ubicado en el Km-19 de la carretera internacional Cd. Obregón-Guaymas, con desviación izquierda a 1.0 km.
 - ⇒ Banco de materiales; ubicado en el km 4 de la carretera Providencia-El Portón, con desviación izquierda a 2.5 km “Criba Aarón Godoy”.
- Se obtuvieron muestras de suelo representativos que se tomarán de cada banco de materiales serán de 2 cubetas de 19 lts cada una.
- Método de diseño de las mezclas (Método Corto de la Pórtland Cement Association).

Procedimiento:

- ⇒ Se determinó la granulometría del suelo extraído del banco de material mediante el análisis por mallas.
- ⇒ Se determinó el peso volumétrico del material retenido en la malla # 4.

- ⇒ Revisión que la granulometría cumpla con los requisitos establecidos por el Método Corto, ya que solamente se aplica a suelos arenosos.
- ⇒ El método corto tiene dos variantes la “variante A” para materiales que pasan totalmente la malla N° 4; y para los que se retienen en la malla N° 4 la “variante B”.
- ⇒ En esta investigación los resultados granulométricos obtenidos indicaron realizar el análisis con la variante “B” del Método Corto, desarrollando los siguientes pasos:
 1. Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando el Anexo 2.
 2. Mediante la fig. del Anexo 3 se calculo en porcentaje de cemento a agregar al suelo, en peso. Y se realizó el ensaye Proctor estándar con el contenido de cemento encontrado gráficamente.
 3. Con el máximo peso volumétrico encontrado en el ensaye Proctor se determinó nuevamente el contenido de cemento, en peso, empleando la fig. del Anexo 3.
 4. Con los resultados de ensaye Proctor anterior se fabricaron 3 especímenes para realizarse pruebas de resistencia a la compresión simple, a las edades de 3, 7 y 28 días de curado en húmedo y con la ayuda del Anexo 4, se determinó una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento

Los resultados obtenidos del Método Corto fueron los siguientes:

- ➡ Se analizo que de una manera rápida para obtener resultados sobre los diseños de mezclas de suelo-cemento, este método es totalmente eficaz, ya que el estudio sobre los 3 bancos, el suelo-cemento alcanzo resistencias por arriba de lo establecido por la PCA.
- ➡ Adicional a las pruebas realizadas para el método se determinaron los limites de consistencias de los suelos, además de la prueba del Valor Relativo de Soporte, que en esta ultima la PCA establece algunos rangos de resistencia para los suelos estabilizados con cemento, de los cuales los resultados obtenidos sobrepasaron esos rangos.

- ➡ Se establece que el Método Corto de la PCA es confiable para la obtención de resultados rápidos para los estudios realizados, que permitieron obtener los porcentajes óptimos de cemento para agregar a los bancos del municipio de Cajeme.

Las conclusiones a las que se llegó, fueron las siguientes:

- ➡ **“El Banco de material del km 9 (El Pueblito)”** resultó que con 4.5 % de cemento Pórtland alcanzó una resistencia a la compresión de 21.94 kg/cm² para cumplir a la edad de 28 días de curado.
- ➡ **“El Banco de material del km 19”** sucedió la misma situación que para el banco anterior mencionado solamente que para este banco resultó ser un 4.8 % de cemento Pórtland y alcanzó una resistencia a la compresión de 19.93 kg/cm² para cumplir a la edad de 14 días de curado.
- ➡ **“El Banco de material de la Criba Godoy”** resultó ser un 5.25 % de cemento Pórtland y alcanzó una resistencia a la compresión de 21.12 kg/cm² para cumplir a la edad de 7 días de curado.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El municipio de Cajeme comprende diferentes tipos de formaciones geológicas, específicamente el área de Cd. Obregón está sustentada sobre un delta, el cual se encuentra en un estado de penillanura, los suelos que se encuentran generalmente dentro de esta ciudad son arcillas, limos y hasta arenas en algunos sectores, en cuanto a gradientes, cuenta con zonas de montañas en sus límites norte y noreste, las cuales generan grandes pendientes que convergen a esta ciudad, que van desde 0.14% hasta 0.36% (pendientes determinadas de la carta topográfica INEGI, escala 1:50,000).

El tipo de suelo que con mas frecuencia se encuentra en Cd. Obregón son de tipo limo arcilloso, limo arenoso y arenoso en diferentes clases, esto ha sido motivo de efectos y problemas presentados en obras civiles a causa de ellas, por mencionar algunos de estos problemas podemos citar: fallas de pavimentos, fracturas en muros, fallas en banquetas y guarniciones y problemas en redes de alcantarillado y drenaje,

lo que hace importante e indispensable realizar estudios estratigráficos en el área a construir, ya que no se puede saber con precisión el grado de erosión y tipo de suelo que pueda representar el estrato superficial (1).

En diversas notas históricas que tratan sobre el suelo-cemento se ha manifestado frecuentemente que un primer acontecimiento importante fue su pronta aplicación como material para la construcción de pisos y muros, si bien en aquel entonces se trabajaba en forma empírica. Mas adelante otro acontecimiento que mereció especial atención fue la utilidad de su uso en la construcción de caminos, sobre todo cuando había problemas serios de escasez de bancos de materiales apropiados.

Varios años después de sus albores, tuvo bastante relevancia el hecho de que, durante la segunda guerra mundial, se probó que utilizando la tecnología adecuada era posible construir pistas de aterrizaje de magnífica calidad para el servicio de los aeropuertos, disminuyendo substancialmente el tiempo de su construcción tradicional. Esto es, utilizando el suelo-cemento se podían construir económicamente excelente pavimentos para soportar grandes cargas en muy poco tiempo. También, previo a su etapa de consolidación definitiva, debe considerarse como acontecimiento importante y afortunado el notable impulso y desarrollo de los centros de investigación tecnológica para su cabal estudio primero en Norteamérica, poco después en Europa y la U.R.R.S. y finalmente en muchos otros países.

En general, se considera que la aplicación del suelo-cemento empezó a estudiarse en forma metódica y científica en la década de 1910 a 1920, sin embargo, existen muchos antecedentes en la literatura que muestran que su utilización en pisos y muros comenzó desde mucho antes. Parece ser que la utilización del suelo-cemento en forma científica, esto es con metodología y técnicas apropiadas, se originó casi simultánea e independientemente en los E.U.A. e Inglaterra.

En Inglaterra, en el año de 1917, el Ing. H. E. Brooke-Bradley aplicó exitosamente una mezcla de cemento con suelos arcillosos en la construcción de unas carreteras

cerca de la población de Salisbury Plain en el Condado de Wiltshire. En el año de 1921 en el estado de California, E.U.A., se uso el suelo-cemento para estabilizar suelos arcillosos. Posteriormente, en el año de 1932, el Departamento de Caminos Estatales de Carolina del Sur, E.U.A., creo laboratorios para su investigación e impulso científicamente su estudio. Ya con sólidas bases, en 1935, se hizo la primera construcción supervisada de suelo-cemento con técnica moderna, cerca de Jonsonville, South Carolina.

Resulta interesante conocer el hecho que finalmente lo impulsó y fue que durante la segunda guerra mundial las fuerzas militares alemanas utilizan eficientemente el suelo-cemento para una muy rápida construcción de 130 aeropuertos en Europa.

Un tiempo después de pasada la guerra no dejó de admirar a los ingenieros el sorprendente buen estado que guardaban las pistas a pesar de uso constante y de los intensos bombardeos a que fueron sometidas, por lo que se consideró muy conveniente seguir aprovechando, pero ahora casi exclusivamente para la construcción de obras civiles.

El primer uso del suelo-cemento en E.U.A. como material de protección de taludes para presas de tierra y enrocamiento fue una sección de prueba de la presa Bonny cerca de New Hale, Colorado, en 1951. Conviene aclarar que inicialmente se le dio el nombre de suelo-cemento al material utilizado y después indistintamente en de rolacreto y también el de concreto rodillazo, sin que existiera una definición aclaratoria satisfactoria que los distinguiera.

En México, el suelo-cemento ha sido muy poco utilizado en las vías terrestres y los aeropuertos, campos donde ya ha demostrado ampliamente sus posibilidades, a pesar de que existen condiciones muy desfavorables para su uso en gran escala. Por otra parte, en la construcción de muros y pisos ha sido usado extensamente en todas las regiones del país, usando casi exclusivamente suelos predominantes arenosos.

También se presentan muchas otras alternativas para su aplicación que desafortunadamente no se aprovechan cabalmente (6).

Hoy en día, las ciudades del país, presentan algunos problemas referentes al comportamiento de los suelos, los cuales al ser utilizados en la pavimentación de calles, así como estructuras de todo tipo, vienen a ocasionar problemas de expansión, de levantamientos de las estructuras, los cuales ocasionan grietas a estas mismas, y no se está hablando de pequeñas grietas, sino de grandes, por lo que es necesario volver a construir e implica un gasto doble para las constructoras o compañías a cargo de las obras.

Lo que anteriormente se dijo adjunto con algunos factores climáticos como la lluvia y la humedad, ocasionan muchos problemas para las obras civiles. Por ejemplo; la obra realizada por la calle Guerrero, la cual en el tramo comprendido de la Quintana Roo y la Michoacán se presentó una fuerte grieta. Esto fue debido a que se presentaron las lluvias y se presentaron registros de altas temperaturas. El representante de Ingenieros Civiles los cuales estaban a cargo de la obra explicó que al momento de colar la losa las altas temperaturas podrían haber dañado el material.

En conferencia de prensa se explicó que las grietas se encuentran localizadas en un tramo junto al conducto pluvial, las cuales se deben a la expansión de arcillas junto al conducto, la cual fue empujada por el agua o humedad que había en el tramo (7) (Fig. 1.1.1).



Fig. 1.1.1. Fallas en la obra de la calle Guerrero debido a la expansión de las arcillas.

Por todo lo anterior y con el objetivo de obtener los mejores resultados nace la propuesta de realizar una investigación referente a determinar el porcentaje óptimo de cemento Pórtland que deberá agregarse a un suelo extraído de bancos de materiales de Municipio de Cajeme con mas demanda por parte de la constructoras o compañías a cargo de obras hoy en día los cuales serán utilizados para bases y sub-bases en estructuras y caminos, esto se hará por medio de pruebas de laboratorio. Con el fin de que las compañías puedan contar con la suficiente información acerca del método y que lo puedan emplear si es que así se desee.

Estudios realizados por la empresa LAMSYCO (Laboratorio de Mecánica de Suelos y Concreto) acreditado revelan que el suelo-cemento es una mezcla que hace que las bases o sub-bases sean muy rígidas, esto adquiriendo una resistencia enorme al poco tiempo de ser añadida para la estructura. Trabajos realizados por la empresa en cuanto a suelo-cemento es muy poco lo que se tiene y la información obtenida de los trabajos no se encuentra, para llevar a cabo un chequeo de cómo se comportaron las estructuras en la ciudad debido a que los trabajos se realizaron en 1993. Lo que se dice es que se realizó un terraplén para una maderera en el parque industria entrada carretera Cd. Obregón – Navjoa la cual por medio de los métodos de la PCA (Pórtland Cement Association) se adquirió que se tenía que agregar un 3% de cemento, lo cual al momento del mezclado con suelo y agua adquiriría una resistencia enorme en muy poco tiempo, por lo que los trabajos se realizar con mayor rapidez (5).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Surge la necesidad de esta investigación para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de banco que serán utilizados como estructuras de tierra (ejem.: bases de pavimentos, terraplenes, plataformas de obras grandes, etc.). En el Municipio se cuenta con material nativo del lugar muy problemático, el cual la mayoría de las

veces no es muy trabajable debido a la gran expansión que se presentan por los suelos en los lugares a construir, o simplemente por que se requiere realizar una obra de mayor magnitud, lo cual se recurre a traer material de banco con calidades mejores a la del terreno.

El material de banco a un teniendo mejores propiedades mecánicas que la del suelo nativo del lugar muchas de las veces no le es suficiente para controlar los esfuerzos transmitidos por las estructuras o simplemente no alcanzan a disminuir las expansiones de los suelos del lugar, lo cual tienden a ocasionar daños a las obras realizadas, algunos de estos daños suelen ser agrietamientos en caminos y viviendas, hundimientos de la estructuras debido a la mala calidad del suelo, baches en las calles e irregularidades del suelo que ocasionan el levantamiento de las estructuras. Estas deficiencias muchas veces son porque el constructor no conoce sobre las propiedades mecánicas que pueden presentar los suelos o simplemente porque no se tiene un buen uso del mismo.

Por tales motivos se presenta este trabajo, el cual consiste en determinar el porcentaje óptimo de cemento Pórtland que deberá ser agregado para la estabilización de un material extraído de bancos de materiales del Municipio de Céspedes, el cual será utilizado para bases y sub-bases de cualquier obra a proyectar. Este proceso traerá mejores resistencias de la estructuras de tierra que serán de beneficio para las edificaciones. Los bancos se escogieron en base a información proporcionada por constructoras del municipio y sobre todo por empresas que hoy en día se encuentran realizando obras de gran magnitud (Fig. 1.2.1).

Se pretende incrementar la resistencia y la capacidad de carga de los suelos de banco, además para tratar de controlar la expansión de los suelos en las terracería, lo cual mediante la estabilización con cemento se lograra, por medio de la estabilización con cemento Pórtland, el suelo que sea extraído de un banco cercano de menor calidad que de ser de un banco lejano pero de mejor calidad, podrá obtener el suelo las propiedades adecuada para la obra a realizar.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se realiza con el fin de que los empresarios o dueños de constructoras, tengan a la mano algunos conocimientos acerca de la calidad que pueden presentar los materiales de los diferentes bancos del Municipio de Cajeme al ser estabilizados con Cemento Pórtland, los cuales se emplean como bases y sub-bases en estructuras, las cuales pueden ser: Calles, Carreteras, Viviendas, Edificios, Presas, Puentes, Aeropuertos, etc.

Los beneficiados de la presente investigación serán los siguientes:

a) *La industria de la Construcción:*

Contará con la información necesaria por escrito, para poder consultar los procedimientos, equipos, pruebas y resultados necesarios para poder conocer la calidad que pueden adquirir los bancos de materiales del Municipio de Cájeme utilizados como base y sub-base en estructuras, los cuales serán estabilizados con un cierto porcentaje óptimo de cemento Pórtland. Además traerá múltiples beneficios en lo que concierne a lo económico, ya que con dicha estabilización se evitarán levantamientos del suelo debido a la expansividad, daños perjudiciales en las estructuras por agrietamientos.

