

Ciudad Obregón, Sonora, a 15 de Diciembre de 2011.

Instituto Tecnológico de Sonora
P r e s e n t e.

El que suscribe **Dagoberto Nuñez Rojas**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: **“Elección y dosificación del conglomerante en estabilización de suelos”**, en lo sucesivo “LA OBRA”, misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante “EL INSTITUTO”, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

Dagoberto Nuñez Rojas.

Dagoberto Nuñez Rojas

(Nombre y firma del autor)



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

“Elección y Dosificación del Conglomerante en Estabilización de Suelos”

Tesis
Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

Presenta

Dagoberto Núñez Rojas

Ciudad Obregón, Sonora;

Diciembre 2011

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	5
I. INTRODUCCIÓN	6
1.1. ANTECEDENTES	7
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	12
1.4. OBJETIVO GENERAL	13
1.5. OBJETIVO ESPECÍFICO	13
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1. COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	14
2.1.1. MEDIDA DE COMPACIDAD DEL SUELO	14
2.1.1.1. MÉTODO PROCTOR	15
2.2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	17
2.2.1. La estabilización comprende:	18
2.2.2. Tipos de estabilización	18
2.2.2.1. Estabilización Física	18
2.2.2.2. Estabilización Mecánica	19
2.2.2.3. Estabilización Química	19
2.2.3. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO	20
2.2.3.1. Cemento en la estabilización de suelos.....	20
2.2.3.2. Dosificación del cemento	22
2.2.4. Estabilización con cal	29
2.2.4.1. Cal en la estabilización de suelos.....	29
2.2.5. Estabilización con cloruro de sodio	31
2.2.6. Estabilización con cloruro de calcio.....	32
2.2.7. Estabilización o mejoramiento con productos asfálticos.....	32
2.3. HERRAMIENTAS O MAQUINARIAS	34
2.4. DETERMINACION DEL INDICE DE PLASTICIDAD (IP)	37
2.4.1. Límites de Atterberg	39
2.4.2. PROCEDIMIENTO	40
2.4.2.1. Procedimiento del Límite Plástico:.....	40
2.4.2.2. Procedimiento del Límite Líquido:.....	41
2.5. MÉTODO DE LA PRUEBA DE EADES Y GRIM.....	41

2.5.1. Estabilización de Suelos Arcillosos con Cal	41
2.5.2. Interpretación de la prueba de Grim	42
2.6. IMPORTANCIA DEL TIPO DE CAL	43
III. METODOLOGÍA.....	46
3.1. ANALIZAR E IDENTIFICAR EL SUELO PROBLEMA.....	46
3.2. RECOLECTAR LA MUESTRA	46
3.3. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD	47
3.4. ELECCIÓN DEL CONGLOMERANTE (CAL O CEMENTO).....	47
3.5. PRUEBA RÁPIDA DE EADES Y GRIM, MÉTODO DEL PH.....	47
3.5.1. PROPUESTA DEL PORCENTAJE ÓPTIMO PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO.....	47
3.6. DOSIFICACIÓN PARA SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO	47
IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	48
4.1. LOCALIZACIÓN.....	48
4.2. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP):.....	49
4.2.1. Determinación del límite líquido (LL)	49
4.2.2. Determinación del límite plástico (LP):	50
4.2.3. Resumen de resultados arrojados de la muestra:	51
4.3. PRUEBA DE EADES Y GRIM.....	52
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura I-1. Tramo La Flecha La Herradura, en El Salvador, construido en 1953 utilizando base de suelo-cemento.	9
Figura I-2. Pruebas de campo en el tramo La Flecha La Herradura. Proyecto de realizado en 1995.	9
Figura II-1. Buldócer	34
Figura II-2. Motoniveladora.....	35
Figura II-3. Rodillo	36
Figura II-4. Bailarina	36
Figura II-5. Rodillos vibratorios dobles	37
Figura II-6. Prueba de Eades y Grim.....	42
Figura IV-1. Zona donde se recolecto la muestra de suelo	49
Figura IV-2. Grafico de prueba del cono	50
Figura IV-3. Material cribado en malla #40.....	52
Figura IV-4. Maquina cribadora.....	52
Figura IV-5. Preparación de las muestras con su porcentaje de conglomerante ..	53
Figura IV-6. Muestras preparadas con	53
Figura IV-7. Potenciometro utilizado en las pruebas realizadas.....	54
Figura IV-8. Muestras de menor porcentaje de cal.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de dosificación AASHTO	23
Tabla 2. Tabla de resultados, contenido de humedad de las muestras	49
Tabla 3. Resultados de determinación de límite plástico (LP).....	50
Tabla 4. Tabla de resultados de medición del pH	54
Tabla 5. Resultado de pH del suelo sin conglomerante	55
Tabla 6. Tabla de resultados de la segunda comparación con menor porcentaje	56

Resumen

La estabilización de suelos hoy en día es muy utilizada especialmente para darle más capacidad al suelo de recibir cargas sin deformarse; unos de los ejemplos más conocidos es el tratamiento que recibe la tierra en el proceso de pavimentación. Se dice que la técnica de estabilizar suelos se ha aplicado desde hace 5000 años atrás, las pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal. En la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal hasta llegar a las técnicas que actualmente conocemos. El presente trabajo se basó en determinar un método óptimo y sencillo de alcanzar la estabilización; se inició por determinar lo límites de Atterberg y con ello se obtuvo el IP de 18.425, el cual nos indica que tenemos un suelo de alta plasticidad. Según las investigaciones hechas, es posible determinar el tipo de conglomerante por medio del IP. Cuando se obtiene un IP menor a 10, es un suelo no plástico y el conglomerante más adecuado es el cemento. En nuestro caso al ser mayor a 10, nuestro suelo se estabilizará con cal. Para determinar la dosificación de cal que necesita, se realizó la prueba de Eades y Grim la cual indica que el porcentaje óptimo será el más cercano y superior a 12.4, por lo tanto se obtuvo que con un porcentaje de 1 % el suelo alcanza su estabilización óptima. En caso de que el suelo hubiera sido un material granular no plástico la dosificación se llevaría a cabo de acuerdo a lo estipulado por ASSHTO, el cual nos propone ciertos porcentajes según el tipo de suelo. Se recomienda continuar las pruebas de resistencia para observar el comportamiento mecánico del suelo con la dosificación que se empleó.

I. INTRODUCCION

Los suelos son el componente principal de la mayoría de los proyectos de construcción. Estos deben soportar cargas, pavimentos, servir como canales de agua, etc. Los suelos se pueden utilizar en el estado en que se encuentran o bien, ser excavados y tratados para adecuarlos al proyecto. El conocimiento de las características y propiedades de los suelos son muy importantes en el desarrollo de un proyecto y también para el diseño del mismo. Por ello el objetivo de esta investigación es “La Estabilización de Suelos”. Definamos que la estabilización de suelos no es más que el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice también que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su plasticidad. El método en el que nos enfocaremos será químico. Para esto hemos analizado dos de los conglomerantes o aditivos más utilizados en nuestra región, como lo son la Cal y el Cemento. El uso de cada uno de los agentes está

determinado por pruebas de laboratorios cada uno enfocado a cierto tipo de suelo según sea su comportamiento al aplicarse las cargas que efectuaran sobre ellas y su composición granulométrica, así como el porcentaje que necesitamos para obtener un mejor resultado basados en investigaciones hechas por otros autores y utilizando pruebas de laboratorio para su comprobación.

1.1. ANTECEDENTES

Según el Instituto Salvadoreño de la Industria de la Construcción (2006) La estabilización de la arcilla con cal en la construcción tiene más de 5.000 años de antigüedad. Las pirámides de Shersi en el Tíbet fueron construidas con mezclas compactadas de arcilla y cal. En la China y la India a lo largo de la historia, se ha utilizado de varias maneras la estabilización con cal. Sin embargo, fue en los EE.UU., a finales de 1940; cuando se aplicaron a las mezclas de cal y suelo las técnicas y ensayos de la mecánica de suelos que se desarrollaban en aquella época. El tratamiento de arcillas con cal comenzó en 1950, y la técnica aumentó su popularidad con gran rapidez. Se han construido miles de kilómetros de carreteras, así como aeropuertos principales como el de Dallas Fort Worth, sobre arcillas estabilizadas, esta técnica también se practica extensamente en Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Suecia y Francia.