También se reducirá los acarreos de materiales de bancos de mejor calidad, ya que los bancos más cercanos pero de menor calidad, podrán alcanzar la calidad adecuada y mejorará las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante la estabilización. Por último la estabilización aumentará la carga de soporte del suelo, lo que permitirá reducir los espesores de la cimentación de las estructuras, así como también disminuirá el tiempo de la obra.

b) El estudiante:

Serán de gran importancia toda la información escrita en este trabajo para el estudiante, ya que conocerá los procedimientos, pruebas y resultados que se pueden presentar mediante la estabilización de suelo con cemento Pórtland, para materiales de base y sub-base para las estructuras, extraídos de bancos de materiales del Municipio de Cajeme. Ellos podrán tener fácil acceso a la información, así como será fácil comprender y entender sobre todo el escrito.

c) El Municipio de Cajeme:

Con la información presentada, y con los resultados obtenidos sobre la estabilización con suelo-cemento Pórtland, el Municipio podrá hacerse de la utilización de este proceso para una mejoría en cualquier obra, la cual traerá un mejoramiento en las calles, edificios, viviendas que se pretendan realizar a futuro.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Determinar el porcentaje óptimo de cemento Pórtland que deberá agregarse a un suelo extraído de bancos de materiales de Municipio de Cajeme, que serán utilizados para bases y sub-bases en estructuras y caminos, esto se hará por medio de pruebas de laboratorio.

1.5. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Para alcanzar lo que se mencionó anteriormente se requieren ciertos objetivos específicos los cuales se enlistan a continuación:

- ✓ Recopilar información acerca de los bancos mas explotados en el Municipio de Cajeme para bases y sub-bases de obras.
- ✓ Muestreo de cada uno de los bancos de materiales.
- ✓ Determinar la calidad y propiedades del suelo, de cada uno de los bancos de materiales.
- ✓ Llevar a cabo las pruebas de suelo-cemento que proporciona IMCYC (Instituto Mexicano de Cemento y del Concreto A.C.).
- ✓ Elaborar tablas de resultados de los estudios realizados a los suelos estabilizados con cemento Pórtland.

1.6. DELIMITACIONES

El presente trabajo solamente abarcará el encontrar el porcentaje óptimo de Cemento Pórtland para estabilizar suelos de bancos de materiales del Municipio de Cajeme, empleados para bases y sub-bases de estructuras. Cabe mencionar que las pruebas proporcionadas por IMCYC (Instituto Mexicano de Cemento y del Concreto A.C.), pueden ser utilizadas para cualquier banco de material que se desee utilizar.

II. MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo tecnológico alcanzado por las sociedades modernas en las últimas décadas ha brindado la posibilidad de producir continuamente toda una serie de nuevos materiales que les permiten satisfacer sus incesantes requerimientos de construcción. Uno de esos materiales que ha logrado tener un amplio uso a partir de la década de los cuarenta es el producto endurecido de la mezcla compactada de suelo con cemento y agua, llamado suelo-cemento, cuyas bondades ingenieriles se han demostrado en la construcción de pequeñas y grandes obras en todo el mundo. El suelo-cemento es un material producto de una mezcla apropiada de suelo, cemento y agua, que se compacta y construye con determinadas técnicas y tiene un campo de aplicación muy amplio; es relativamente fácil de usar y los materiales que lo componen son económicos y muy abundantes.

El tratamiento del suelo con cemento ha sido considerado en las notas históricas de la ingeniería como una aportación importante al desarrollo tecnológico, principalmente porque permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción.



Fig. 2.1.1. Usos, propiedades y aplicaciones en obra de suelo-cemento.

Es por esto que durante la elaboración de los proyectos de obras se presentará frecuentemente la posibilidad de que mediante la aplicación de un tratamiento adecuado se logre cumplir con las normas especificadas y con ello se puedan aprovechar buena parte de los suelos cercanos, que de otra manera serían deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, y por lo tanto, de escasa utilidad. El poder usar bancos cercanos es una ventaja muy apreciada por los constructores, sobre todo cuando sea posible que con un relativo pequeño esfuerzo se pueda lograr un magnífico material con una substancial económica y un aumento en la rapidez de la construcción.

Las principales razones de la aplicación de los tratamientos con cemento a los suelos consisten, en primer término, en el hecho de que los suelos constituyen una inagotable fuente de materiales de construcción que se tienen a la mano y son un recurso renovable; evidentemente, también son los más baratos y expeditos para usar. Segundo, en el manejo apropiado que ya se adquirió de las mezclas de suelo y cemento, cuando se utiliza la maquinaria moderna con técnicas y equipo de laboratorio apropiados. En tercer término, porque en determinados casos permite reducir substancialmente el tiempo de construcción y los costos.

Cabe decir que el tratamiento con cemento de los suelos tiene su campo de aplicación bien definido, esta bastante probado y ha sido una magnífica solución en muchas ocasiones (6).

2.1. Estabilización de Suelos.

Como su nombre lo indica, con este recurso se pretende hacer más “estable” a un suelo. La primera y la que siempre acompaña a todas las estabilizaciones, es la de aumentar la densidad de un suelo, compactándolo mecánicamente. La segunda estabilización usada es la de mezclar a un material de granulometría gruesa, otro que carece de esa característica. Otro es el recurso de estabilizar un suelo, mezclándole cemento Pórtland.

Los siguientes casos pueden justificar una estabilización:

- a) Un suelo de subrasante desfavorable, o muy arenoso, o muy arcilloso.
- b) Materiales para base o subbase en el límite de especificaciones.
- c) Condiciones de humedad desfavorables.
- d) Cuando se necesita una base de calidad superior, como en una autopista.
- e) En repavimentación, aprovechando los materiales existentes (4).

2.2. Suelo.

Es común creencia la de que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero en realidad se trata de un conjunto con organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y este es un hecho del que se hace abundante aplicación.

“Suelo” es un término del que hacen uso diferentes profesantes. La interpretación varía de acuerdo con sus respectivos intereses. Para el Agrónomo, por ejemplo, la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal, siendo esta interpretación demasiado restringida para el ingeniero. Para el Geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie; esta definición peca de parcial en Ingeniería, al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte.

Para fines de esta obra, la palabra Suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidos de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del suelo, que debe considerarse como parte integral del mismo (8).

2.3. Cemento Pórtland.

El cemento Pórtland es un material finamente pulverizado, generalmente de color gris a café grisáceo, compuesto principalmente por minerales cristalinos artificiales, siendo los más importantes los silicatos de calcio y aluminio. Estos minerales al reaccionar con el agua producen compuestos capaces de impartir propiedades semejantes a las de las rocas una vez que ha endurecido la mezcla de cemento y agua (2).

En principio cualquier cemento puede utilizarse en la estabilización de los suelos. El cemento Pórtland normal tipo I es el mas utilizado, aunque también se han usado mucho los de alta resistencia inicial, del tipo II. Existen trabajos de investigación que concluyen que el cemento Pórtland tipo I permite a la mezcla alcanzar mayor

resistencia que la del tipo II pues contiene mayor cantidad de aluminato tricálcico y sulfato de calcio, pero el tipo II es preferible al tipo I cuando se trata de reducir el agrietamiento. Los cementos expansivos han demostrado ser muy efectivos en suelos granulares gruesos para minimizar el agrietamiento.

Los sulfatos ejercen mucha influencia en la durabilidad y resistencia a la compresión simple. El suelo-cemento está sujeto al ataque de los sulfatos en forma similar al concreto. Se ha observado que los cementos tipo II y IV son más resistentes al ataque de los sulfatos que el tipo I.

El cemento Portland normal tipo I se puede usar cuando los sulfatos solubles en el agua de la mezcla son menores de 0.10% o cuando el agua exterior que puede penetrar el suelo-cemento contiene menos de 150 ppm (partes por millón) de sulfatos. Para contenidos pequeños de sulfatos conviene utilizar cementos con moderada resistencia a los sulfatos.

En el caso de que existan en el agua de la mezcla sulfatos solubles con más de 0.20% o donde el agua exterior contenga más de 1500 ppm de sulfatos, entonces puede usarse el cemento ASTM tipo V de alta resistencia a los sulfatos, pero con contenidos de aluminatos tricálcicos no mayores del 5%. Puede decirse que contenidos de sulfatos entre 0.5 a 1% bordean el límite superior aceptable para realizar una buena estabilización.

La cantidad de cemento puede variar entre 2 y 25% del peso seco de la mezcla. El promedio es del 10% y se procura que no pase del 15% por razones económicas. La tabla 2.3.1 proporciona el rango normal de cantidades de cemento requeridas para los varios tipos de suelos, clasificados por la AASHTO. En algunos países el promedio es más alto porque se diseña para obtener resistencias elevadas; desafortunadamente no se pudo disponer de esos datos. La cantidad de cemento también es función de la eficiencia del mezclado en la obra; mejorando las técnicas del mezclado se puede reducir el contenido de cemento real especificado.

Tabla N° 2.3.1. Cantidades de cemento requeridas para varios tipos de suelos, PCA.

GRUPOS DE SUELOS SEGÚN AASHTO, PCA	PORCIENTO POR VOLUMEN	PORCIENTO POR PESO
A-1-a	5 - 7	3 - 5
A-1-b	7 - 9	5 - 8
A-2-4	7 - 10	5 - 9
A-2-5	7 - 10	5 - 9
A-2-6	7 - 10	5 - 9
A-2-7	7 - 10	5 - 9
A-3	8 - 12	7 - 11
A-4	8 - 12	7 - 12
A-5	8 - 12	8 - 13
A-6	10 - 14	9 - 15
A-7	10 - 14	10 - 16

La reacción del cemento con los suelos granulares limpios ha sido muy estudiada, ya que es la misma que la de los concretos y morteros comunes, por lo que no se insistirá sobre ello. La reacción del cemento con los suelos finos proporciona en la mayoría de los casos aumentos de la resistencia debido a:

- ✓ Rápida fluctuación y acercamiento de las partículas de arcilla o limo.
- ✓ Hidratación del cemento con el establecimiento de vínculos entre partículas y paquetes de ellas.
- ✓ Cristalización del carbonato de calcio con partículas de cemento, que por mezclado se encontrarán distribuidas discretamente en el medio.

A bajos contenidos de cemento la resistencia a la compresión simple en mezclas con suelos predominantemente arcillosos puede no aumentar y aun disminuir apreciablemente. Se considera que este efecto de disminución es debido a que con estos contenidos pequeños de cemento se produce un efecto de encapsulamiento de

las partículas de arcilla sobre las mayores del cementos; obteniéndose por ende una estructura interna débil, a veces menos resistente que la que la que presenta el suelo sin cemento. Esto sucede frecuentemente con porcentajes pequeños de cemento (3 a 5% en peso), que es cuando podría ser bastante económico el tratamiento de los suelos plásticos (6).

2.4. Agua.

El agua tiene como funciones principales:

- Hidratar el cemento para producir la aglutinación de las partículas sólidas.
- Producir la lubricación entre las partículas para facilitar la compactación.

La cantidad de agua varía comúnmente entre el 10 y 20% del peso de la mezcla en suelos plásticos y menores del 10% en los granulares.

Se recomienda que el agua que se utilice esté relativamente limpia y libre de cantidades apreciables de ácidos, álcalis y materia orgánica que puedan afectar al cemento.

Cuando en lugar de agua natural se utiliza lechada de cemento para elaborar los especímenes en las pruebas de compactación, la humedad óptima obtenida difiere de la que se obtiene utilizando solo agua, en mas o en menos. Durante la construcción el cemento se hidrata completamente hasta después de 43 días en suelos plásticos y en unos 28 días en suelos granulares.

El contenido de agua se determina tomando en cuenta la trabajabilidad, manejabilidad de la mezcla, la necesidad de evitar los agrietamientos excesivos y para alcanzar la compactación mas adecuada con el equipo disponible (6).

2.5. Bancos de Materiales.

Se llama banco de material, a todo depósito natural del suelo, roca o agua que pueda ser utilizado en la construcción de una estructura. La localización adecuada de estos depósitos, influye determinadamente en el costo y calidad de una obra. No todos los lugares son privilegiados en contar con buenos bancos, y algunos ya se agotaron. Un aspecto muy importante, es que el material no se tenga que acarrear de grandes distancias. Aquí es cuando conviene estudiar la posibilidad de mejorar o estabilizar un material fuera de especificaciones, pero cercano a la obra (Fig. 2.5.1).

Normalmente las terracerías de un pavimento son las mismas encontradas sobre la ruta. En la construcción de la subrasante es donde se puede presentar la necesidad de hacerla, acarreando un mejor suelo. Sobre todo, tratándose de esta capa que influye tanto en los espesores de pavimento, conviene que en tramos largos sea homogénea.

Las capas subbase y base, de mejor calidad que la subrasante, pueden tomarse de muchos bancos, pero sobre todo la base requiere que el material natural, se cribe o triture y esto obliga a instalar trituradoras que deben permanecer un tiempo rentable, lo que implica, que normalmente un banco de base se encuentre a 50 km de otro igual. Los cerros, los cantiles, los márgenes de los ríos o lagunas, son lugares comunes para bancos de subbase y base.

Pruebas de laboratorio que se efectúan a los suelos que se extraen de bancos, según su utilización:

SUBBASE Y BASE

a) Clasificación:

- ✓ Límites de plasticidad.
- ✓ Granulometría

b) Calidad:

- ✓ Peso volumétrico máximo.
- ✓ Valor relativo de soporte.
- ✓ Expansión.
- ✓ Equivalente en arena (4).



Fig. 2.5.1. Banco de material del km 9 “El Pueblito” carretera Esperanza-Hornos.

2.6. Métodos de Muestreo.

Para determinar las propiedades de un suelo en el laboratorio, es preciso contar con muestras representativas de dicho suelo. Un muestreo adecuado y representativo es de primordial importancia, pues tiene el mismo valor que el de los ensayos en si. A menos que la muestra obtenida sea verdaderamente representativa de los materiales que se pretenden usar, cualquier análisis de la muestra solo será aplicable a la propia muestra y no al material del cual procede. De aquí la imperiosa necesidad de que el muestreo sea efectuado por una persona conocedora de su trabajo (3).

2.7. Métodos de Estabilización de Suelos.

Existen diferentes métodos para estabilizar un suelo, entre los cuales pueden mencionarse como los mas importantes los siguientes: mediante su mezclado con otros suelos o la modificación de su granulometría, mediante la adición de cal, mediante productos asfálticos, mediante sales, mediante ácidos inorgánicos, con tratamiento de polímeros y resinas y mediante la adición de cemento Pórtland siendo este último el método a emplear en el presente trabajo, y el cual se menciona mas adelante.

Para continuar se mencionan de manera breve cada uno de los ya mencionados métodos de estabilización de suelos:

2.7.1. Estabilización mediante su mezclado con otros suelos o modificación de su granulometría.

La estabilización de un suelo que contenga material fino y grueso depende de la distribución de los diferentes tamaños de sus partículas, de la forma de las partículas, su peso volumétrico, su fricción interna y su cohesión. Los materiales que se emplean en carreteras pueden ser:

- ✚ Suelos procedentes de bancos naturales, como los depósitos de río que generalmente contienen grava, arena, arcilla y limos; o los depósitos de arena de playa constituidos generalmente por arenas uniformes.
- ✚ Suelos procesados. Muchas veces los suelos naturales tal y como vienen del banco no son adecuados para su uso y por consiguiente se hace necesario procesarlos para cambiar su tamaño, forma o textura mediante trituración o modificación de su granulometría mediante lavado o su separación en los diferentes tamaños y posterior redosificación.

- ✚ Suelos procedentes de bancos de préstamos. Cuando los materiales por los que atraviesa el camino son adecuados para su construcción, se les emplea extrayéndolos de excavaciones cercanas.
- ✚ Suelos de tipo especial, como los que resultan de la modificación en sus características físicas o químicas, de algunos materiales durante algún proceso, como lo es el caso de las escorias de altos hornos. Este material flota durante la fundición del hierro, se separa de éste y se reduce al tamaño deseado para su utilización.

Una de las propiedades más importantes en un suelo es su resistencia y uno de los factores que mayor influencia tienen sobre ella es la distribución granulométrica de las partículas del suelo, sin menospreciar a la forma y textura de éstas. La resistencia de un suelo se ve entonces influenciada por la proporción de agregados gruesos y finos que contenga éste.

2.7.2. Estabilización de suelos mediante la adición de cal.

El empleo de la cal para la estabilización de suelos no constituye un aspecto novedoso pues fue empleada en obras tan antiguas como la Muralla China y algunos caminos romanos durante el florecimiento del Imperio Romano, pero no es sino hasta unos 30 años que se empezaron a estudiar en forma racional a los mecanismos responsables de la estabilización, así como las diferentes modificaciones sufridas por el suelo estabilizado. La aplicación de cal se concentra principalmente al caso de suelos finos.

Una parte importante de los suelos con los que el ingeniero tiene que trabajar, corresponde a las arcillas, las cuales frecuentemente requieren de su estabilización con el objeto de incrementar su resistencia y disminuir su sensibilidad a cambios volumétricos debidos a cambios en el contenido de agua. El tratamiento de suelos

arcillosos mediante la cal puede lograr objetivos anteriores obteniéndose alguno o varios de los efectos siguientes:

- ✓ Se reduce el índice plástico en forma considerable; esto se debe generalmente a un pequeño incremento en el límite plástico y una considerable reducción en el límite líquido.
- ✓ El agua y la cal colaboran para acelerar la disgregación de los grumos de arcilla durante la operación de pulverización, lo cual facilita la trabajabilidad.
- ✓ Se reducen los efectos aglomerantes.
- ✓ En áreas pantanosas o en donde los suelos tienen humedades superiores a la óptima, la aplicación de la cal facilita el disgregado del suelo, lo que a su vez propicia un secado más rápido.
- ✓ Las contracciones y expansiones debidas a cambio de humedad se reduce considerablemente.
- ✓ La resistencia del suelo a la compresión se incrementa. Asimismo también el valor relativo de soporte se incrementa.
- ✓ La capa estabilizada proporciona una excelente plataforma de trabajo para la construcción de las capas superiores de la sección estructural de un camino.

Es indispensable, la previa determinación de los tipos de minerales arcillosos que se encuentran presentes en el suelo que se pretenda estabilizar, ya que esto permite adaptar el tratamiento a efectuar y prever el mejoramiento que se puede esperar con la estabilización, así como su permanencia con el tiempo.

2.7.3. Estabilización con productos asfálticos.

Como en el caso de cualquier tipo de estabilización, es la economía la que ha conducido en muchos países al empleo de materiales con aditivos que los hacen adecuados para su empleo en carreteras y se ha encontrado que cuando dichos materiales están en carreteras y se ha encontrado que cuando dichos materiales

están constituidos por limos, arenas y gravas, los productos asfálticos ocupan uno de los lugares primordiales para lograr una estabilización exitosa y económica.

Los productos asfálticos se presentan en una gran variedad, lo que aunado a la también alta diversidad de suelos empleados, hace que la estabilización con asfaltos ocupe unas de las mas vastas especialidades en este campo. Obviamente, en estas especialidades se toman en cuenta otras variables de igual importancia, entre las que podrían citarse a manera de ejemplo al clima y al equipo de construcción disponible.

En algunas ocasiones se han aplicado productos asfálticos a las arcillas mediante riegos, buscando únicamente lograr la impermeabilidad superficial, ya sea de los grumos arcillosos, o de las grietas en las partes expuestas de una arcilla, tanto en estado natural como compactada; en cambio, en la estabilización de suelos no cohesivos, el asfalto produce cohesión, lo que hace que se adhieran entre si las partículas de suelo. No obstante lo anterior, se puede asegurar que la estabilización de una arcilla con el empleo de productos asfálticos es generalmente mas costosa y desventajosa que la realizada con otros productos químicos mas adecuados (cal, cemento, etc.), mientras que ciertos productos asfálticos si pueden compartir en algunos casos y económicamente hablando, con otros productos químicos, sobre todo en el caso de agregados friccionantes.

La estabilización con productos asfálticos ha sido uno de los métodos mas usuales para mejorar la calidad de materiales para bases y sub-bases de pavimentos. Una de las principales razones son sus cualidades cementantes y de impermeabilización, siendo en el caso de las gravas, arenas y limos, es decir en materiales no cohesivos o con pocos finos cohesivos, en los que la acción cementante juega un importante papel.

Aunque el uso de productos asfálticos para la estabilización ha sido muy popular, se sabe relativamente poco acerca de las bases teóricas que sustentan, en

comparación con algunos otros tipos de estabilización también populares, como es el caso de las estabilizaciones con cal y cemento. La mayor parte de los conocimientos actuales se fundamentan en la experiencia de campo.

2.7.4. Estabilización con Sales.

A continuación se tratarán los puntos sobresalientes de la estabilización con cloruro de sodio, cloruro de calcio y silicato de sodio, ya que estos son los más comúnmente empleados en estabilización de suelos.

Estabilización con cloruro de sodio (NaCl).

El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos. Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de esta última. Se han reportado casos en los que el empleo de 2 a 3% de sal abatió el punto de congelamiento de un suelo hasta -22°C .

Se han encontrado que los efectos de la adición de cloruro de sodio a una arcilla son muy diferentes en lo que respecta a la plasticidad. En lo que respecta a la resistencia también se ha tenido una gran controversia. Se ha asegurado, que se tiene un incremento en la resistencia solamente en la medida en que se incremente el peso volumétrico a contenidos bajos de humedad. Se puede inferir que el empleo de la sal puede producir efectos difíciles de predecir, por lo que nuevamente se insiste en la necesidad del auxilio de un técnico especializado en la ejecución de este tipo de estudios, y efectuar éstos tomando en cuenta las condiciones especiales de la obra.

Cuando se intente la estabilización con sal deberán tenerse presentes las siguientes limitaciones:

- ✓ El cloruro de sodio es muy útil en climas con problemas de congelamiento.
- ✓ Se puede esperar un mejor resultado si el suelo contiene material fino que reaccione con la sal.
- ✓ La materia orgánica inhibe la acción de la sal.
- ✓ El rodillo pata de cabra no ha dado buenos resultados en la compactación de suelos con sal adicionada.
- ✓ Es indispensable la intervención de un técnico especializado en todo estudio de estabilización con sal, incluyendo las pruebas correspondientes.

Estabilización con cloruro de calcio (CaCl_2).

El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se puede obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos.

En el caso de la estabilización con cloruro de calcio parece haber mayor acuerdo entre los investigadores, en lo que respecta a los mecanismos de estabilización, que en el caso de cloruro de sodio. La razón principal es el hecho de que aquel ha sido más estudiado que éste. El cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo pero desafortunadamente esta sal es muy fácilmente lavable. En lo que respecta a la plasticidad de los suelos, los estudios que se han realizado indican una gran variedad de respuesta, dependiendo del tipo de suelo.

Existen algunas limitaciones para el empleo del cloruro de calcio, pudiéndose mencionar como las más importantes las siguientes:

- ✓ Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa superior al 30%.
- ✓ Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.

- ✓ Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

Estabilización con silicato de sodio (Na_2SiO_3).

La estabilización con silicato de sodio de suelos para su empleo en carreteras, se ha venido aplicando en el mundo desde 1945 aproximadamente y parece ser que los mejores resultados se han obtenido en el caso de suelos arenosos y climas moderados.

Lo que si se ha podido aseverar, es que el silicato de sodio se puede utilizar para trabajos de estabilización de suelos cuando también se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnifico agente cementante.

Empleo de otros tipos de sales.

En el Instituto de Tecnología de Massachussets se encontró, mediante un estudio exhaustivo, que otros tipos de sales diferentes a los ya referidos, tales como el sulfato de cobre, sulfato de bario, sulfato de aluminio, sulfato de magnesio, etc., no producen cambios significativos a los suelos, o bien la mejoría resultaba demasiado pequeña y su costo muy elevado como para justificar la aplicación de dichas sales. Algunas veces se han empleado con éxito mezclas de cloruro de calcio con cloruro de sodio, mezclando al suelo con éste y posteriormente adicionando aquel a la parte superior de la capa a estabilizar.

2.7.5. Estabilización con ácidos inorgánicos.

Aunque poco común, la estabilización con productos ácidos está adquiriendo en la actualidad bastante difusión y experimentación. De los ácidos que han demostrado ser efectivos para modificar favorablemente algún suelo, algunos son económicamente competitivos contra otros productos mas comunes; sin embargo,

como en el caso de los otros productos hasta aquí mencionados, se debe contar con la asesoría de especialistas en la materia, tanto durante la etapa de diseño como de construcción de la estabilización, pues en este caso se involucran peligros tanto para las personas como para los equipos.

Estabilización con ácidos fosforitos (H_3PO_4).

El uso del ácido fosforito o los fosfatos en la estabilización de suelo, presenta dos ventajas muy particulares que deben ser mencionadas; la primera de ellas consiste en que el mineral arcilloso denominado “clorita”, cuyo comportamiento no está bien definido en los tratamientos con cemento o cal, reacciona de una manera perfecta con el ácido fosforito; y la segunda ventaja se refiere a la ruptura de la estructura inicial por el ion fosfato al actuar sobre la arcilla, lo cual permite obtener una mayor densificación en el suelo, resultando de ellos una mayor resistencia mecánica. De aquí resulta que el ácido fosforito tenga el mérito muy particular para estabilizar suelos localizados en regiones de naturaleza volcánica en donde sea abundante la clorita. En la estabilización de suelos arcillosos por medio del ácido fosforito interviene una serie de variables tales como el tipo de suelo, humedad, grado de compactación, forma de mezclado y curado, cantidad y concentración de estabilizante y condiciones ambientales.

Estabilización con ácido fluorhídrico.

La investigación ha demostrado que este estabilizador es muy efectivo, de rápida reacción en todas las arcillas con excepción de aquellas que tienen contenidos ricos de aluminio (caolín, bauxita). La reacción, ya sea en arenas o arcillas, consiste en producir en los componentes de sílice modificaciones de tipo químico para formar fluoruros de silicato insoluble, de alta resistencia.

2.7.6. Tratamiento con resinas y polímeros.

El uso de estos materiales en la estabilización de suelos ha tenido por objeto principal, formar una estructura impermeable al agua; ciertas resinas sintéticas tales como las del sistema anilina y furfural de naturaleza orgánica aumentan la resistencia mecánica del suelo mejorando su cohesión.

La anilina, un derivado líquido del alquitrán de hulla y el furfural, un producto orgánico líquido producido en la refinación de los derivados del maíz; mezclados en la proporción de dos partes a una, reaccionan formando una resina viscosa de color rojo oscuro que se endurece en forma lenta hasta alcanzar su completa solidificación.

El mecanismo de preparación es el siguiente: primero se mezcla uno de los líquidos con suelo y después el otro, y luego se compacta. Se puede estabilizar de esta manera la arena suelta en forma rápida para que los caminos así estabilizados se abran al tránsito a las pocas horas después del tratamiento.

En general, la cantidad de resina utilizada puede ser de 1 a 2% en peso como valor óptimo, y parece probable que solamente los suelos de naturaleza ácida responden bien al tratamiento.

Los polímeros son cuerpos que constan de elementos de la misma especie y en la misma proporción, pero en número tal que las moléculas de unos son múltiplos de las de otros, siendo sus pesos también múltiplos.

Los polímeros catiónicos típicos, que mas se han probado en la estabilización de suelos, son las poli-acrilamidas, y otros productos comerciales tales como el armeen, arquad,etc. Entre los polímeros del tipo aniónico se encuentra como más importantes los sulfonatos y lignosulfonatos. Debido a que la carga de sus grupos constituyentes es igual a la que existe en la superficie de los minerales de arcilla, la

resistencia al esfuerzo cortante se reduce en tanto que la compactación se mejora en forma notable; es así como a estos materiales se les conoce mas como “Agentes que mejoran la compactación” que como estabilizantes (2).

2.8. Estabilización de suelos con cemento Pórtland.

Los ingenieros de suelos han considerado durante muchos años al empleo del cemento Pórtland como uno de los materiales mas indicados en la estabilización de suelos. La utilización del cemento, como estabilizante, se ha intensificado en los últimos años, sobre todo en la construcción de aeropistas. Las técnicas modernas de construcción tienden a tomar ventajas de los materiales de construcción disponibles en el lugar y es aquí donde se han logrado ventajas tanto económicas como ingenieriles al efectuar estabilizaciones, con cemento Pórtland, de los mencionados suelos.