Desde entonces, la estabilización de los terrenos arcillosos con cal se ha convertido en una alternativa económicamente beneficiosa a los métodos tradicionales de construcción. Los proyectos típicos que se han beneficiado de la estabilización con cal y cemento, incluyen:

- Autopistas, carreteras principales y secundarias.
- Pistas de aterrizaje y de servicio en aeropuertos
- Aparcamientos y explanadas de fábricas
- Estabilización de laderas

- Caminos vecinales, pistas forestales y caminos rurales
- Vías férreas
- Recuperación de muelles en desuso
- Recuperación de terrenos contaminados
- Rellenos estructurales.

Para la federación internacional del cemento FICEM (2007) El hombre ha usado tanto la cal como diversos aglomerantes puzolánicos en la estabilización de suelos cohesivos. En civilizaciones como la Inca o la Azteca los caminos estabilizados fueron clave para el desarrollo de diversas actividades. Ya en el siglo XX se lograron avances en la producción de conglomerantes y en el desarrollo de equipos de construcción y técnicas de ejecución. Con el tiempo, se crearon las condiciones óptimas para la realización de muchos experimentos en mezclas de suelo y cemento-cal que mostraron las posibilidades de aprovechamiento de los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado por la mezcla de los mismos con cemento Portland y agua y su posterior compactación. La aplicación del suelo-cemento empezó a estudiarse metódicamente entre 1910 y 1920. En Inglaterra, Arias, Duran y Nicolle (2011) citan a (Brookr Bradley 1917) empleó con éxito una mezcla de cemento con suelos arcillosos en la construcción de carreteras. Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados, la técnica no fue usada posteriormente. En los Estados Unidos, el uso del suelo - cemento se incrementó a partir de la patente de Joseph Hay Amies en 1917, de una mezcla de suelo con cemento llamada Soilamies. El esfuerzo conjunto de la Portland Cement Asociación (PCA), el Bureau of Public Roads y el Highway Department del estado de Carolina del Sur contribuyó al desarrollo tecnológico de la estabilización de suelos con cemento, realizando diversos tramos experimentales de carreteras entre 1930 y 1940.



Figura I-1. Tramo La Flecha La Herradura, en El Salvador, construido en 1953 utilizando base de suelo-cemento.



Figura I-2. Pruebas de campo en el tramo La Flecha La Herradura. Proyecto de realizado en 1995.

Después de la Segunda Guerra Mundial se inician en España y Latinoamérica las primeras experiencias con suelo-cemento aplicado en carreteras, siendo Argentina, Colombia y El Salvador ejemplos de países con más de 50 años de experiencia en la construcción de caminos de este tipo. A comienzos de la década del 50 comenzó una fase experimental más rigurosa, con la concreción de un tramo experimental en el año 1951 en Ezeiza de donde surgen las primeras publicaciones al respecto en el país. Esta etapa está caracterizada por la búsqueda de relaciones entre parámetros físicos y mecánicos (tales como el pasante tamiz 200 y el Índice Plástico) y la reactividad del suelo con la cal. La reactividad suelo-cal es cuantificada a través de ensayos de compresión simple realizados después de un tiempo de curado en condiciones especiales y a diversos intervalos de tiempo, siendo los 7 y 28 días los referentes más usuales, FICEM (2007)

El Ing. Geólogo Crespo (2005) cita a McDowell (1966) condensa toda la experiencia de Texas en un gráfico que permite seleccionar el porcentaje de cal necesario para su estabilización según el Índice de Plasticidad. Ese gráfico pasa luego a integrar la Norma AASHTO-DT 220-66 I y se divulga en la comunidad científica internacional los suelos con IP menor de 3 directamente son descartados para su estabilización con cal, es decir que se asocia el concepto de plasticidad y consecuentemente la presencia de minerales arcillosos en el suelo con la reactividad del mismo con la cal.

Este concepto se mantiene hasta la fecha, dejando de lado la reactividad proveniente de otras mineralogías como los vidrios volcánicos, diatomeas, etc.

En Argentina, durante el V Congreso de Vialidad y Tránsito llevado a cabo en el año 1964 en la ciudad de Embalse, Provincia de Córdoba, se realizó un concurso de trabajos sobre suelo-cal, que resume el estado del conocimiento a esa fecha. En varios de los trabajos allí presentados se descarta el uso de la cal en materiales no arcillosos:

Crespo (2005) cita a Moreau (1964) en su tesis, dice textualmente: *“La estabilización con cal es sólo efectiva en los suelos que contienen arcillas. Manuel Mateos y Donald T. Davison hicieron definitivas pruebas de laboratorio en las que comprobaron la imposibilidad de estabilizar con cal la arena de médanos. En la Argentina hemos observado el mismo fenómeno desde los primeros momentos...”*. Los resultados de la investigación desarrollada por Mateos y Davison (1962) de la cual se extrae la conclusión sobre el carácter inerte de los médanos, fueron trasladados a nuestro país sin tener en cuenta las diferencias en la mineralogía de los sedimentos pampeanos que presentan una especial reactividad con la cal, como se señala en esta investigación.

Crespo (2005) cita el Gráfico de Mc'Dowell y recomienda el uso del método gráfico del Bureau of Publica Roads de Estados Unidos de Norteamérica, para selección de estabilizantes para suelos, que está basado en el porcentaje de material pasante Tamiz 200 (partículas inferiores a las 74 micras) y en el Índice de Plasticidad y recomendando el uso de la cal cuando este último supera el valor de 20, con lo cual se descartaría el uso de la cal en loess, ya que raramente estos poseen un IP superior a 20.

Con posterioridad y hasta la fecha se siguen repitiendo estos criterios que - sin lugar a duda- son válidos en la mayoría de los sedimentos del planeta, pero que han sido

absolutamente generalizados, sin tener en cuenta la presencia de casos particulares como los de los suelos argentinos

En la actualidad existen modernos equipos estabilizadores, recicladores de gran potencia y rendimiento, distribuidores y dosificadores de cemento que facilitan el trabajo en campo y garantizan la calidad de mezclado y colocación. Aún existen retos por superar referente al conocimiento de este material, si bien el trabajo de investigación continúa en diversos países, Crespo (2005).

Grupo Cal-hidra

Para grupo Calhidra (2010) Un suelo apto para construir se compacta fácilmente mojando la superficie. Si el suelo al ser mojado y aplicar la presión no se compacta y tiene una consistencia chiclosa o arcillosa se debe de mejorar con el uso de cal. Este proceso de transformación del suelo que permite la *compactación* de los materiales base del terreno se llama estabilización de suelos, con ello se obtiene un incremento en la resistencia y su capacidad de soporte, así como la disminución de su sensibilidad al agua y a los cambios de volumen.

Para tratar un suelo arcilloso se utiliza cal en diferentes proporciones dependiendo del objetivo, el nivel más bajo de tratamiento se utiliza únicamente para secar y modificar los suelos temporalmente; este mejoramiento produce una base más estable para trabajar o bien para habilitar caminos provisionales, grupo Calhidra (2010)

El nivel más alto de tratamiento es aquel que se respalda con pruebas de laboratorio, diseño y técnicas de construcción adecuadas, éste produce una estabilización permanente de los suelos haciéndolos aptos para soportar cualquier tipo de construcción. La estabilización del terreno (plataformas) requiere mayores adiciones de cal, con el objetivo de que el suelo obtenga resistencias más altas. Por lo general las arcillas y tierras con alto grado de expansión son neutralizadas con la cal,

formando un *mortero natural*, lo que permite obtener a los pocos días resistencias mayores a las del mismo suelo compactado sin cal, según grupo Calhidra (2010)

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Unos de los principales problemas que tenemos en nuestra región para la industria de la construcción es la inestabilidad de suelos y sus fallas por aplicaciones de cargas ante condiciones adversas de clima, para prevenir problemas de este tipo es necesario someter al suelo a un tratamiento al que llamamos “estabilización de suelos”

Hablando en términos más específicos referentes al estudio realizado tenemos un terreno en bruto, es decir en su estado natural sin alteración alguna hecha por el hombre, el terreno presenta propiedades plásticas, que se caracteriza por ser una arcilla, en la construcción de desarrollos urbanos de manera practica en procesos constructivos se retira el material inestable y trae material de banco requerido, existen varias opciones alternativas y una de ellas es la estabilización de suelos, es por eso que se plantea que dosificación será la adecuada para el tipo de suelo que tendrá el fraccionamiento.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Es necesario realizar este estudio primero que nada para brindar una mejor calidad de vida a los ocupantes en ese fraccionamiento, ya que en épocas de lluvia puede ocasionar problemas serios en las edificaciones o vialidades de esa área.

Para ello se pretende analizar a detalle el comportamiento del suelo y proponer el porcentaje óptimo del conglomerante y qué tipo de conglomerante se necesita

Los resultados logrados de este estudio tendrá como objetivo principal el brindar una mejor calidad de vida a las personas residentes de ese mismo fraccionamiento.

1.4. OBJETIVO GENERAL

Determinar la dosificación de un conglomerante mediante el índice plástico de un suelo para estabilizarlo.

1.5. OBJETIVO ESPECIFICO

1.- Determinar el tipo de conglomerante o aditivo a usarse mediante el índice de plasticidad

2.- Presentar una dosificación óptima para el suelo a analizar.

.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. COMPACTACIÓN DE SUELOS

¿Qué es la compactación de suelos?

Es la densificación del suelo por medios mecánicos. El objetivo, mejorar la resistencia y estabilidad volumétrica, afectando la permeabilidad, como consecuencia del proceso de densificación de la masa.

2.1.1. MEDIDA DE COMPACIDAD DEL SUELO

Se califica la compacidad por la comparación cuantitativa de las densidades secas o pesos unitarios secos, γ_d , que el suelo va adquiriendo gradualmente, al variar la humedad, la energía o el método de compactación.

2.1.1.1. MÉTODO PROCTOR

Consiste en compactar el material dentro de un molde metálico y cilíndrico, en varias capas y por la caída de un pistón. Existen dos variaciones del MÉTODO PROCTOR.

- a) *Proctor estándar o normal*, con pistón de 5 ½ lbs, h = 12", N = 25 golpes y 3 capas a compactar. El molde de $\phi = 4''$ y volumen 1/30 ft³.
- b) *Proctor modificado*, con pistón de 10 lbs, h = 18", N = 25 golpes, y compactando en 5 capas, con el mismo molde.

Curva de humedad – densidad o de COMPACTACIÓN. Esta curva da la variación, γ_d Vs ω , que se obtiene en laboratorio. La densidad seca (y también el γ_d) va variando al modificar la humedad, ω , de compactación.

La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad. La rama seca es la que se corresponde al suelo bajo de humedad, donde la fricción y cohesión dificultan su densificación. La rama húmeda, es asintótica a la línea de saturación, que se desplaza hacia óptima de compactación, dado que la energía de compactación de un suelo muy húmedo la absorbe el agua y no el esqueleto mineral.

Penetrometro Proctor: Herramienta que se hince a mano. Se trata de una aguja o varilla con un dispositivo para medir la fuerza requerida (en libras), para que la penetre (variable en tamaño y forma) profundice en el suelo 3" por lo general. La operación se hace en laboratorio y en campo, simultáneamente, para comparación de peso específico (γ_d), o de la humedad si se quiere. (No debe existir grava en el suelo).

Energía de compactación. La calidad de la compactación depende de: Contenido de humedad, método de compactación y energía de compactación. (ver fig ω Vs $\gamma_d - \sigma$ y # de pasadas Vs γ_d) En el ensayo Proctor, la energía específica E_e , está dada por:
$$E_e = \frac{N W h}{V}$$
 Siendo N = # de capas; n = # de golpes; W = peso del pistón; h = altura de caída del pistón; V = volumen del molde y muestra. La AASHTO (departamento de carreteras de USA), tiene dos normas: La T99 para el Proctor estándar que exige $E_e = 6,03 \text{ cm}^3 \text{ Kg cm}$ y la T180, para Proctor modificado, con $E_e = 27,4 \text{ cm}^3, \text{ Kg cm}$. Ambas normas aplicables a materiales "Pasa tamiz #4".

Variables del proceso:

Son 3: Suelo, método y energía:

- a. Suelo: Puede ser granular (friccionante) o fino (cohesivo)
- b. Método de compactación: En campo (rodillos); en laboratorio (varios).
- c. Energía: Energía específica, temperatura y humedad.

Los métodos de laboratorio son impacto, amasado y de carga estática. Ellos dan resultados diferentes y afectan las condiciones del suelo de manera distinta. La compactación de campo se hace con rodillos lisos, neumáticos o con "pata de cabra".

Los rodillos pueden ser vibratorios y los sistemas suelen hacerse mixtos. Se pueden usar ranas o canguros (vibrocompactadores), en áreas pequeñas.

En carga estática, la E_e es difícil de evaluar y está afectada por el tiempo de aplicación y la deformabilidad del suelo. En amasado, la E_e es más difícil y compleja de evaluar, pero se puede cuantificar variando el número y espesor de las capas, y la presión de apisonado y número de aplicaciones.

El contenido de agua ω del suelo se relaciona con la permeabilidad. En arcillas se dan tensiones capilares que favorecen la formación de grumos que dificultan la

compactación. El resultado no es el mismo, en γ_d , aumentando agua que esperando a que el suelo la pierda; es decir, compactando por la rama húmeda o por la rama seca, pues el Suelo tarda tiempo en admitir agua que se agrega, en el primer caso.

En suelos recompactados, el resultado es diferente al de los suelos vírgenes. Los pesos unitarios resultan mayores.

La temperatura genera evaporación o condensación, con lo que se afecta la humedad del suelo. Esto obliga a compactar iniciando con humedades diferentes a la óptima.

El equipo puede condicionar la humedad de trabajo, obligándose a una humedad diferente a la óptima.

2.2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Concepto más amplio y general que el de COMPACTACIÓN, pues incluye cualquier procedimiento útil para mejorar las propiedades ingenieriles del suelo, como estructura. Por lo tanto en términos más específicos llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes inadmisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable.

El suelo natural posee a veces la composición granulométrica y la plasticidad así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como firme de un camino.

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y, como las demás actividades artesanas, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan principalmente en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación.

En general puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados, pero si la estabilización ha de lograrse por aportaciones de otros suelos o por medios de otros elementos (por ejemplo cemento, cal, cloruro de sodio) el costo de la operación puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

Entre las aplicaciones de un suelo modificado o estabilizado se encuentran la mejora de los suelos granulares susceptibles a las heladas y el tratamiento de los suelos limosos y/o arcillosos para reducir los cambios de volumen.

2.2.1. La estabilización comprende:

- a) Compactación
- b) Mezcla granulométrica
- c) Adición de compuestos especiales (antes de mezcla y/o compactación)

2.2.2. Tipos de estabilización

2.2.2.1. Estabilización Física

Este se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

- Mezclas de Suelos: este tipo de estabilización es de amplio uso pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que lo hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

- Geotextiles
- Vibroflotación (Mecánica de Suelos)
- Consolidación Previa

2.2.2.2. Estabilización Mecánica

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia.

- Compactación: este mejoramiento generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.

2.2.2.3. Estabilización Química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

- Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

2.2.3. ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

2.2.3.1. Cemento en la estabilización de suelos

El cemento mezclado con el suelo mejora las propiedades de éste desde el punto de vista mecánico.