2.8.1. Mecanismos de la estabilización de suelos con cemento Pórtland.

Comúnmente se piensa que la mejoría en las propiedades ingenieriles en un suelo tratado con cemento, se debe principalmente al endurecimiento del cemento Pórtland, pero a la fecha se sigue discutiendo acerca de los procesos que tienen lugar durante la hidratación del cemento en presencia de arcillas. Si el endurecimiento de la mezcla de suelo-cemento se debiese solamente a la hidratación del cemento, podría considerarse al suelo como un componente químicamente inherente. Las partículas de cemento hidratado ligarían a los granos adyacentes de suelo y formarían un esqueleto más o menos continuo de un material duro y resistente que encerraría a una matriz de suelo inalterado químicamente.

2.8.2. Proyecto de la estabilización.

En el caso de los cementos debe tenerse muy presentes las características que se deseen obtener en el suelo estabilizado, ya que la finalidad puede ser su empleo como material base en pavimentos con superficie asfáltica, sub-bases de pavimentos de concreto hidráulico, cunetas, capas de protección, etc. Condiciones éstas que nos pueden indicar la importancia relativa de dichas características como pudiera ser, resistencia a la compresión, resistente a agentes abrasivos, trabajabilidad del suelo, etc. Es indispensable asimismo conocer de antemano las características originales del suelo que se pretenda estabilizar así como el tipo de minerales arcillosos que contenga, para poder predecir el resultado que se logrará con la adición de cemento.

Al igual que en el caso de estabilización con cal, existen en la actualidad muchos criterios para determinar la proporción óptima de cemento Pórtland en una estabilización; sin embargo, es sumamente importante que el ingeniero tenga presente los factores que mas influyen en el suelo para su estabilización, tales como la proporción de materia orgánica, acidez del suelo (pH), porcentaje de los diferentes minerales arcillosos presentes en el suelo, tipo de cemento, granulometría del suelo, proporción de minerales amorfos (sílice y alúmina), etc.

En la actualidad se cuenta con 2 concepciones de la estabilización de suelos con cemento; en la concepción mas antigua (Estados Unidos 1930) se concebía la estabilización de un suelo cercano a la obra, como su mejoramiento con el empleo de cemento, no importando las malas características geotécnicas naturales de dicho suelo, pues se buscaba simplemente que en forma económica resultara aplicable a alguna capa de la estructura del camino.

Bajo esta base podían emplearse suelos finos, arenas finas, etc. En consecuencia, los partidarios de esta tendencia admiten que casi todos los suelos pueden ser estabilizados y proponen algunos métodos de prueba y especificaciones para determinar el porcentaje mas adecuado para la estabilización, tal es el caso de la

Pórtland Cement Association de los Estados Unidos. Los materiales que caen dentro de esta primera concepción generalmente se emplean en las capas inferiores de los pavimentos, sub-bases y subrasantes, o en bases para caminos de tránsito ligero.

La segunda concepción, mas moderna, consiste en adicionar cemento a los agregados que de por si son de muy buena calidad para su empleo en bases, como lo sería el caso de roca triturada. Estos agregados triturados y mezclados con cemento resultan excelentes para su empleo en bases de pavimentos flexibles por los que circule el tránsito pesado. En esta forma se obtiene una alta rigidez bajo la superficie de rodamiento.

En lo que respecta al proyecto de una estabilización se puede decir que también se ha tenido alguna evolución en las técnicas de laboratorio. Inicialmente los porcentajes de cemento se fijaban con base en el empirismo y la experiencia, uno de tales procedimientos es la prueba de Durabilidad recomendada por la Pórtland Cement Association. Otro de tales criterios empíricos es el que se basa en las pruebas de compresión simple. La evolución actual en los criterios de diseño tienden hacia la utilización, para el estudio de laboratorio y la elección de las características de tratamiento de un agregado dado, de pruebas y criterios que si bien no son del todo racionales, toman en cuenta en una forma mas adecuada al sistema de esfuerzos a los que se somete a las capas tratadas (2).

2.8.3. Suelo-Cemento.

La Pórtland Cement Association propone la definición siguiente: "El suelo-cemento es una mezcla intima de suelo, convenientemente pulverizado, con determinadas porciones de agua y cemento que se compacta y cura para obtener mayor densidad. Cuando el cemento se hidrata la mezcla se transforma en un material duro, durable y rígido. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras, calles y aeropuertos (6).

La estabilización de suelo con cemento Pórtland, es la más ampliamente usada en el mundo. En nuestro país no se han usado mucho las capas de suelo-cemento. Solo se emplea el cemento como un material que sirve para disminuir la plasticidad en suelos fuera de especificaciones.

Al mezclar un suelo con cemento, se produce un nuevo material, duro, con mejores características que el usado como agregado. Pueden usarse todos los suelos para efectuarla, excepto los altamente orgánicos, aunque los mas convenientes son los granulares, de fácil disgregado. Los limos, las arenas y arcillas, así como los tepetates, todas las gravas y las arenas, son agregados adecuados para producir este material suelo-cemento, que tienen tan excelentes cualidades, que respecto a la de los suelos granulares son:

- a) Es más resistente y como capa base reparte las cargas a una mayor área, permitiendo así reducir el espesor de las capas.
- b) Tiene mayor módulo de elasticidad.
- c) Es más impermeable.
- d) Es muy resistente a la erosión del agua.
- e) En presencia de la humedad, en lugar de perder resistencia, la aumenta bastante.
- f) Al secarse no pierde compactación, como muchos suelos granulares.
- g) Su resistencia aumenta bastante con el tiempo (4).

2.8.4. Principales usos del suelo-cemento.

El suelo-cemento se usa principalmente en la construcción de:

- ✓ Bases de carreteras, calles, aeropuertos y estacionamientos.
- ✓ Ampliaciones, acotamientos y taludes de carreteras.
- ✓ Muros.

- ✓ Construcción de pisos en áreas de almacenamiento.
- ✓ Reconstrucción de bases falladas.
- ✓ Protección contra efecto de “bombeo” en bases y carpetas de rodamiento.
- ✓ Protección de taludes en presas y almacenamientos.
- ✓ Protección de terraplenes contra la lluvia.
- ✓ Estabilización de taludes.
- ✓ Revestimiento de canales.
- ✓ Impermeabilización de almacenamiento para agua.
- ✓ Construcción de silos enterrados.
- ✓ Construcción de cimentaciones.
- ✓ Subbases para pavimentos rígidos.
- ✓ Subbases para pavimentos flexibles.
- ✓ Pisos.
- ✓ Carpetas para carreteras de poco tráfico.
- ✓ Construcción de ataguías para protección de terraplenes en la construcción de presas.
- ✓ Construcción de cortina de presas.

2.8.5. Principales ventajas.

La estabilización de suelos aumenta enormemente la potencialidad de uso de los bancos de materiales. Esto se debe a que una buena parte de los materiales de los bancos, que en un proyecto convencional se desecharían como deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, se pueden utilizar mediante un tratamiento adecuado. Con el tratamiento se mejorarán las características físicas para que puedan ser aprovechados. El tratamiento con cemento es uno de los que, con más amplio campo de acción, han dado resultados muy satisfactorios y mayores posibilidades de uso.

Algunas veces, donde los bancos convencionales están muy alejados y sea incoesteable o muy costosa su explotación, cabe la posibilidad de utilizar económicamente los bancos cercanos mediante tratamientos. Siempre y cuando el costo de estos compita con los costos adicionales, esto es, aquellos que se generan debido a la lejanía de los bancos que no requieren tratamiento; y todavía resulta mucho mejor, si se puede lograr un ahorro substancial tanto en dinero como en tiempos de construcción.

Por ejemplo, en nuestro país el tratamiento de suelos seguramente puede proporcionar una de las soluciones mas apropiadas para la obtención de materiales de construcción en la zona costera del Golfo de México, donde en amplias partes los bancos de roca, grava y arena son en general escasos y se presentan problemas para poder satisfacer las crecientes necesidades de construcción de calles, carreteras, ferrocarriles, puertos, presas, aeropuertos, etc.

La base de suelo-cemento ya colocada y endurecida es bastante más rígida que las bases usuales de gravas, lo que permite transmitir mejor que ellas las presiones de las llantas a la subbase. Por presentar mayor rigidez es posible reducir el espesor requerido de los pavimentos tratados para transmitir las presiones aceptables en las capas interiores.

Esta disminución es muy deseable en la construcción de las pistas de los aeropuertos en donde por los fuertes impactos que ocasionan las llantas de los aviones en los aterrizajes se requiere se coloque espesores considerables de bases de gravas.

Ha sido notable su prolongada durabilidad bajo condiciones adversas. Se le ha probado en forma exhaustiva en los climas más difíciles, por lo que se ha usado frecuentemente para pavimentos en lugares con condiciones climáticas muy desfavorables de América, Europa y Asia.

En casos de urgencias constructivas, su aplicación permite reducir considerablemente los tiempos de construcción normales si se utilizan las técnicas y maquinarias apropiadas.

Aunque su construcción es muy versátil y también puede hacerse con equipos muy sencillos para tener certeza de éxito se requerirá utilizar las técnicas, equipos y controles adecuados.

Para terminar, es un hecho comprobado ampliamente que sus propiedades de resistencia aumentan con el tiempo, lo que favorece que su conservación se mínima y tenga una prolongada vida útil, bastante mas larga que la de los tratamientos asfálticos.

2.8.6. Principales desventajas.

Por otra parte, las desventajas más notables que presentan son:

- ✓ El aumento de costo por la adición del cemento y actividades constructivas.
- ✓ Una vez que se ha introducido el cemento en el suelo y se hace el humedecimiento, la colocación y la compactación de las capas deben hacerse con gran rapidez para evitar el fraguado anticipado y tener resultados pésimos.
- ✓ Es necesario agilizar y realizar un mayor y mejor control de la construcción en obra que el que se hace utilizando los métodos normales.
- ✓ La liga entre diferentes capas es dificultosa.
- ✓ Es necesario contar con el personal especializado.
- ✓ Se deben ampliar técnicas en general poco conocidas en México, si bien no difíciles de adquirir y ya bastante probadas en otros países.
- ✓ Necesidades de realizar cuidados preventivos para el personal por el daño que puede provocar el constante tocar o aspirar el polvo del cemento (6).

2.8.7. Suelos recomendados para la estabilización.

En teoría cualquier suelo puede estabilizarse con cemento, a excepción de los suelos con bastante contenido tanto de sales que afecten al cemento como de sustancia orgánica o materiales deletéreos. Sin embargo, en el campo de la aplicación práctica, los suelos que se pueden utilizar se encuentran limitados por:

Granulometría adecuada de las partículas

En general, la experiencia ha demostrado que para que un suelo pueda ser endurecido correctamente, mediante la adición de cantidades razonables de cemento, debe tener la granulometría siguiente:

Que el límite superior del tamaño máximo de las partículas de una tercera parte del espesor de la capa compactada, lo que representa unos 8 centímetros máximo. En la distribución granulométrica, el límite máximo de partículas finas que pasan la malla N°. 200 debe ser cercano al 50%, con un límite líquido no mayor de 50% e índice plástico menor de 25%. O sea que conviene evitar los suelos altamente compresibles y los muy plásticos.

La PCA propone que no más del 45% sea retenido en la malla N°. 4 y un tamaño máximo del agregado de 3", y acepta suelos granulares mal graduados. También recomienda que no se utilicen suelos con muchas gravas, que preferiblemente contengan menos del 15% de arcillas, que la suma de arcillas y limos varié entre 20 y 45% y que contenga arena, preferiblemente entre el 55 y 80%.

Por otra parte, la PCA considera que no resulta adecuados suelos cohesivos cuyo límite líquido es mayor de 45% y su límite plástico mayor de 20%.

Los suelos con bastante contenido de arcillas tienen serios inconvenientes ya que producen mucho agrietamiento final y los tratamientos previos de humedecimiento y de secado comúnmente necesarios para su compactación

son costosos y difíciles. Además, durante la construcción el proceso mezclado es sumamente laborioso.

Consideraciones constructivas.

Se deben tomar en cuenta, entre otros factores:

- ❖ La facilidad para realizar el mezclado del suelo con el cemento y el agua. Los suelos con muchos finos pueden ser muy difíciles de mezclar.
- ❖ La facilidad para hacer la compactación.
- ❖ El adecuado contenido natural de agua del suelo en el banco y en la obra para su tratamiento.
- ❖ Evitar tratamientos costosos de los materiales de los bancos.

Condiciones ambientales.

Es necesario tomar en cuenta el efecto de la temperatura durante el fraguado por que su efecto es significativo en climas cálidos.

Será necesario considerar en los suelos posibles de utilizarse su facilidad para formar mezclas que se adapten a las condiciones ambientales, sobre todo en donde sucede la congelación. Partículas intemperizadas o inapropiadas deben desecharse.

Tipos de suelos.

Los suelos para su estabilización pueden considerarse en los grupos siguientes:

- ❖ Granulares limpios.
- ❖ Granulares con cantidades apreciables de finos.

- ❖ Mezclas de finos y granulares.
- ❖ Suelos predominantemente arcillosos.
- ❖ Suelos predominantemente limosos.

Los tres primeros son los que casi exclusivamente se utilizan para suelo-cemento y los dos últimos se procurarán desechar. Incluso algunos autores consideran a los dos últimos como materiales no aptos para hacer suelo-cemento (6).

2.8.8. Procedimiento de Construcción.

Preparación de las capas de apoyo

Equipo

El equipo a utilizar dependerá del tamaño, volúmenes de obra y características específicas del proyecto. De alguna manera incluye también la disponibilidad que de él tengan los contratistas locales. A continuación se presenta un resumen de secuencia constructiva general.

Remoción y despeje de caja en el área de trabajo

En obras urbanas es frecuente tener que remover fragmentos de cimentaciones antiguas, brocales de pozos de visita, camellones, guarniciones, etc. En caso de que el tramo sea virgen, será necesario retirar fragmentos de roca, raíces de árboles de gran tamaño, si es que existen, etc. En caso de presentarse la necesidad de demoliciones, será necesario contar con equipo que funcione con aire comprimido: compresores, perforadoras manuales, rompedoras de las losas de concreto y pavimentos asfálticos en general.

Como equipo de carga, remoción y de maniobra resulta conveniente el empleo del cargador frontal.

✚ Escarificación

Para estas actividades se emplean motoconformadoras para suelos, equipadas con barras escarificadores, normalmente de 11 dientes.