Siendo los suelos por lo general un conjunto de partículas inertes granulares con otras activas de diversos grados de plasticidad, la acción que en ellos produce el cemento es doble. Por una parte actúa como conglomerante de las gravas, arenas y limos desempeñando el mismo papel que en el hormigón. Por otra parte, el hidrato

de calcio, que se forma al contacto del cemento con el agua, libera iones de calcio que por su gran afinidad con el agua roban algunas de las moléculas de ésta interpuestas entre cada dos laminillas de arcilla. El resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y de la plasticidad así como un aumento en la resistencia y en la durabilidad.

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

Este tipo de estabilización es de uso cada vez más frecuente y consiste comúnmente en agregar cemento Portland en proporción de un 7% a un 16% por volumen de mezcla.

Al mejorar un material con cemento Portland se piensa principalmente en aumentar su resistencia, pero además de esto, también se disminuye la plasticidad, es muy importante para que se logren estos efectos, que el material por mejorar tenga un porcentaje máximo de materia orgánica del 34%.

Casi todos los tipos de suelo que encontramos pueden estabilizarse con cemento con excepción de los que contienen altos porcentajes de materia orgánica. Por otra parte, los suelos de arcilla o limo requerirán un mayor porcentaje de cemento para lograr los resultados esperados.

Por lo general, la capa que se estabiliza tiene un espesor de 10 a 15 cm. y podrá coronarse con una capa de rodadura de poco espesor (ya sea para tránsito ligero o medio); también podrá servir de apoyo a un pavimento rígido o flexible de alta calidad.

Para la utilización del cemento, lo que tiene verdadera importancia es que el suelo no contenga materias que perjudiquen el fraguado o la resistencia. Interesa también para la economía de la obra limitar el porcentaje de cemento necesario y prever el comportamiento de las arcillas.

En este orden hay que tomar en cuenta las aptitudes intrínsecas del suelo para la estabilización como son la Granulometría, lo que implica que los suelos a mejorarse no deben contener piedras de tamaño superior a 60 mm (es decir, que el porcentaje que pasa por el tamiz #200 sea menor del 50%); y la Plasticidad, lo que determinará la calidad de las arcillas, estableciendo un Límite Líquido menor de 50% (<40%) y un Índice de Plasticidad menor de 25% (<18%).

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

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

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

2.2.3.2. Dosificación del cemento

Si mediante la granulometría y la determinación de los límites de Atterberg se ha procedido a la clasificación del suelo de acuerdo a la H.R.B. (Departamento de Investigación Sobre Carreteras) se puede adoptar la dosificación de cemento de la siguiente tabla: de acuerdo a las normas de dosificación de suelo-cemento propuestas por la "portland cement *Association*" (Rocha, 2002)

Tabla 1. Tabla de dosificación AASHTO

Tipos de Suelo	Suelo Estabilizado	Suelo-Cemento
A-1 y A-3	3-8	5-8
Límite de A-3 y A-2	5-10	6-10
Límite de A-2 y A-4	7-12	9-14
A-5 y A-6	8-15	No económico
A-7	10-16	

Existen dos formas o métodos para estabilizar con cemento Portland, una es la llamada estabilización del *tipo flexible*, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1 al 4%, con esto solo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo, las pruebas que se les efectúan a este tipo de muestras son semejantes a las que se hacen a los materiales estabilizados con cal.

Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como *estabilización rígida*, en ella el porcentaje de cemento varía del 6 al 14%, este tipo de mejoramiento es muy común en las bases, ya que resulta muy importante que éstas y la carpeta presenten un módulo de elasticidad semejante, ya que con ello se evita una probable fractura de la carpeta, ya que ambos trabajan en conjunto; para conocer el porcentaje óptimo a emplear se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento.

Ensayos a realizar

1. Lo primero que hay que hacer es identificar el suelo. Se deben realizar sondeos para determinar los diferentes tipos de suelos, ya que cada tipo requerirá diferentes dosificaciones de cemento.

2. Determinación del contenido mínimo de cemento y la humedad óptima de compactación, con lo siguiente:

a) Se toma una muestra de suelo, se seca y se pulveriza hasta que pase por el tamiz #4 para los suelos finos y se mezcla con diferentes contenidos de cemento (entre 8% y 16% por volumen).

b) Para cada contenido de cemento se preparan 4 probetas compactadas a densidad máxima, dos para la prueba de humedad y secado y dos para la prueba de resistencia a la compresión a diferentes edades. Todas se dejan fraguar en cámara fría por 7 días.

c) Pasados los 7 días, las dos probetas destinadas a la prueba de humedad-secado se sumergen en agua a temperatura ambiente por 5 horas, se sacan y secan al horno a 70 °C por 42 horas. Este proceso de inmersión y secado se repite hasta un máximo de 12 veces y luego de cada ciclo una de las probetas se pesa y se le determina el grado de absorción a la otra, se limpia pasándole un cepillo metálico enérgicamente, eliminando todo el material suelto y luego se pesa obteniéndose el porcentaje de material disgregado después de cada ciclo.

Las probetas destinadas a la prueba de compresión se someten a la misma después que éstas tengan de uno a cuatro días de curado. Siempre la resistencia debe aumentar con el tiempo.

La dosificación mínima de cemento será la que cumpla con lo siguiente:

-La pérdida máxima de material disgregado durante los 12 ciclos de inmersión-secado será:

14% para los suelos A-1, A-2-4, A-2-5 y A-3

10% para los suelos A-4, A-5, A-2-6 y A-2-7

7% para los suelos A-6 y A-7

-La resistencia a la compresión debe aumentar con la edad y con el contenido de cemento.

-El cambio volumétrico en cualquier momento de la prueba de humedad-secado no debe ser superior a un 2% del volumen inicial.

-El contenido de humedad en todo tiempo no debe ser mayor que el necesario para llenar los vacíos de la probeta en el momento de ser fabricada

Procedimiento constructivo

1) Limitación de la Zona de Trabajo:

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

Se despeja la zona del camino de piedras grandes, plantas y materia orgánica, se excava hasta encontrar terreno firme que servirá de apoyo a la base. La resistencia del cimiento determinada deberá contar con un CBR de al menos 20%.

2) Pulverización del Suelo:

Si además de suelo nativo se utiliza suelo de aportación, éste deberá esparcirse sobre la superficie en cantidad suficiente para lograr la proporción adecuada de la mezcla, posteriormente se procede a escarificar y mezclar los materiales, procurando una mezcla homogénea.

Si solo se usa suelo nativo se procede a cortar el material a la profundidad de la capa a estabilizar, para esto se pasa varias veces el escarificador o discos de arado rotatorio.

Si el suelo es arcilloso, presentará resistencia a pulverizarse, por lo que será necesario romper los terrones antes de pulverizarlo; si está muy húmeda formará una masa pastosa difícil de mezclar lo que encarecerá el proceso; y si es arenoso conviene humedecerlo antes de echarle el cemento para que éste no pase por los huecos a la parte inferior en detrimento de la dosificación en el resto de la capa.

En todo caso, el material se reducirá al mínimo tamaño sin romper las partículas ya que los grumos o terrones no tendrán cemento y se convertirán en elementos débiles del firme ya estabilizado.

Una vez pulverizado el suelo se reconstruye el perfil para que quede con las dimensiones dadas antes de la operación.

3) Distribución del Cemento:

La distribución del cemento se puede hacer mecánicamente, pero la forma más adecuada para lograr una distribución uniforme es haciéndolo manualmente y utilizando el cemento en fundas no a granel.

Conviene comenzar la distribución del cemento a una hora del día en que la temperatura no sea inferior a los 5°C y se espere que vaya en aumento; se hará de tal modo que la cantidad de cemento por unidad de superficie responda aproximadamente a la dosificación establecida.

Si se hacen por sacos, éstos se colocarán en hileras y filas regulares con la separación necesaria para la dosificación. Luego se abren los sacos o fundas y se deposita el cemento en el lugar en que se hallan formando pequeños montones.