Cuando se tenga que remover roca, se aconseja el empleo de “rippers”.

✚ Extracción

Esta parte de la preparación de la superficie se puede realizar mediante cargadores frontales, bulldozer o motoconformadoras. Cuando los volúmenes por tratar son pequeños, se pueden emplear tractores agrícolas complementados con cargador frontal.

✚ Transporte

La movilización de suelo recortado, o bien los volúmenes hacia el sitio de trabajo, por ejemplo de rellenos de importación de bancos, se podrá realizar mediante camiones de volteo. En obras pequeñas es conveniente contar con un tractor para mover equipo menor, materiales, moldes, equipos, etc., dentro del área de trabajo (Fig. 2.8.1).



Fig. 2.8.1. Relleno de material base para la calle 1300 y 9 en Pueblo Yaqui, Sonora.

🚧 Mezclado, homogenización y distribución

Normalmente, se utilizan motoconformadoras para realizar el mezclado y la uniformización, incluido el extendido de materiales en las cajas ya preparadas. En ocasiones, y dependiendo de si se utilizan sustancias estabilizadoras (cemento, cal, aditivos, etc.) podrán emplearse equipos especiales, como los “pulvimixers” o tractores con rastras agrícolas, para preparar el mezclado en el sitio (Fig. 2.8.2).



Fig. 2.8.2. Rompimiento de los sacos de cemento mediante Motoconformadora, retiro de los sacos, y por último homogenización de suelo-cemento en húmedo.

🚧 Equipo de riego

Para estas actividades es frecuente el empleo de pipas o contenedores montados en camiones y provistos de dispositivos especiales para distribuir en forma controlada y homogénea el agua a todo lo ancho del camino o calle (Fig. 2.8.3)



Fig. 2.8.3. Riego ligero a todo lo ancho del camino para mejor homogenización.

🚧 Equipo de compactación

El equipo de compactación se escogerá en función de los tipos de suelos por compactar y de las exigencias del proyecto.

A continuación se enumeran algunos requisitos básicos adicionales que los equipos de compactación deberán cumplir:

- ✓ Los equipos vibratorios deberán contar con mecanismos que le permitan controlar las velocidades.
- ✓ En caso de que se utilicen equipos con llantas neumáticas, éstos podrán ser lastrados. Si son de remolque, los tractores deberán contar con llantas neumáticas.
- ✓ Los equipos vibratorios pesados (5 ton) pueden ser empleador en la gran mayoría de los casos. También las patas de cabra con forma trapezoidal o modificada podrán ser utilizados.
- ✓ De preferencia las frecuencias y amplitudes de los rodillos vibratorios deberán ser regulares.

En trabajos pequeños es recomendable contar con un rodillo vibratorio de doble tambor, con un peso estático de 1 ton o mayor.

Secuencia detallada

- ✓ Se escogen tramos de 110 m de longitud por 4 a 7 m de ancho, a fin de que estas secciones sean terminadas en un solo día.
- ✓ Escarificado del material a ser estabilizado, previo enrase o perfilamiento de la superficie por tratar (en caso de ser necesario). Si el terreno natural está muy seco, aplíquese un primer riego de agua, para que mediante rastras agrícolas o arados de disco (podrán utilizarse junto con los escarificadores, de ser necesario), el suelo sea disgregado y/o pulverizado.
- ✓ Los suelos cohesivos de alta plasticidad tales como limos y arcillas del tipo CH y MH son los mas difíciles de disgregar y requieren varias pasadas del equipo para ser pulverizados.
- ✓ Acopio de sacos de cemento: el cemento podrá ser colocado en sacos, se colocan en base a los resultados propuestos por los laboratorios acerca del contenido óptimo de cemento ya sea en peso y/o en volumen y luego se procede a colocar los sacos a distancia calculadas para obtener el porcentaje de cemento requerido para cada tramo. Se disponen normalmente en la franja central. En zonas de traslape se dejan sacos de cemento ara que sean aplicados de manera manual en estas zonas de juntas (Fig. 2.8.4)



Fig. 2.8.4. Jalón de los sacos de cemento por medio de la Motoconformadora y colocación de los sacos a distancia ya establecidas.

- ✓ El cemento se mezcla con el suelo ya sea mediante “paleo” manual o bien mediante rastras agrícolas jaladas por tractores, o con ambos.
- ✓ Previa obtención de la humedad de la mezcla en el lugar, se aplica la cantidad de agua recomendada por el laboratorio a fin de obtener los pesos volumétricos secos máximos.
- ✓ Mezclado y extendido del material, el cual se efectúa con riegos de agua y mezclándolo mediante con motoconformadora, repitiendo las operaciones todas las veces que se juzgue necesario hasta obtener un material uniforme y homogéneo. La motoconformadora puede a si mismo servir para el extendido del material debiéndose comprobar en diferentes puntos, la uniformidad en los espesores tendidos. En todo este proceso se recomienda aplicar agua, ya sea mediante pipas o regados por ayudantes de campo, para compensar la pérdida de humedad por evaporación.
- ✓ Compactación final: se dan pasadas con rodillos vibratorios metálicos, aplicadas de la siguiente manera:
 - ❖ 2 pasadas en la modalidad estática.
 - ❖ 2 en media vibración.
 - ❖ 2 pasadas con la vibración completa.
 - ❖ 1 pasada final, estática, para dar el afine de la superficie.

Durante el proceso de compactación se deberá de estar controlando la uniformidad de las mezclas y el número de pasadas necesarias para lograrlo (Fig. 2.8.4).

- ✓ El curado se da con la mezcla ya compactada la cual deberá de protegerse contra la pérdida de agua, ya que se requiere de toda la humedad interna disponible para facilitar la hidratación del cemento. A si mismo se pueden utilizar papeles impermeables o franjas de plástico, pajas y arenas humedecidas al menos dos veces por día; rociado de agua, etc. Se deberá curar la mezcla del orden de 7 días como mínimo, mediante rociado de agua.

De manera alternativa, y para evitar fallas en este rubro, podrá aplicarse un riego por medio de tanques manuales o de membranas de curado (9).



Fig. 2.8.5. Compactación con rodillo metálico vibratorio

I. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

La metodología de la presente investigación tiene la finalidad de facilitar la realización del mismo, esto haciendo referencia de todo lo que es el proceso de investigación. En ella se describirán en si lo que es el planteamiento del problema, el instrumento, el procesamiento de la información y las pruebas aplicadas. Es necesario recopilar información de libro, revistas, Internet, entrevistas con ingenieros expertos en el área de Mecánica de suelos de los mismas normas y criterios propuestos por la Pórtland Cement Association, publicadas en IMCYC (Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento A.C).

3.1. Planteamiento del problema.

Surge la necesidad de esta investigación para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos de banco que serán utilizados como estructuras de tierra (ejem.: bases de pavimentos, terraplenes, plataformas de obras grandes, etc.). En el Municipio se

cuenta con material nativo del lugar muy problemático, el cual la mayoría de las veces no es muy trabajable debido a la gran expansión que se presentan por los suelos en los lugares a construir, o simplemente por que se requiere realizar una obra de mayor magnitud, lo cual se recurre a traer material de banco con calidades mejores a la del terreno.

Se pretende incrementar la resistencia y la capacidad de carga de los suelos de banco, además para tratar de controlar la expansión de los suelos en las terracería, lo cual mediante la estabilización con cemento se lograra, por medio de la estabilización con cemento Pórtland, el suelo que sea extraído de un banco cercano de menor calidad que de ser de un banco lejano pero de mejor calidad, podrá obtener el suelo las propiedades adecuada para la obra a realizar

Se estudiarán 3 bancos de materiales que se enlistan a continuación:

- ✓ Banco de materiales; ubicado en el Km-9 de la carretera Esperanza-Hornos, con desviación izquierda 1.5 km, este banco es llamado “El pueblito”.
- ✓ Banco de materiales; ubicado en el Km-19 de la carretera internacional Cd. Obregón-Guaymas, con desviación izquierda a 1.0 km.
- ✓ Banco de materiales; ubicado en el km 4 de la carretera Providencia-El Portón, con desviación izquierda a 2.5 km “Criba Aarón Godoy”.

3.2. Instrumentos.

La información resultante de las pruebas realizadas será capturada en formatos realizados en el paquete de Excel, además se verificarán mediante gráficas y tablas para el diseño ya establecidas por la PCA (Pórtland Cement Association) si dichos resultados cumplen con las especificaciones. Además se realizaran un formato extra de las pruebas realizadas para comparación del material en estado natural contra el suelo estabilizado.

3.3. Procedimiento de muestreo.

El método de muestreo a utilizar será para muestras alteradas que consistirá en la obtención de material de cada uno de los tres bancos de materiales, de tal manera que las características de la porción que se obtendrán serán representativas del conjunto.

La técnica de muestreo que se utilizará será tomar muestras integrales ya sea de un material acordonado o acamellonado sobre un banco de material, se corta y envasa al material de toda una sección como se muestra en la fig. 3.3.1



Fig. 3.3.1. Muestras integrales de material acamellonado de los banco del km 9 y km 19 respectivamente.

Las porciones de suelo representativos que se tomarán de cada banco de materiales será de 2 cubetas de 19 lts cada una. Las cubetas serán identificadas cada una.

La identificación de las cubetas se hará con los siguientes datos:

- ✓ Nombre del operador
- ✓ Numero de la muestra
- ✓ Ubicación de la muestra
- ✓ Fecha de muestreo

El equipo utilizado para el muestreo será:

- ✓ Palas
- ✓ Pico
- ✓ Cubetas 19 lts

3.4. Procesamiento de la información.

Ya con las muestras de suelo en el laboratorio se procederá a realizar el método propuesto por la PCA. El método que se aplicará será el de “*Método Corto de la Portland Cement Association*”, el cual consistirá en clasificar el suelo de acuerdo a su granulometría, límites de consistencia, mediante el método de clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).

En el método se aplicarán las pruebas de “*Prueba de Resistencia a la Compresión Simple para un Suelo Granular que ha sido tratado previamente con cemento*” para un tiempo de 2, 7 y 28 días de preparadas las muestras y “*Prueba de Compactación para suelo-cemento*”. Todo lo anteriormente mencionado es con el fin de dar una esquematización de lo que será el proceso a realizar sobre cada método mencionado para la estabilización de suelo-cemento.

Posterior a lo antes mencionado se aplicará la prueba de Valor relativo de Soporte (V.R.S.), con el suelo en estado natural y con el % óptimo de cemento encontrado en el Método Corto. Se harán comparaciones sobre los comportamientos de los diferentes suelos a ensayar.

3.5. Programación de las pruebas de laboratorio.

La programación de las pruebas de laboratorio está definida por los criterios de diseño adoptados, que en general son de durabilidad o de resistencia.

Los factores que más influyen en el proyecto son la importancia, el tipo y tamaño de la obra, así como la cantidad y características de los diferentes tipos de suelos susceptibles de tratar, el parque de maquinaria y el tiempo disponible para la ejecución, entre otros.

Para proyectos que no sean grandes o cuando no se disponga de las facilidades de un laboratorio especializado para hacer ensayos de suelo-cemento, en ocasiones puede ser ventajoso no hacer todas las pruebas sino solo las suficientes para garantizar el comportamiento adecuado; aunque por supuesto no se obtenga necesariamente el mínimo de cemento.

Para proyectos pequeños y para proyectos de emergencia donde no es posible contar con las facilidades de un laboratorio especializado o bien cuando no sea práctico hacer pruebas detalladas porque el tiempo disponible es muy corto, entonces se pueden realizar una serie de ensayos rápidos y simple, que simplificarán el diseño, pero no lo optimizarán.

Realizar la serie de pruebas completas para el diseño del suelo-cemento requiere 38 a 45 días para encontrar las proporciones adecuadas. En vista de lo poco práctico de realizarlo para obras pequeñas por consideraciones de tiempo y costo, la Portland Cement Association (P.C.A.) de los E.U.A. diseñó una serie de pruebas simplificadas que durarán de 10 a 12 días solamente.

Los ensayos rápidos diseñados por la P.C.A. consisten esencialmente en hacer granulometría y la identificación de las muestras de los suelos. A partir de la identificación y del análisis de los resultados de unas pruebas de laboratorio muy sencillas se propone la dosificación. Debe considerarse que este procedimiento tendera a dar cantidades de cemento que pueden ser apreciablemente mayores que los mínimos estrictamente necesarios.

En el Anexo 1 se muestran los distintos procedimientos utilizados por la Portland Cement Association.

3.5.1. Determinación del peso volumétrico seco suelto.

La prueba da una idea general respecto a la calidad de los suelos. El peso volumétrico es función de la granulometría y de la densidad de las partículas de suelo, siendo mayor en los suelos granulares bien graduados, de alta densidad. Es de utilidad, también, para conocer en forma aproximada la facilidad o dificultad que presenta un suelo para compactarse. La principal aplicación de esta prueba es la conversión de pesos de material a volúmenes (APENDICE A-1, B-1 y C-1).

Equipo:

- Un recipiente de lámina de aproximadamente 25.24 cm de diámetro por 20 cm de altura.
- Una regla de 20 cm.
- Una balanza de 20 kg de capacidad con aprox. de 1 gr.

3.5.2. Determinación de la Granulometría.

El análisis granulométrico consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que lo componen. Es de poca utilidad en suelos finos, pero permite formar una idea aproximada de alguna de las propiedades de los suelos gruesos (APENDICE A-2, B-2 y C-2).

El análisis por mallas se concreta a segregar el suelo mediante una serie de mallas que definen el tamaño de las partículas (Fig. 3.5.2).

Equipo:

- Juego de mallas: 50.8 mm (2"), 38.1 mm (1^{1/2}"), 25.4 mm (1"), 19.1 mm (3/4"), 12.7 mm (1/2"), 9.52 mm (3/8"), 4.76 mm (N°4), 2.0 mm (N°10), 0.84 mm

(N°20), 0.42 mm (N°40), 0.25 mm (N°60), 0.149 mm (N°100) y 0.074 mm (N°200).

- Balanza electrónica.
- Una balanza de 20 kg de capacidad con aprox. de 1 gr.
- 1 charola circular.
- Pala de albañil.
- Estufa.



Fig. 3.5.2. Determinación Granulométrica, lavado por la malla 200, secado y agitado del material menor.

3.5.3. Límites de Atterberg (IP, LL, LP, CL).

Los límites de Atterberg nos sirven para determinar la plasticidad del suelo en estudio. La plasticidad es una propiedad ingenieril que nos ayuda a reconocer las propiedades fisicoquímicas de los suelo, determinantes del comportamiento

mecánico de las arcillas. La plasticidad en los suelos es debida al contenido de partículas mas finas dispuestas en forma laminar.

Los límites de Atterberg (o de consistencia) corresponden a la humedad, es decir, al porcentaje de agua con respecto al peso de los sólidos en que los finos de los materiales pasan de una consistencia a otra.

El límite líquido (LL). Lo fija el contenido de agua (expresado en porciento de peso en seco), es la humedad correspondiente al límite entre el estado semilíquido y el plástico (*APENDICE A-3, B-3 y C-3*).

Equipo:

- Cono de penetración
- Balanza electrónica
- Malla N° 40 y tapa
- Cucharón
- Cronómetro
- Pizeta
- 5 cápsulas de porcelana
- Espátula
- Porcelana grande
- Horno

El límite plástico (LP). Lo fija el contenido de agua con el que comienza a agrietarse un rollo formado con el suelo, de aproximadamente 3.2 mm de diámetro, al rodarlo con la mano sobre una superficie lisa, no absorbente, que puede ser una placa de vidrio. Es la humedad correspondiente al límite entre el estado plástico y el semisólido (*APENDICE A-3, B-3 y C-3*).

Equipo:

- Placa de vidrio (Rolador)

- Balanza electrónica
- Malla N° 40 y tapa
- Cucharón
- Pizeta
- 3 cápsulas de porcelana
- Porcelana grande
- Horno

La contracción lineal (CL). Es una prueba exclusiva de caminos y es también una medida rápida para conocer la plasticidad de la porción del material que pasa la malla N° 40. Se define como el % de contracción, con respecto a la dimensión original, que sufre una barra de suelo de 2 cm x 2 cm x 10 cm al secarse en un horno a 100 – 110°C, desde una humedad equivalente a la humedad del límite líquido hasta el límite de contracción (*APENDICE A-3, B-3 y C-3*).

$$C. L. = \frac{\text{Long. Inicial} - \text{Long. Final} \times 100}{\text{Long. Inicial}}$$

Equipo:

- 2 Moldes la lámina galvanizada
- Malla N° 40 y tapa
- Cucharón
- Pizeta
- Porcelana grande
- Vernier
- Grasa grafitada
- Horno

3.5.4. Valor Relativo de Soporte (V.R.S.).

Este ensayo es una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como material de construcción, mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada, y además, permite obtener un número de la relación de soporte.

PROCEDIMIENTO:

1. La muestra para efectuar esta prueba deberá haber sido secada, disgregada y cuarteada. Cuando se ha logrado ya la disgregación de los grumos, tamizará la muestra por la malla de 25.4 mm (1"). Si la muestra original contiene menos del 15%, en peso, de material que se retiene en la malla mencionada, deberá utilizarse para la prueba el material que paso la malla. Cuando el retenido en la malla de 25.4 mm (1") exceda del 15%, será necesario sustituir este retenido por la cantidad igual, en peso, de material pétreo que pase la malla de 25.4 mm (1") y se retenga en la numero 4, el cual deberá tomarse de otra muestra.
2. La prueba consiste en medir la resistencia a la penetración de un espécimen compactado a la humedad óptima, con una carga unitaria de 140.6 kg/cm², aplicada con la máquina de compresión, después de haber sido saturado en agua hasta lograr su máxima expansión.
3. Para obtener este valor, se coloca un espécimen de material con PVSM y Wopt. En un cilindro Porter, y se pone a saturar durante un mínimo de 72 hrs.
4. Se coloca el espécimen en una prensa (Fig. 3.5.4), haciendo lecturas de las cargas en kg, correspondientes a las penetraciones de: 1.27, 2.54, 3.81, 5.08, 7.62, 10.16 y 12.70 mm.

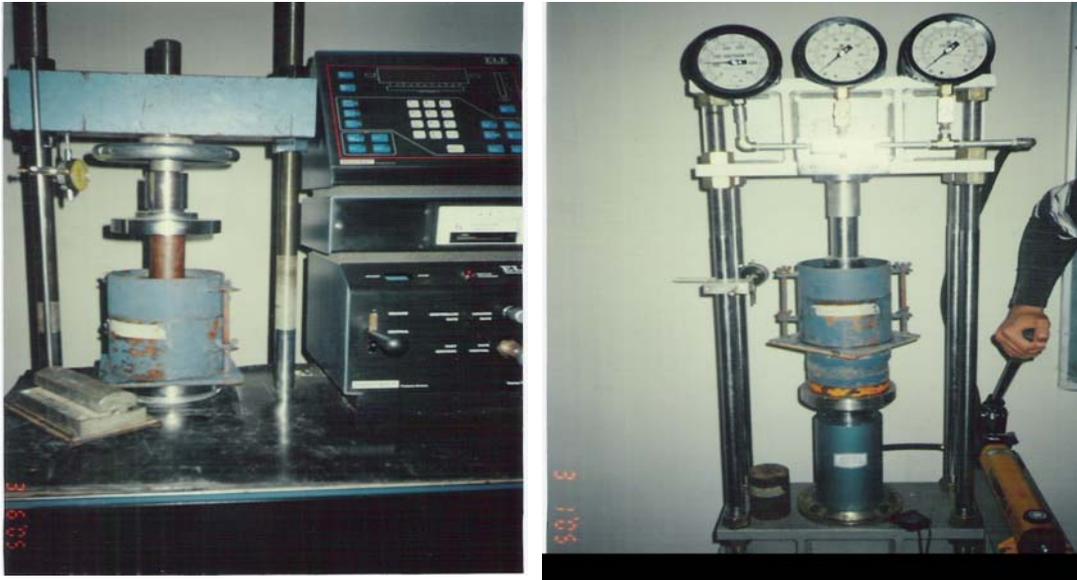


Fig. 3.5.4. Prensa para efectuar la prueba del VRS para material en estado natural y para suelo-cemento, respectivamente.

5. Con estos datos se dibuja una gráfica, en la que en las abscisas se coloca la penetración y en las ordenadas las cargas correspondientes.

Si la curva no tiene cambios bruscos, el valor relativo de soporte se calcula con la carga A correspondiente a la penetración de 2.54 mm o sea:

$$\text{VRS} = \frac{A}{1360 \text{ kg}} \times 100$$

NOTA: 1360 kg es la resistencia de un material estándar (caliza triturada), a la misma penetración de 2.54 mm.

Los resultados se anotan en un formato como el del (APENDICE A-4, A-5, B-4, B-5 y C-4, C-5). Para este trabajo, el VRS es un indicador importante de la capacidad de carga alcanzada por el suelo en estado natural del banco de material y con la cantidad adecuada de cemento Pórtland para cada banco de material.

3.6. Pruebas especialmente diseñadas para el suelo-cemento.

A continuación se describirán las principales pruebas para el suelo-cemento.

3.6.1. Prueba de compactación para suelo-cemento.

PROPOSITO: Obtener el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima para un suelo-cemento, cuando se usa un determinado equipo de compactación (APENDICE A-6, B-6 y C-6).

TEORIA: Criterio de Proctor.

APARATOS: Los normales de un laboratorio de Geotecnia.

PROCEDIMIENTO:

1. Cribar y seleccionar el material que pasa la malla # 4.
2. Determinar los pesos y porcentajes de suelo, de cemento y agua que se utilizarán.
3. Mezclar el suelo cribado con el cemento (Fig. 3.6.1).



Fig. 3.6.1. Adición del % óptimo de cemento y mezclado en seco del suelo-cemento.

4. Adicionar el agua a la mezcla de suelo y cemento (Fig. 3.6.2).



Fig. 3.6.2. Adición del agua, mezclado en húmedo y papel húmedo para evitar perder la humedad.

5. Introducir el material dentro del molde, sin el collar.
6. Compactar la mezcla dentro del molde, con el collar, siguiendo el procedimiento (Fig. 3.6.3).



Fig. 3.6.3. Compactación de la mezcla de suelo-cemento con % óptimo de cemento y agua.

7. Pesar el molde con la mezcla adentro.
8. Sacar el espécimen del molde (Fig. 3.6.4).
9. Pesar el espécimen, el molde y las taras.
10. Repetir los pasos anteriores para cada dosificación.



Fig. 3.6.4. Extracción del espécimen del molde de compactación mediante un gato hidráulico.

RESULTADOS: Se presentan junto con las curvas de compactación respectivas.

CALCULOS: Los contenidos de humedad, w , se calculan como sigue:

$$w = \frac{A - B}{B - C} * 100$$

$$P = \frac{P_1}{W + 100} * 100$$

Donde:

A = Peso del molde y el espécimen de suelo-cemento húmedo.

B = Peso del molde y la mezcla de suelo y cemento secos.

C = Peso del molde.

P = Peso de la mezcla de suelo-cemento seca.

P_1 = Peso de la mezcla húmeda (6).

3.6.2 Prueba de resistencia a la compresión simple para un suelo granular que ha sido tratado previamente con cemento.

PROPOSITO: Medir la resistencia a la compresión de un suelo granular tratado con cemento Pórtland; generalmente a los 2, 7 y 28 días después de preparado.

TEORIA: Se utiliza el criterio de Mohr-Coulomb.

APARATOS: Moldes de compactación de 4 pulgadas o moldes de 2.8 pulgadas y 5.6 pulgadas de altura. Además equipo normal para preparar y cargar los especímenes.

PROCEDIMIENTO:

1. Compactar la muestra en un molde estándar de compactación, nivelando la superficie.
2. Obtener el contenido de agua óptimo en la prueba de compactación de la mezcla de suelo con cemento, usando el porcentaje de cemento requerido.
3. Extraer la muestra del molde y colocarla en el cuarto de curado.
4. Al tiempo especificado (generalmente 7 días), después del curado, colocar el espécimen en la maquina de compresión y cargarla hasta alcanzar la falla (Fig. 3.6.5).

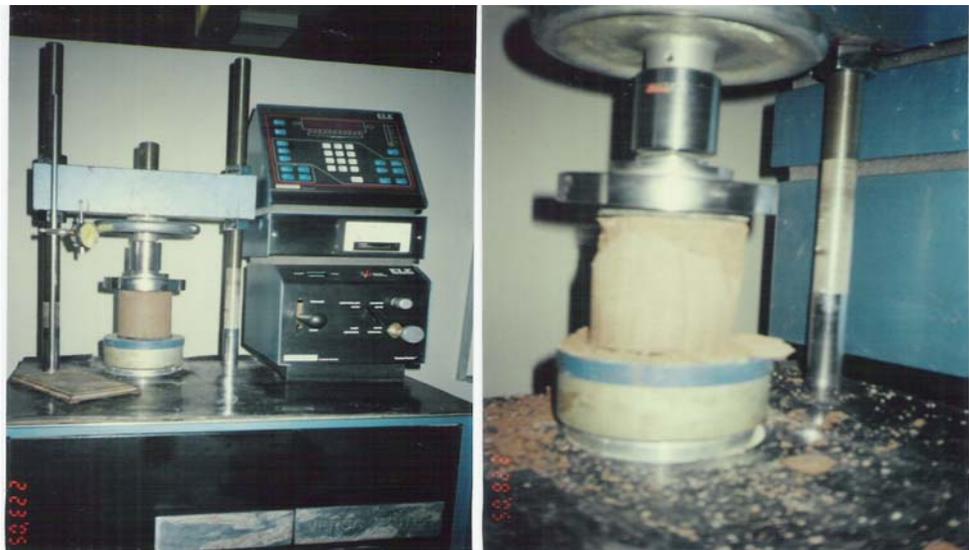


Fig. 3.6.5 Máquina para la resistencia a la compresión para especímenes de suelo-cemento.

RESULTADOS: Carga a la falla (kN o kg)

La resistencia a la compresión simple varía entre 300 y 800 psi (75 a 165 kg/cm²), en especímenes saturados y probados a los 7 días.

CALCULOS:

Esfuerzo a la falla = carga / área (kg/cm²)

3.6.3 Método de curado para especímenes de suelo-cemento.

- ✚ Extracción del espécimen mediante el gato hidráulico y colocación de cartón humedecido, cubriendo completamente el espécimen de suelo cemento (Fig. 3.6.6).



Fig. 3.6.6. Colocación de cartón húmedo sobre el espécimen de suelo-cemento.

- ✚ Colocación del espécimen sobre bolsas térmicas para que se mantengan en humedad constante durante el periodo de curado de 2, 7 y 14 días, (Fig. 3.6.7).



Fig. 3.6.7. Colocación del espécimen sobre bolsas térmicas.

- ✚ Sacar el espécimen de la bolsa térmica y del cartón humedecido 4 horas antes de ser ensayados y ponerlos en saturación por inmersión en agua en una pila con un tirante de más o menos de 1 pulgada (Fig. 3.6.8).



Fig. 3.6.8. Saturación por inmersión en agua durante 4 hrs. antes de ser ensayados.

3.7. Método de diseño de las mezclas.

Para el diseño de las mezclas se han desarrollado varios criterios. Los más comunes son los siguientes:

✚ **Método Corto de la Portland Cement Association.**

El método corto no siempre indica el mínimo contenido de cemento con que tratar un suelo arenoso. Pero, casi siempre proporciona un contenido de cemento dentro de la seguridad; que estará cercano al obtenido por el método detallado de la PCA.

El método corto es aplicable únicamente para suelos predominantemente arenosos que tengan la granulometría siguiente:

1. El contenido de finos inferior al 50%.
2. El contenido de arcillas inferior al 20%.

3. El retenido en la malla # 4 menor del 45%.
4. No existan cantidades apreciables de sustancia orgánica.
5. No se aplica en caliches, margas, cretas, carbones, cenizas, jales de minas y escoria.

El método corto tiene dos variantes la “variante A” para materiales que pasan totalmente la malla N°4; y para los que se retienen en la malla N°4 la “variante B”.

El procedimiento general es el siguiente:

1. Se determina la granulometría del suelo.
2. Se determina el peso volumétrico del material retenido en la malla # 4.
3. Si el suelo cumple los requisitos para aplicar el método, entonces se escogerá la variante que proceda.