Como el cemento se agrega de acuerdo a un porcentaje por volumen entonces, podemos determinar el volumen de suelo a estabilizar en cada tramo:

$$V = L \times A \times E$$

Donde:

V = el volumen del suelo a estabilizar

L = la longitud del tramo

A = el ancho de la franja

E = el espesor de la capa

Conocido el volumen de suelo lo multiplicamos por el porcentaje de cemento y obtenemos el volumen total de cemento. Conocida la cantidad de fundas de cemento a usar el área sobre la que se va a distribuir entonces podemos hacer la distribución, colocando las fundas equidistantes una de otra. Luego se esparce el cemento de forma uniforme y se procede a mezclar.

4) Mezclado Uniforme:

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

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

5) Adición del Agua:

El agua es un elemento esencial para hidratar el cemento y para facilitar la compactación, al ésta entrar en contacto con el cemento en poco tiempo se producirá una reacción química y desprendimiento de calor; esto a su vez provocará evaporación del agua incorporada, de modo que para lograr mantener la humedad óptima de compactación a la mezcla se agregará un 3% de agua adicional al porcentaje óptimo obtenido en laboratorio para éste tipo de suelo.

La distribución del agua debe ser uniforme en toda la extensión de la zona cuidándose de que no quede depositada en huecos. Después de esto, se hará una pasada de las herramientas o máquinas de que se disponga para que la mezcla quede removida hasta lograr que sea homogénea comprobándose el contenido de agua para que por defecto o por exceso no difiera de la humedad óptima en más del 10%. Tras esta operación, como después de cada una de las operaciones parciales se restituye el perfil a las dimensiones previstas.

6) Compactación:

Inmediatamente se comienza la consolidación de la capa formada hasta lograr una densidad igual cuando menos a la Proctor. La compactación se realiza partiendo de los bordes hacia el centro excepto en las curvas con peralte.

Durante la compactación debe mantenerse el contenido de agua dentro de los límites. Como casi siempre los suelos que se estabilizan son finos, el compactador adecuado es el pata de cabra. Cuando el suelo que se estabiliza es grava-arena, entonces el rodillo adecuado es aquel que cuenta con un rolo vibrador y llantas en el eje motor.

A continuación de la última pasada de la máquina que se emplee es preciso que la niveladora restituya el perfil si éste ha quedado ondulado. En tal caso es preciso humedecer de nuevo el suelo suelto y volver a compactarlo.

7) Terminación:

Una vez completada la compactación se procede a perfilar la superficie dejando la pendiente transversal o bombeo deseada, luego se da un par de pasadas de un rodillo liso de 3 a 12 ton., dependiendo del tipo de suelo.

8) Curado:

El agua es muy importante en el proceso de endurecimiento del cemento; por lo tanto, debemos preservarla evitando su evaporación, para ello, se debe hacer un riego asfáltico en proporción de 0.15 a 0.30 gal/m², el cual se puede hacer con RC-2 o emulsión de rompimiento rápido.

Si la capa estabilizadora va a servir a un tránsito ligero o medio entonces se colocará la capa de rodadura que puede consistir en un doble tratamiento superficial. Si va a servir de apoyo a un pavimento de alta calidad se aconseja que el mismo se construya después de que el cemento haya alcanzado un alto grado de resistencia.

2.2.4. Estabilización con cal

2.2.4.1. Cal en la estabilización de suelos

La cal hidratada es el agente estabilizador que se ha usado más profusamente a través de la historia, pero solo recientemente se han hecho estudios científicos relacionados a su empleo como estabilizador de suelos y se han cuantificados sus magníficos resultados.

Cuando tenemos arcillas muy plásticas podemos disminuir dicha plasticidad y consecuentemente los cambios volumétricos de la misma asociados a la variación en los contenidos de humedad con el solo hecho de agregarle una pequeña proporción de cal.

Este es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y darle un aumento en la resistencia. Los porcentajes por agregar varían del 2 al 6% con respecto al suelo seco del material para estabilizar, con estos porcentajes se

consigue estabilizar la actividad de las arcillas obteniéndose un descenso en el índice plástico y un aumento en la resistencia.

Es recomendable no usar mas del 6% ya que con esto se aumenta la resistencia pero también tenemos un incremento en la plasticidad. Los estudios que se deben realizar a suelos estabilizados con cal son: límites de Atterberg, granulometría, valor cementante, equivalente de arena, VRS, compresión.

Se ha determinado que al mezclar la arcilla con cal apagada los iones de calcio sustituyen algunos iones metálicos presentes en la película de agua que rodea a la partícula de arcilla y que son responsables de los cambios volumétricos, además, si el suelo tratado contiene suficiente sílice y alúmina estos pueden reaccionar formando silicatos de calcio y alúmina. Estos silicatos tienen un gran poder cementante, lo que implica que al agregar cal también se logra aumentar la resistencia del suelo.

Como especificamos anteriormente, la dosificación dependerá del tipo de arcilla, se agregará de 1% al 6% de cal por peso seco. Este porcentaje debe determinarse en el laboratorio, pero lo más común en la mayoría de los casos se requiere de un porcentaje cerca del 3%.

Procedimiento constructivo

La capa inferior a la que se va a estabilizar, deberá estar totalmente terminada, el mezclado puede realizarse en una planta adecuada o en campo, obteniéndose mejores resultados en el primer caso, la cual puede agregarse en forma de lechada, a granel o ensacada. Si se agrega en forma de lechada, ésta se disuelve en el agua de compactación, la que se incrementa en un 5%.

Cuando se efectúa el mezclado en el campo, el material que se va a mejorar deberá estar disgregado y acamellonado, se abre una parte y se le agrega el estabilizador distribuyéndolo en el suelo para después hacer un mezclado en seco, se recomienda

agregar una ligera cantidad de agua para evitar los polvos. Después de esto se agrega el agua necesaria y se tiende la mezcla debiendo darle un curado de hasta 48 horas de acuerdo con el tipo de arcilla de que se trate.

Se tiende la mezcla y se compacta a lo que marca el proyecto para después aplicarle un curado final, el cual consiste en mantener la superficie húmeda por medio de un ligero rocío. Se recomienda no estabilizar cuando amenace lluvia o cuando la temperatura ambiente sea menor a 5 °C, además se recomienda que la superficie mejorada se abra al tránsito vehicular en un tiempo de 24 a 48 horas.

2.2.5. Estabilización con cloruro de sodio

El principal uso de la sal es como matapolvo en bases y superficies de rodamiento para tránsito ligero. También se utiliza en zonas muy secas para evitar la rápida evaporación del agua de compactación.

La sal común es un producto higroscópico; es decir, es capaz de absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean, de ahí que sea un efectivo matapolvo al mantener la capa con un alto contenido de humedad.

Se puede utilizar en forma de salmuera o triturada. La dosificación es de 150 gr/m² por cada centímetro de espesor de la capa estabilizada contando con un máximo de 8cms.

Para mezclar es más adecuado el uso de rastras con discos rotatorios. La compactación se puede iniciar en cualquier momento luego de perfilada la superficie con el equipo adecuado al tipo de suelo. Cuando se observe que se ha perdido la sal por efecto del tránsito o las lluvias, la superficie debe rociarse con 450 gr de sal por cada metro cuadrado.

2.2.6. Estabilización con cloruro de calcio

Este producto trabaja de forma similar a la sal común, su costo es mayor, pero se prefiere debido al efecto oxidante del cloruro de sodio. En todo caso, el cloruro de calcio ayuda al proceso de compactación y contribuye con la resistencia del suelo, previene el desmoronamiento de la superficie y reduce el polvo.

Se puede utilizar de dos formas:

- En granos regulares o Tipo I
- En hojuelas o pelotillas o Tipo II

La dosificación es de 7 a 10 libras del tipo I o de 5.6 a 8 libras del Tipo II por tonelada de suelo. El mezclado, compactación y terminación son similares a los de la estabilización con cloruro de sodio.

2.2.7. Estabilización o mejoramiento con productos asfálticos

El material asfáltico que se emplea para mejorar un suelo puede ser el cemento asfáltico o bien las emulsiones asfálticas, el primero es el residuo último de la destilación del petróleo. Para eliminarle los solventes volátiles y los aceites y para ser mezclado con material pétreo deberá calentarse a temperaturas que varían de 140 a 160 °C, el más común que se emplea en la actualidad es el AC-20. Este tipo de producto tiene la desventaja de que resulta un poco más costoso y que no puede mezclarse con pétreos húmedos.

En las estabilizaciones, las emulsiones asfálticas son las más usadas ya que este tipo de productos si pueden emplearse con pétreos húmedos y no se necesitan altas temperaturas para hacerlo maniobrable, en este tipo de productos se encuentra en suspensión con el agua, además se emplea un emulsificante que puede ser el sodio

o el cloro, para darle una cierta carga a las partículas y con ello evitar que se unan dentro de la emulsión; cuando se emplea sodio, se tiene lo que se conoce como *emulsión aniónica* con carga negativa y las que tienen cloro son las *emulsiones catiónicas* que presentan una carga positiva, siendo estas últimas las que presentan una mejor resistencia a la humedad que contienen los pétreos.

Se tienen emulsiones de fraguado lento, medio y rápido, de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico que se emplea. *Una emulsión asfáltica* es una dispersión de asfalto en agua en forma de pequeñas partículas de diámetro de entre 3 y 9 micras.

Este tipo de aglutinantes puede usarse casi con cualquier tipo de material aunque por economía se recomienda que se emplee en suelos gruesos o en materiales triturados que no presenten un alto índice de plasticidad, puede usarse también con las arcillas pero solo le procura impermeabilidad, resultando un método muy costoso, además con otros productos se logra mayor eficiencia y menor costo para los suelos plásticos.

Es importante que el material pétreo que se va a mejorar, presente cierta rugosidad para que exista un anclaje adecuado con la película asfáltica, situación que se agrava si el material pétreo no es afín con el producto asfáltico. Algunos productos asfálticos contienen agua y si esto no se toma en cuenta se pueden presentar problemas muy serios al momento de compactar, la prueba que más comúnmente se emplea en el laboratorio para determinar el porcentaje adecuado de asfalto a utilizar se conoce como "prueba de valor soporte florida modificada" y el procedimiento consiste en elaborar especímenes de pétreos que presentan cierta humedad usando diferentes porcentajes de asfalto, se compactan con carga estática de 11.340 Kg. (140 Kg/cm²).

Después de esto se pesan y se meten a curar al horno a una temperatura de 60° C, se sacan y se penetran hasta la falla o bien hasta que tengan una profundidad de 6.35 mm registrándose la carga máxima en Kg., se efectúa una gráfica para obtener

el porcentaje óptimo de emulsión y se recomienda que el material por mejorar presente un equivalente de arena mayor de 40% y el porcentaje de emulsión varíe en un porcentaje de 1.

El procedimiento constructivo se desarrolla de la manera siguiente: la capa a mejorar ya tiene que estar completamente terminada. No se debe hacer la estabilización cuando hay mucho viento, menos de 5 °C o lluvia. También se puede estabilizar con ácido fosfórico y fosfatos; sulfato de calcio (yeso), resinas y polímeros.

La dosificación depende de la granulometría del suelo, suelos finos requieren mayor cantidad de bitumen, así suelos plásticos muy finos no pueden estabilizarse a un costo razonable debido a la dificultad para pulverizarlos y la cantidad de bitumen exigido. En general, la cantidad de bitumen utilizado varía entre un 4% y un 7% y en todo caso la suma de agua para compactación más el bitumen no debe exceder a la cantidad necesaria para llenar los vacíos de la mezcla compactada.

2.3. HERRAMIENTAS O MAQUINARIAS



Figura II-1. Buldócer

El **buldócer** o **bulldozer** (del inglés: niveladora) es un tipo de topadora que se utiliza principalmente para el movimiento de tierras, de excavación y empuje de otras máquinas. Aunque la cuchilla permite un movimiento vertical de elevación, con esta máquina no es posible cargar materiales sobre camiones o tolvas, por lo que el movimiento de tierras lo realiza por arrastre.



Figura II-2. Motoniveladora

Una **Moto niveladora** o llamado simplemente niveladora es una máquina de construcción para nivelar terreno. La niveladora estándar se compone de dos ejes traseros y un dirigitivo eje delantero. Una hoja regulable se encuentra entre estos dos ejes colgada de la llamada torna-mesa. Se puede rotar esta hoja en 360 °, tiene un tilt y se puede girar lateralmente, con el fin de perfeccionar la nivelación de la superficie. La motoniveladora se utiliza principalmente en la construcción de carreteras, después de que otras máquinas de movimiento de tierras, por ejemplo el buldozer o la mototrailla, hayan nivelado las desigualdades grandes del terreno.



Figura II-3. Rodillo

Niveladora Rodillo Vibrador: Los rodillos vibratorios sencillos lisos son ideales para trabajos de bacheo, caminos y pequeños estacionamientos.

Bailarina



Figura II-4. Bailarina

- Lubricación de aceite
- Dimensión de zapata opcional
- Extensiones adicionales
- Motores a Gasolina de 4 tiempos
- Motor a diesel

Los apisonadores proporcionan una alta fuerza de impacto que los hace una opción excelente para los suelos cohesivos y semi-cohesivos.

Adecuados para espacios reducidos. El rango de frecuencia es de 500 a 750 ciclos por minuto,

Rodillos vibratorios dobles



Figura II-5. Rodillos vibratorios dobles

- Rodillos sencillos con operador a pie
- Rodillos pata de cabra
- Transmisión hidráulica en todos los modelos
- Diferentes opciones de motores a Gasolina y Diesel
- Sistemas hidráulicos de bajo mantenimiento

Rodillos sencillos con ganchos para transportarlos en camión de volteo los rodillos vibratorios sencillos lisos son ideales para trabajos de bacheo, caminos y pequeños estacionamientos.

2.4. DETERMINACION DEL INDICE DE PLASTICIDAD (IP)

La consistencia: es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión-adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto.

Dichas fuerzas dependen del contenido de humedades por esta razón que la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado.

Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada.- Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

Cohesión: Esta fuerza es debida a atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por las fuerzas de Van der Waals, por otra (GAVANDE, 1976)... Además de estas fuerzas, otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas.

La cohesión, entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

Adhesión: Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta, excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas por lo cual depende de la proporción Agua/Aire.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos; uno cuando esta en estado seco debido a cohesión y otro cuando húmedo que depende de la adhesión.

Limite Plástico: Se puede llamar una tira cilíndrica cuya finalidad es hacer una pasta de suelo con agua luego es amasada hasta crear o formar un cilindro de 10 cm x 0.5 cm el grosor.

Después fragmentar con una espátula, lo cual consiste en reunir los fragmentos y empezar en el numero 2. Determinar la cantidad de humedad en 105 °C Para evaporarse, es decir el cambio de consistencia de friable a plástica. Luego se debe aplicar la siguiente fórmula (Ecuación de contenido de humedad):

$$PW = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100$$

Donde:

PW = Contenido de Humedad.

Psh = Peso de Suelo Húmedo.

Pss = Peso de Suelo Seco.

Límite Líquido: En este límite el contenido de humedad (PW) en la película de agua se hace tan gruesa que la cohesión decrece y la masa de suelo fluye por acción de la gravedad. Se realiza este proceso en la cazuela y se hace una pasta de suelo: Agua.

Colocar en la cazuela y realizar una ranura con una espátula trapezoidal para hacer una ranura por medio en dos golpear hasta que a los 20 – 25 golpes.

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

$IP = LL - LP > 10$ plástico.

$IP = LL - LP < 10$ no plástico.