VARIANTE “A”, se desarrollará en los pasos siguientes:

- a) Con los datos del análisis granulométrico y la ayuda del Anexo 5, se estimara el máximo peso volumétrico promedio inicial.
- b) Con los datos del peso volumétrico estimado y del porcentaje de material fino que 0.05 mm, se acude a la fig. del anexo 6 para obtener el contenido de cemento por peso; con el cual se preparan los especímenes para el ensaye Proctor estándar.
- c) A partir de los resultados obtenidos en la prueba Proctor correspondiente se determina el máximo peso volumétrico seco y el contenido de humedad óptimo.
- d) Con el máximo peso volumétrico seco obtenido anteriormente se escoge otra vez con ayuda de la figura del anexo 6 el contenido de cemento requerido para fabricar los especímenes. La PCA indica que las cartas y procedimientos pueden ser modificados de acuerdo con el clima y condiciones locales.
- e) Se fabrican tres especímenes para ensayos de resistencia a la compresión simple, con el peso volumétrico y la humedad óptima determinada en la prueba Proctor.

- f) De los resultados de las pruebas realizadas se obtiene la resistencia a la compresión simple promedio de los especímenes con los ensayos de las tres muestras, que tienen siete días de curado húmedo y cuatro horas de saturación por inmersión en agua, inmediatamente antes de ser ensayados.
- g) Verificación. El valor promedio de las compresiones simples obtenidas deberá ser mayor que el que proporciona la figura del anexo 7 Si el valor obtenido es menor entonces se deberá realizar la serie de las pruebas completas y si resultó mayor se considerará que el contenido de cemento es adecuado.
- h) Para su recomendación de dosificación en la construcción, se convierte el contenido de cemento en peso a contenido de cemento en volumen por medio de la figura del anexo 18.

VARIANTE "B", se desarrollará en los pasos siguientes:

- a) Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando el Anexo 2.
- b) Este peso junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla # 270) y el porcentaje de material retenido en la malla # 4 se utilizarán para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la fig. del Anexo 3.
- c) Realizar el ensaye Proctor estándar correspondiente para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco.
- d) Con el máximo peso volumétrico encontrado se determinará el contenido de cemento, en peso, ayudándose otra vez de la figura del Anexo 3.
- e) Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico en seco y la humedad óptima obtenidas en el ensaye Proctor se fabrican 3 especímenes para hacerles las pruebas de resistencia a la compresión simple.
- f) De los resultados de las pruebas se determina la resistencia a la compresión simple promedio de los especímenes, probados después de 7 días de curado húmedo y de tenerlos 4 horas de saturación por inmersión en agua, inmediatamente antes de hacer los ensayos.
- g) Con la ayuda de la figura del Anexo 4, se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

Si la resistencia a la compresión simple obtenida en f) es igual o mayor que la mínima permisible significará que el contenido de cemento requerido es el adecuado. Si el valor obtenido es menor entonces se deberán realizar la serie de pruebas completas (6).

PROCEDIMIENTO

- ➡ Método de diseño de las mezclas (Método Corto de la Portland Cement Association).

Procedimiento:

- ⇒ Determinación de la granulometría del suelo extraído del banco de material mediante el análisis por mallas, esto para definir el tamaño de partículas.
- ⇒ Se determina el peso volumétrico del material retenido en la malla # 4.
- ⇒ Ya una vez obtenida la granulometría del suelo. El método corto de la PCA es aplicable únicamente para suelos predominantemente arenosos que tengan la granulometría siguiente:
 - ★ El contenido de finos inferior al 50%.
 - ★ El contenido de arcillas inferior al 20%.
 - ★ El retenido en la malla # 4 menor del 45%.
 - ★ No existan cantidades apreciables de sustancia orgánica.
 - ★ No se aplica en caliches, margas, cretas, carbones, cenizas, jales de minas y escoria.
- ⇒ El método corto tiene dos variantes la “variante A” para materiales que pasan totalmente la malla N° 4; y para los que se retienen en la malla N° 4 la “variante B”.
- ⇒ Si el suelo cumple los requisitos para aplicar el método, entonces se escogerá la variante que proceda, en caso contrario se da por finalizado.
- ⇒ En el caso de esta investigación la granulometría de los 3 diferentes bancos tuvo un cierto porcentaje que pasó la malla N° 4, por tal motivo que se analizó con la variante “B” del Método Corto, desarrollando los siguientes pasos:
 - ⇒ Obtener el peso volumétrico máximo promedio utilizando el Anexo 2.
 - ⇒ Este peso junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla # 270) y el porcentaje de material retenido en la malla # 4 se utilizarán

para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la fig. del Anexo 3.

- ⇒ Se realizar el ensaye Proctor estándar ya con el contenido de cemento encontrado gráficamente, esto para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco. Y con el máximo peso volumétrico encontrado se determinará el contenido de cemento, en peso, ayudándose otra vez de la figura del Anexo 3.
- ⇒ Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico en seco y la humedad óptima obtenidas en el ensaye Proctor se fabrican 3 especímenes para hacerles las pruebas de resistencia a la compresión simple.
- ⇒ Se determina la resistencia a la compresión simple promedio de los especímenes, probados después de 7 días de curado húmedo y de tenerlos 4 horas de saturación por inmersión en agua, inmediatamente antes de hacer los ensayos.

IV. RESULTADOS

4. RESULTADOS.

Este capítulo contiene toda la información obtenida como resultado de la investigación a los tres bancos de materiales del Municipio de Cajeme. Dicha información, tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de cemento Pórtland que deberá agregarse a un suelo extraído de bancos de materiales de Municipio de Cajeme, y comparar dichos resultados con gráficas y tablas establecidas por la PCA (Pórtland Cement Association), en su editorial de Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).

Adicional a todo lo anterior se ejecutarán las pruebas de Valor Relativo de Soporte (V.R.S.), para los diferentes bancos de materiales (en su estado natural y con su respectivo % óptimo de cemento), esto para tener una mejor claridad sobre el comportamiento del suelo al ser estabilizado con cemento Pórtland. Para una mejor comprensión de los resultados, se adicionan los datos y resultados obtenidos por cada una de las pruebas ejecutadas a los diferentes bancos de materiales, en los apéndices correspondientes a cada banco.

4.1 **Resultados.** A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio, realizada a los tres bancos de materiales del municipio de Cajeme.

Para una mayor comprensión acerca de la obtención de los resultados, ver los apéndices siguientes:

- ✚ APENDICE A. Muestra la memoria de cálculo del banco del km 9 “El Pueblito”.
- ✚ APENDICE B. Muestra la memoria de cálculo del banco del km 19 “Montaño”.
- ✚ APENDICE C. Muestra la memoria de cálculo del banco de la Criba de Aarón Godoy “El Portón”.
- ✚ APENDICE D. Muestra la comparación de resultado de cada uno de los bancos de materiales.

Banco de material Km-9 "El Pueblito"

CARACTERISTICA	MUESTRA "KM 9"
Límite líquido, %	28.00
Límite plástico, %	0.0
Índice plástico	0.0
Contracción lineal	4.37
Pasa la malla #4	59.26
Pasa la malla #10	48.14
Pasa la malla #40	19.15
Pasa la malla #200	9.25
Grava %	40.74
Arena %	50.00
Finos %	9.25
Clasificación SUCS	SW-SM

Resultados de las pruebas de laboratorio al suelo estabilizado
METODO CORTO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.

Primeramente se obtienen las propiedades índices de los suelos: granulometría y límites de consistencia. Teniendo en cuenta que el método corto únicamente es para suelos predominante arenosos que contengan la granulometría siguiente:

CRITERIO	RESULTADO	CUMPLE
El contenido de finos inferior al 50%	9.253	SI
El retenido en la malla #4 menor del 45%	40.742	SI
No existan cantidades apreciables de sustancias orgánicas	NO EXISTEN	SI
No se aplica en caliches, margas, cretas, carbones, cenizas, jales de minas y escoria	NO EXISTEN	SI

Con ello establecemos que método emplear. En nuestro caso, una vez determinado la naturaleza granular del suelos, empleamos el "**METODO B**" (para los suelos que tienen material retenido en la malla #4).

Después, con la ayuda de la gráfica de la fig. del Anexo 2 se obtiene una aproximación de los pesos volumétricos húmedos. Así, para el caso de la muestra tenemos que:

CARACTERISTICA	RESULTADO
Porcentaje de material menor que 0.05	9.25 %
Porcentaje retenido en la malla #10	51.86 %
Peso espec. máximo promedio (tentativo)	2145.0 kg/m ³

Este peso volumétrico tentativo junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4 se utilizan para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la fig. del Anexo 3.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Por ciento de material menor que 0.05	9.25 %
Por ciento de material retenido en la malla #4	40.742 %
Peso específico máximo promedio (tentativo)	2145.0 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	2.5 %

Realizar el ensayo Proctor estándar correspondiente de acuerdo con la AASHTO T-134, para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Humedad Óptima	10.4 %
P V S máximo	2010.0 kg/m³

Con el máximo peso volumétrico encontrado se determina el contenido de cemento, en peso, ayudado nuevamente de la figura del Anexo 3, así como también con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Por ciento de material menor que 0.05	9.25 %
Por ciento de material retenido en la malla #4	40.742 %
Peso específico máximo promedio	2010.0 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	4.5 %

Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico en seco y la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor se fabrican 3 especímenes para hacerles las pruebas de resistencia a la compresión simple a las edades de 2, 7 y 28 días de curado en cuarto húmedo.

Previo al ensayo de compresión, las muestras se saturan en inmersión en agua por 4 horas, inmediatamente antes de hacer los ensayos.

N° ESPECIMEN	FECHA DE ELABORACION	FECHA DE ENSAYE	EDAD, en días	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	DEFORMACION ULTIMA, mm	PORCENTAJE DE CEMENTO, en peso %
1	14/02/05	17/02/05	2	10.53	4.1	4.5
2	14/02/05	21/02/05	7	16.14	2.3	
3	14/02/05	14/03/05	28	21.94	2.1	

Con la ayuda de la figura del Anexo 4, y usando el porcentaje retenido en la malla #4 y el que pasa la #200, se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

EDAD, en días	% RETENIDO N° 4	PASA LA MALLA N° 200	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESISTENCIA MINIMA, kg/cm ²	CUMPLE
2	40.74	9.25	10.53	20.0	NO
7	40.74	9.25	16.14	20.0	NO
28	40.74	9.25	21.94	20.0	SI

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9, propuesta por la Portland Cement Association el material obtenido tiene las siguientes propiedades para mezclas suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante:

PROPIEDADES EXIGIDAS A LAS MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO POR LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION						
TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESULTADO	V.R.S. o C.B.R. %	RESULTADO	EXPANSION %	RESULTADO
Sub-bases. Material de relleno para trincheras	3.5 – 10.5		20 - 80		27	
Sub-bases o bases para transito muy ligero	7.0 – 14.0		50 – 150		2	
Bases para trafico pesado	14.0 – 56.0	16.14	200 - 600	966.43	2	0.369

Banco de material Km-19 "Carlos Montaña"

CARACTERISTICA	MUESTRA "KM 9"
Límite líquido, %	28.50
Límite plástico, %	0.0
Índice plástico	0.0
Contracción lineal	1.34
Pasa la malla #4	60.80
Pasa la malla #10	54.66
Pasa la malla #40	31.53
Pasa la malla #200	7.23
Grava %	39.20
Arena %	53.57
Finos %	7.23
Clasificación SUCS	SW-SM

Resultados de las pruebas de laboratorio al suelo estabilizado
METODO CORTO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.

Primeramente se obtienen las propiedades índices de los suelos: granulometría y límites de consistencia. Teniendo en cuenta que el método corto únicamente es para suelos predominante arenosos que contengan la granulometría siguiente:

CRITERIO	RESULTADO	CUMPLE
El contenido de finos inferior al 50%	7.23	SI
El retenido en la malla #4 menor del 45%	39.20	SI
No existan cantidades apreciables de sustancias orgánicas	NO EXISTEN	SI
No se aplica en caliches, margas, cretas, carbones, cenizas, jales de minas y escoria	NO EXISTEN	SI

Con ello establecemos que método emplear. En nuestro caso, una vez determinado la naturaleza granular del suelos, empleamos el "**METODO B**" (para los suelos que tienen material retenido en la malla #4).

Después, con la ayuda de la gráfica de la fig. del Anexo 2 se obtiene una aproximación de los pesos volumétricos húmedos. Así, para el caso de la muestra tenemos que:

CARACTERISTICA	RESULTADO
Porcentaje de material menor que 0.05	7.23 %
Porcentaje retenido en la malla #10	45.34 %
Peso espec. máximo promedio (tentativo)	2115.0 kg/m ³

Este peso volumétrico tentativo junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4 se utilizan para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la fig. del Anexo 3.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Por ciento de material menor que 0.05	7.23 %
Por ciento de material retenido en la malla #4	39.20 %
Peso específico máximo promedio (tentativo)	2115.0 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	3.2 %

Realizar el ensayo Proctor estándar correspondiente de acuerdo con la AASHTO T-134, para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Humedad Óptima	9.5 %
P V S máximo	2012.5 kg/m³

Con el máximo peso volumétrico encontrado se determina el contenido de cemento, en peso, ayudado nuevamente de la figura del Anexo 3, así como también con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Por ciento de material menor que 0.05	7.23 %
Por ciento de material retenido en la malla #4	39.20 %
Peso específico máximo promedio	2012.5 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	4.8 %

Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico en seco y la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor se fabrican 3 especímenes para hacerles las pruebas de resistencia a la compresión simple a las edades de 2, 7 y 28 días de curado en cuarto húmedo.

Previo al ensayo de compresión, las muestras se saturan en inmersión en agua por 4 horas, inmediatamente antes de hacer los ensayos.

N° ESPECIMEN	FECHA DE ELABORACION	FECHA DE ENSAYE	EDAD, en días	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	DEFORMACION ULTIMA, mm	PORCENTAJE DE CEMENTO, en peso %
1	21/02/05	24/02/05	2	8.12	4.6	4.8
2	21/02/05	01/03/05	7	14.89	3.3	
3	21/02/05	1/03/05	14	19.93	1.8	

Con la ayuda de la figura del Anexo 4 y usando el porcentaje retenido en la malla #4 y el que pasa la #200, se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

EDAD, en días	% RETENIDO N° 4	PASA LA MALLA N° 200	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESISTENCIA MINIMA, kg/cm ²	CUMPLE
2	39.20	7.23	8.12	18.5	NO
7	39.20	7.23	14.89	18.5	NO
14	39.20	7.23	19.93	18.5	SI

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9, propuesta por la Portland Cement Association el material obtenido tiene las siguientes propiedades para mezclas suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante:

PROPIEDADES EXIGIDAS A LAS MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO POR LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION						
TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESULTADO	V.R.S. o C.B.R. %	RESULTADO	EXPANSION %	RESULTADO
Sub-bases. Material de relleno para trincheras	3.5 – 10.5		20 - 80		27	
Sub-bases o bases para transito muy ligero	7.0 – 14.0		50 – 150		2	
Bases para trafico pesado	14.0 – 56.0	14.89	200 - 600	869.04	2	0.704

Banco de material Criba Aarón Godoy "El Portón"

CARACTERISTICA	MUESTRA "KM 9"
Límite líquido, %	26.70
Lmite plástico, %	23.56
Índice plástico	3.14
Contracción lineal	1.72
Pasa la malla #4	59.31
Pasa la malla #10	52.18
Pasa la malla #40	35.64
Pasa la malla #200	11.95
Grava %	40.69
Arena %	47.35
Finos %	11.95
Clasificación SUCS	SW-SM

Resultados de las pruebas de laboratorio al suelo estabilizado
METODO CORTO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION.

Primeramente se obtienen las propiedades índices de los suelos: granulometría y límites de consistencia. Teniendo en cuenta que el método corto únicamente es para suelos predominante arenosos que contengan la granulometría siguiente:

CRITERIO	RESULTADO	CUMPLE
El contenido de finos inferior al 50%	11.95	SI
El retenido en la malla #4 menor del 45%	40.69	SI
No existan cantidades apreciables de sustancias orgánicas	NO EXISTEN	SI
No se aplica en caliches, margas, cretas, carbones, cenizas, jales de minas y escoria	NO EXISTEN	SI

Con ello establecemos que método emplear. En nuestro caso, una vez determinado la naturaleza granular del suelos, empleamos el "**METODO B**" (para los suelos que tienen material retenido en la malla #4).

Después, con la ayuda de la gráfica de la fig. del Anexo 2 se obtiene una aproximación de los pesos volumétricos húmedos. Así, para el caso de la muestra tenemos que:

CARACTERISTICA	RESULTADO
Porcentaje de material menor que 0.05	11.95 %
Porcentaje retenido en la malla #10	47.82 %
Peso espec. máximo promedio (tentativo)	2120.0 kg/m ³

Este peso volumétrico tentativo junto con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4 se utilizan para determinar el contenido de cemento en peso para el ensayo Proctor estándar por medio de la fig. del Anexo 3.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Porcentaje de material menor que 0.05	11.95 %
Porcentaje de material retenido en la malla #4	40.69 %
Peso específico máximo promedio (tentativo)	2120.0 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	2.7 %

Realizar el ensayo Proctor estándar correspondiente de acuerdo con la AASHTO T-134, para obtener el contenido de humedad óptimo y el máximo peso volumétrico seco.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Humedad Óptima	11.5 %
P V S máximo	1957.0 kg/m³

Con el máximo peso volumétrico encontrado se determina el contenido de cemento, en peso, ayudado nuevamente de la figura del Anexo 3, así como también con el porcentaje de material menor de 0.05 mm (malla #270) y el porcentaje de material retenido en la malla #4.

CARACTERISTICA	RESULTADO
Porcentaje de material menor que 0.05	11.95 %
Porcentaje de material retenido en la malla #4	40.69 %
Peso específico máximo promedio	1957.0 kg/m ³
Contenido de cemento en peso	5.25 %

Con el contenido de cemento, así como con el máximo peso volumétrico en seco y la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor se fabrican 3 especímenes para hacerles las pruebas de resistencia a la compresión simple a las edades de 2, 7 y 28 días de curado en cuarto húmedo.

Previo al ensayo de compresión, las muestras se saturan en inmersión en agua por 4 horas, inmediatamente antes de hacer los ensayos.

N° ESPECIMEN	FECHA DE ELABORACION	FECHA DE ENSAYE	EDAD, en días	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	DEFORMACION ULTIMA, mm	PORCENTAJE DE CEMENTO, en peso %
1	28/02/05	03/03/05	2	17.28	2.2	5.25
2	28/02/05	07/03/05	7	21.12	2.0	
3	28/02/05	14/03/05	14	27.25	1.6	

Con la ayuda de la figura del Anexo 4, y usando el porcentaje retenido en la malla #4 y el que pasa la #200, se determina una resistencia a la compresión mínima permisible para la mezcla de suelo-cemento.

EDAD, en días	% RETENIDO N° 4	PASA LA MALLA N° 200	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESISTENCIA MINIMA, kg/cm ²	CUMPLE
2	40.69	11.95	17.28	20.5	NO
7	40.69	11.95	21.12	20.5	SI
14	40.69	11.95	27.25	20.5	SI

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9, propuesta por la Portland Cement Association el material obtenido tiene las siguientes propiedades para mezclas suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante:

PROPIEDADES EXIGIDAS A LAS MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO POR LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION						
TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESION, kg/cm ²	RESULTADO	V.R.S. o C.B.R. %	RESULTADO	EXPANSION %	RESULTADO
Sub-bases. Material de relleno para trincheras	3.5 – 10.5		20 - 80		27	
Sub-bases o bases para transito muy ligero	7.0 – 14.0		50 – 150		2	
Bases para trafico pesado	14.0 – 56.0	21.12	200 - 600	941.18	2	0.917

V. CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES.

La realización de esta investigación dió a conocer los siguientes resultados: “**el Banco de material del km 9 (El Pueblito)**” resultó que con 4.5 % de cemento Pórtland alcanzó una resistencia a la compresión de 21.94 kg/cm² para cumplir a la edad de 28 días de curado. La resistencia a la compresión propuesta por la PCA para este material fue de 20 kg/cm², este porcentaje de cemento Pórtland se considera como el adecuado para este suelo y para alcanzar la resistencia a esa edad, pero ya que la PCA persigue alcanzar dichos resultados a la edad de 7 días de curado, será necesario incrementar el contenido de cemento y realizar nuevamente las mismas pruebas efectuadas.

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9 propuesta por la Pórtland Cement Association (propiedades: Resistencia a la Compresión, VRS y % Expansión), el material del banco del km 9 tiene las características de “Base para trafico pesado”, esto para mezclas de suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante.

Además de todo lo anterior se obtuvo que el aumento en la resistencia del material en estado natural en comparación al suelo estabilizado con cemento Pórtland es notablemente muy superior a los límites propuestos por la PCA (propiedad: VRS), ya que el Valor Relativo de Soporte aumentó desde un 71.324 % (material con características de base de regular calidad), a un 966.43 % lo que nos indica que es un alto porcentaje y que podría ser utilizado para estructuras de grandes magnitudes, ya sea para protección de taludes de presa, protecciones de costas , márgenes de ríos, terminales de carga pesada, etc., además de que la expansión tiende a disminuir, ya que paso de 1.074 % a un 0.369 % (relativamente bajo).

Para “**el Banco de material del km 19**” sucedió la misma situación que para el banco anterior mencionado solamente que para este banco resultó ser un 4.8 % de cemento Pórtland y alcanzó una resistencia a la compresión de 19.93 kg/cm² para cumplir a la edad de 14 días de curado. La resistencia a la compresión propuesta por la PCA para este material fue de 18.5 kg/cm², este porcentaje de cemento Pórtland se considera como el adecuado para este suelo y para alcanzar la resistencia a esa edad, pero ya que la PCA persigue alcanzar dichos resultados a la edad de 7 días de curado, será necesario incrementar el contenido de cemento y realizar nuevamente las mismas pruebas efectuadas.

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9 propuesta por la Pórtland Cement Association (propiedades: Resistencia a la Compresión, VRS y % Expansión), el material del banco del km 19 tiene las características de “Base para trafico pesado”, esto para mezclas de suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante.

Además de todo lo anterior se obtuvo que el aumento en la resistencia del material en estado natural en comparación al suelo estabilizado con cemento Pórtland es notablemente muy superior a los límites propuestos por la PCA (propiedad: VRS), ya que el Valor Relativo de Soporte aumentó desde un 98.34 % (material con características de base de regular calidad), a un 869.04 % lo que nos indica que es

un alto porcentaje y que podría ser utilizado para estructuras de grandes magnitudes, ya sea para protección de taludes de presa, protecciones de costas , márgenes de ríos, terminales de carga pesada, etc., además de que la expansión tiende a disminuir, ya que paso de 1.928 % a un 0.704 % (relativamente bajo).

Para “**el Banco de material de la Criba Godoy**” resultó ser un 5.25 % de cemento Pórtland y alcanzó una resistencia a la compresión de 21.12 kg/cm² para cumplir a la edad de 7 días de curado. La resistencia a la compresión propuesta por la PCA para este material fue de 20.5 kg/cm², este porcentaje de cemento Pórtland se considera como el adecuado para este suelo y para alcanzar la resistencia propuesta por la PCA a la edad de 7 días de curado.

De acuerdo a la Tabla del Anexo 9 propuesta por la Pórtland Cement Association (propiedades: Resistencia a la Compresión, VRS y % Expansión), el material del banco de material de la Criba de Godoy tiene las características de “Base para trafico pesado“, esto para mezclas de suelo-cemento después de 7 días de curado a humedad constante.

Además de todo lo anterior se obtuvo que el aumento en la resistencia del material en estado natural en comparación al suelo estabilizado con cemento Pórtland es notablemente muy superior a los limites propuestos por la PCA (propiedad: VRS), ya que el Valor Relativo de Soporte aumentó desde un 151.107 % (material con características de base de regular calidad), a un 941.176 % lo que nos indica que es un alto porcentaje y que podría ser utilizado para estructuras de grandes magnitudes, ya sea para protección de taludes de presa, protecciones de costas , márgenes de ríos, terminales de carga pesada, etc., además de que la expansión tiende a disminuir, ya que paso de 1.272 % a un 0.917 %.

En síntesis se obtuvo que el contenido de cemento Pórtland encontrado para los tres bancos de materiales es el adecuado, ya que alcanzó dicha resistencia propuesta por la PCA a sus respectivas edades, así como también de acuerdo a la tabla del

Anexo 9 los materiales adquirieron las propiedades adecuadas para ser material “Base para tráfico pesado”, como también resultaron aumentadas las propiedades de resistencia de acuerdo al VRS y disminuidas al potencia de expansión. Por lo tanto se obtuvieron los objetivos planteados sobre los contenidos de cemento Pórtland para los bancos de materiales del Municipio de Cajeme.

Finalmente, es importante recordar que la estabilización de suelos con cemento Pórtland, es de extrema importancia, ya que se han encontrado que con el empleo de algún aditivo agregado al suelo, se pueden lograr no solamente considerables ahorros sino que se mejoran las propiedades del suelo, en forma muy notable. Es pues de fundamental importancia que el ingeniero conozca a fondo las reacciones que se llevan a cabo en el interior de un suelo al serles incorporado algún producto estabilizante.

5.2. Recomendaciones.

- ✚ No es conveniente llevar a cabo una sola prueba para definir la resistencia adquirida del suelo estabilizado, ya que muchas veces difieren los resultados, esto por no llevarse a cabo con su correcta realización el método, lo cual se recomienda realizar 3 pruebas para comparar.
- ✚ Llevar a cabo la prueba paso por paso como se indica en el procedimiento.
- ✚ Realizar los correctos pesajes del cemento, para tener un mejor control sobre el porcentaje a utilizar y/o agregar al suelo.
- ✚ Realizar a cabo la prueba del V.R.S. para una comparación de resultados con los establecidos por la P.C.A.
- ✚ En caso de que el suelo muestreado este muy húmedo, colocarlo en sol, o secarse en estufa durante un tiempo, ya que si se le adiciona el cemento en ese estado, hará reacción muy pronto y no se podrá realizar la prueba.
- ✚ Verificar la calidad del cemento disponible para realización de la obra.

-
- ✚ Verificar que el tipo de suelo es el que se ha considerado en el proyecto, pues los bancos pueden presentar variaciones de consideración. Para esto, además de la observación visual hecha por un técnico capacitado, deberán efectuarse las pruebas de laboratorio necesarias y de acuerdo con los resultados que se obtengan se tomaran las medidas que procedan.
 - ✚ Debido a que la humedad afecta la proporción de cemento, es necesario que el laboratorio proceda, antes de iniciar la jornada de construcción, a determinar la humedad en una serie de muestras del material por emplear.
 - ✚ Por ningún motivo, el lapso transcurrido entre el mezclado del cemento con agua y el final de la compactación debe exceder a 2 horas.
 - ✚ No deberá permitirse la circulación sobre el suelo-cemento 2 días, aproximadamente, después de su construcción, ni tampoco antes de que se termine y proteja debidamente la capa estabilizada.
 - ✚ Prever su utilización en las regiones de suelos favorables, como son en las regiones donde abundan las cenizas volcánicas, ya que con ellas no se requiere usar mucho cemento.
 - ✚ Prever su utilización en la construcción de bases para calles en las regiones donde existe seria escasez de bancos de materiales apropiados.

BIBLIOGRAFIA

1. Beltrán J. Dolores, 1993, Formación de delta del río Yaqui, Sonora, Pagina 5. Tesis Investigación de las características de suelo, clima y Topografía para el área comprendida entre Esperanza-Cocorit y Cd. Obregón, Abril de 1997, pag. 4.
2. Carlos Fernández Loiza, "Mejoramiento y Estabilización de Suelos", Editorial LIMUSA, S.A. de C.V., México 1982.
3. Crespo Villalaz Carlos, "Mecánica de suelos y cimentaciones", 1ª edición Font, S.A., México 1976.
4. Jesús Moncayo V, "Manual de Pavimentos"
5. LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y CONCRETO, LAMSYCO, Acreditado ante la ema, con la Norma NMX-EC-17025-IMNC-2000, ISO/IEC-17025:1999.
6. M. en I. Eduardo de la Fuente Lavallo "SUELO-CEMENTO: Uso, propiedades y aplicaciones", editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., en 1995.
7. Patricia Montoya Osuna, Periódico "La Tribuna", "Aumentan costos de la Guerrero y Descartan Hundimiento", Publicados, 24/09/2004 y 15/09/2004, respectivamente.
8. Rico y del Castillo, "Mecánica de Suelos", Tomo 1, 3ª Edición, Editorial LIMUSA, S.A. de C.V., México 2003.
9. Salazar Rodriguez A., "Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos", editado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., en 1998.