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

2.4.1. Límites de Atterberg

Al realizar un análisis del perjuicio que significa ejecutar labores agrícolas en un rango de humedad no adecuado, se debe tener en cuenta lo siguiente; la forma de consistencia friable es la condición que debe poseer el suelo para la labranza; cuando se sobrepasa ese contenido óptimo de humedad, el suelo pierde sus condiciones naturales y puede adquirir una consistencia plástica o de amasamiento.

Atterberg propuso dos límites de contenido de humedad (P_w)¹ en el que el suelo puede adquirir consistencias indeseables: Límite Plástico o Inferior, donde el suelo se moldea fácilmente por la acción de una fuerza; y Límite Líquido o Superior, donde adquiere un comportamiento de masa viscosa.

La determinación del Límite Plástico se obtiene amasando una porción de suelo y formando cilindros sobre una superficie pulida, luego se cortan en varios pedazos y se reúnen nuevamente para formar un nuevo cilindro. En el momento en que no se logre formar el cilindro se toma una porción a la cual se le determina el P_w . Este valor representa el contenido máximo de humedad que puede contener el suelo para pasar a una consistencia plástica.

La diferencia entre el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP) define el Índice de Plasticidad (IP).

$$IP = LL - LP$$

Valores inferiores a 10 indican baja plasticidad, especialmente en el rango menor de 5; índices superiores a 10 y cercanos a 20 indican alta plasticidad (Malagon, 1983).

2.4.2. PROCEDIMIENTO

2.4.2.1. Procedimiento del Límite Plástico:

1. Se toma una porción de suelo, de 20 a 30 gr y se adiciona agua hasta formar una pasta.
2. Se coloca sobre un vidrio y se amasa hasta formar un cilindro de aproximadamente 3 mm de diámetro.
3. Con la Espátula corte el cilindro en pequeños trozos y reúnalos para formar nuevamente el cilindro.
4. Si no se fragmente el cilindro, repita el paso 3 de lo contrario tome una muestra y páselo a una cápsula para determinar el P_w .

2.4.2.2. Procedimiento del Límite Líquido:

1. Se toma una porción de suelo de aproximadamente 100 gr, en una cápsula de porcelana y agregar agua hasta formar una masa pastosa con ligero brillo.
2. Colocar una porción en la cazuela de Casagrande de tal manera que la parte más gruesa alcance un milímetro de profundidad.
3. Con la espátula trapezoidal, se hace una incisión en el centro de la masa.
4. Inicialice el contador del aparato en cero, y girando la manivela, deje golpear la cazuela, de 20 a 25 golpes o veces. En este momento las 2 mitades de la masa, de suelo, deben unirse en una longitud, de 1.5cm aproximadamente, si esto no se logra en el primer intento, haga una proporción suelo agua hasta conseguirlo,
5. Toma una porción de la masa y determine su PW.

2.5. MÉTODO DE LA PRUEBA DE EADES Y GRIM

2.5.1. Estabilización de Suelos Arcillosos con Cal

El objetivo de este método es proporcionar una referencia más precisa de la cantidad de cal que deber ser adicionada para lograr una estabilización de suelos arcillosos, sin embargo es importante realizar pruebas de laboratorio para verificar la capacidad de soporte final del suelo establecido. Tomar una muestra de suelo seco o húmedo de aproximadamente 2 kg y almacenar en bolsa o envase de plástico herméticamente cerrado.



Figura II-6. Prueba de Eades y Grim

1. Tamizar la muestra con una malla # 40 (425 micras) procurando desbaratar todos los grumos manualmente para hacer pasar la mayor cantidad de material por la malla.
2. Pesar una serie de 5 muestras de 20 g c/u y colocarlo en frascos iguales con tapa roscada.
3. Pesar por separado una serie de muestras de cal con equivalentes de 3, 4, 5,6 y 7 % del peso de la muestra de suelo.
4. Adicionar a cada frasco las muestras de cal.
5. Homogeneizar muy bien las muestras en los frascos.
6. Adicionar 100 ml de agua preferencialmente de la que se utilizara en la obra; agitarla vigorosamente durante un minuto cada 15 o 20 minutos durante 1 hora.
7. Posteriormente se medirá el pH de la solución obtenida, con ayuda de un potenciómetro o un papel pH.

La mezcla que de un pH cerca de 12.4 será la elegida, en caso contrario de que no llegue. Probar con otro proporciónamiento.

2.5.2. Interpretación de la prueba de Grim

- La mezcla que arroje como resultado un pH de 12.4, indicará el porcentaje de cal hidratada que habrá de ser adicionado al suelo para lograr una estabilización completa.
- Si 2 mezclas arrojan resultados iguales de 12.4, se considerará como referencia el porcentaje menor.
- Si ninguna muestra reporta un $\% \geq 12.4$, se deberán preparar otras muestras, utilizando $\%$ más elevados de cal (8, 9, 10%, etc...) hasta conseguir el pH requerido.

Después de conocer el $\%$ de cal hidratada a adicionar, se podrá calcular los kg/m^2 de cal hidratada necesarios mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Cal hidratada} = \frac{(\text{peso específico suelo}) (\text{profundidad}) (\% \text{ de Ca(OH}_2))}{100}$$

$$\text{Cal hidratada} = \text{kg/m}^2$$

$$\text{Densidad de suelo seco} = \text{m}$$

Según el doctor Enrique Quintana Crespo (2005) en su tesis doctoral es importante el tipo de cal a utilizar.

2.6. IMPORTANCIA DEL TIPO DE CAL

Existen diversos tipos de cales con características particulares que las hacen más apropiadas para ciertas aplicaciones. En las mezclas suelo –cal resultan de utilidad algunos componentes de la cal que serían indeseables para otros usos como por ejemplo la albañilería.

Dentro de los factores más importantes se han considerado los siguientes:

Cales cálcicas y dolomíticas

La menor reactividad de las cales dolomíticas con respecto a las cálcicas como consecuencia del proceso de calcinación, se traduce luego en una hidratación más lenta, por lo tanto cuando la estabilización del suelo se realiza con cal viva, deberá contemplarse el tipo de cal si se va a establecer como referencia la resistencia a la compresión en un período de tiempo determinado, normalmente 7 días – ya que la baja reactividad del MgO precisaría de tiempos mayores para llegar a las resistencias requeridas.

Cales aéreas e Hidráulicas.

Las cales aéreas son aquellas que endurecen por la acción de la carbonatación en contacto con el aire atmosférico o con el anhídrido carbónico disuelto en el agua de amasado. A diferencia de ellas existen las denominadas cales hidráulicas que endurecen bajo el agua.

Las cales hidráulicas se logran mediante la calcinación de rocas calcáreas impuras, con contenidos de arcillas o minerales compuestos por aluminatos y silicatos en cantidades entre 8 a 20%. Como puede apreciarse los componentes que dan hidráulidad a una cal, son en definitiva compuestos aluminio silicatados-como las arcillas- activados por temperatura y combinadas con el Ca(OH)_2 para formar silicatos y aluminatos de calcio. Estos compuestos son los mismos que componen la fracción puzolánica natural de los suelos loésicos, en consecuencia cuando se agrega una cal hidráulica a un suelo se está incrementando la actividad puzolánica de estos, con lo cual los resultados diferirán en el tiempo de los correspondientes a las mezclas con cales aéreas.

Reacciones suelo - cal

Las reacciones que ocurren dentro del proceso de estabilización de suelos con cal comprenden un conjunto de procesos físico químicos que han sido referidos en la literatura con los siguientes términos:

Mejoramiento: son los fenómenos que ocurren inmediatamente al agregar la cal, también denominados “de corto plazo” tales como floculación y aglomeración de partículas, disminución de plasticidad y potencial de hinchamiento, aumento de la trabajabilidad, durabilidad y constancia volumétrica, etc.

III. METODOLOGÍA

3.1. ANALIZAR E IDENTIFICAR EL SUELO PROBLEMA

Se analizara a simple vista las características del suelo con el fin de escoger el material más adecuado para recolectar la muestra de suelo

3.2. RECOLECTAR LA MUESTRA

Obtener la muestra a 2 metros de profundidad según las especificaciones del manual de mecánica de suelos I, de ITSON, Ing. civil

Observar que no contenga material orgánico. Se analizara la muestra con el fin de extraer toda materia orgánica de suelo ya que pueden alterar nuestros resultados

Cubrir adecuadamente para mantener el suelo en su estado natural. Es necesario cubrir la muestra y sellarla térmicamente con el fin de que el suelo una vez extraído conserve sus propiedades, para ellos utilizamos, manta para cubrir el cubo, y después la impregnamos de parafina y brea formando una membrana térmica.

3.3. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD

La determinación del límite plástico, límite líquido y índice de plasticidad se realizó de acuerdo al manual de Mecánica de Suelos I, que utiliza el Instituto Tecnológico de Sonora, práctica 7, límites de Atterberg (Herrera, 1998)

3.4. ELECCIÓN DEL CONGLOMERANTE (CAL O CEMENTO)

Según su índice de plasticidad se elegirá el conglomerante. De acuerdo a las investigaciones realizadas, el tipo de conglomerante a utilizar se determinará mediante el resultado del índice de plasticidad, dando que un IP menor a 10, representa un suelo no plástico y el conglomerante a utilizar era el cemento, un suelo con índice plástico mayor a 10, representa un suelo plástico que reacciona mejor con cal, la dosificación se basa en la clasificación AASHTO para cemento y prueba de Eades y Grim para la cal.

3.5. PRUEBA RÁPIDA DE EADES Y GRIM, MÉTODO DEL pH

Se realizó el procedimiento de la prueba de Eades y Grim para la determinación del pH según como lo especifica la empresa nacional, Grupo Calhidra (2010)

3.5.1. PROPUESTA DEL PORCENTAJE OPTIMO PARA LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO

Se tomará el resultado que arroje la prueba de Grim con el valor más cercano superior a 12.4

3.6. DOSIFICACIÓN PARA SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO

Para la dosificación de cemento en un suelo con IP menor a 10 nos basaremos en los porcentajes propuestos de acuerdo a las normas de dosificación de suelo-cemento propuestas por la "portland cement Association (PCA)"

IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra el procedimiento analítico que se siguió para la obtención de los resultados, así como los cálculos, fórmulas y determinación de los valores que nos llevaron a las conclusiones de este estudio.

4.1. LOCALIZACIÓN

La muestra de suelo de tomo de un lote baldío en el cual se pretende construir un fraccionamiento, en el momento de la extracción de la muestra se iniciaba el proceso de urbanización.

La muestra fue recogida en colaboración con los alumnos de ingeniería civil Jesús Alberto Angulo Armenta y Juan Eduardo Montiel Galindo quienes hicieron aportaciones importantes a este proyecto de tesis



Figura IV-1. Zona donde se recolecto la muestra de suelo

4.2. DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP):

4.2.1. Determinación del límite líquido (LL)

Prueba del Penetrómetro, determinación de % de humedad

Tabla 2. Tabla de resultados, contenido de humedad de las muestras

Prueba No.	1	2	3	4
Penetración promedio	10.63	11.06	21.93	24.8
Peso Recipiente + W_h	100.3	126.2	98.3	100.7
Peso Recipiente + W_s	88.6	113.9	85.1	86.2
Peso Recipiente (g)	50.3	76.2	48.3	50.7
Peso suelo seco (g)	38.3	37.7	36.8	35.5
Peso de agua (g)	11.7	12.3	13.2	14.5
Contenido de humedad %	30.54 %	32.62%	35.86%	40.84%

Grafica de prueba del cono:

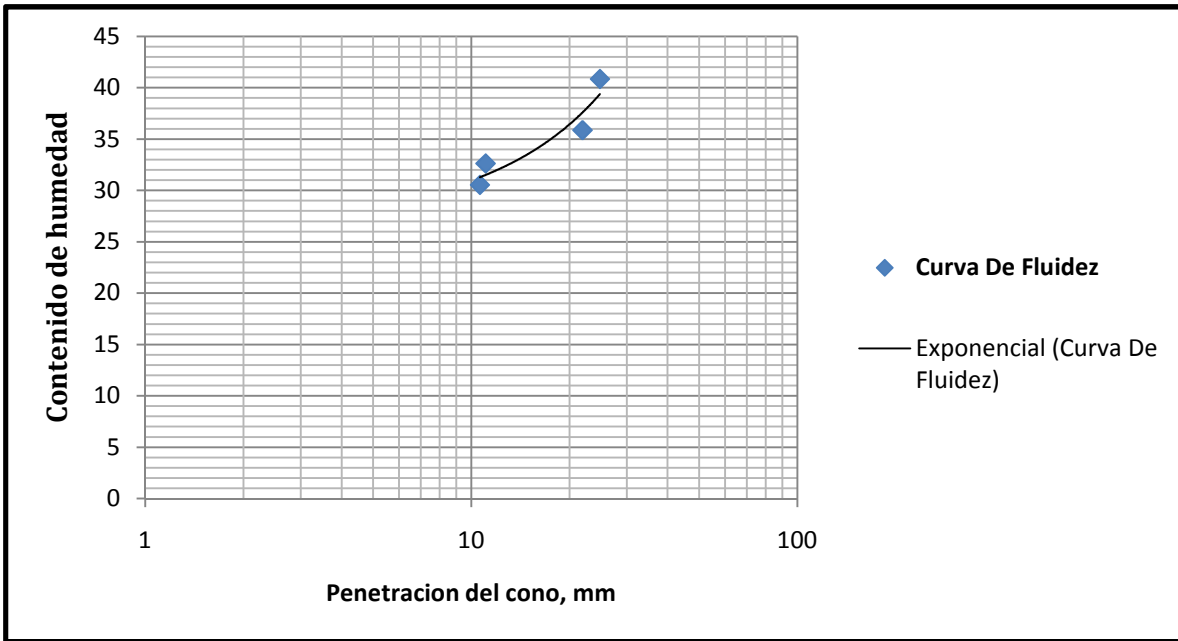


Figura IV-2. Grafico de prueba del cono

Ecuación de la línea: $Y=0.573(X) + 25.15 = 0.573(20) + 25.15 = 36.61$

Limite Liquido (LL) = **36.61**

4.2.2. Determinación del límite plástico (LP):

Datos de las muestras para determinar el LP

Tabla 3. Resultados de determinación de límite plástico (LP)

Prueba No.	1	2	Promedio
Peso Recipiente + W_h	50.8	50.1	50.45
Peso Recipiente + W_s	50.3	49.6	49.95
Peso Recipiente	47.6	46.1	46.85
Peso suelo seco (g)	2.7	3.4	3.1
Peso de agua (g)	0.5	0.6	0.55
Contenido de humedad %	18.51	17.64	18.075

LP = **18.075**

$$IP = LL - LP$$

$$IP = 36.61 - 18.075 = 18.425\%$$

$$IP = LL - LP > 10 \text{ plástico.}$$

$$IP = LL - LP < 10 \text{ no plástico}$$

Se considera una arcilla plástica por tener un IP mayor a 10, se recomienda utilizar como conglomerante la cal ya que funciona mejor para este tipo de suelo.

4.2.3. Resumen de resultados arrojados de la muestra:

Nombre del suelo probado: Arcilla, roja

Clasificación SUCS: CH; arcilla de alta compresibilidad.

Clasificación AASHTO: A-6 (5)

Descripción: arcilla color rojo sin presencia apreciable de materia orgánica. Textura muy fina, los cuales son arcillas inorgánicas

Origen: Excavación en Fraccionamiento Lander, "Mision del Real" a una profundidad de 2.00 metros; producto de la obtención del cubo extraído.

Contenido de humedad natural (w) = 8.34 %

Peso específico en estado suelto (γ_m) = 0.78 g/cm³ = 788.15 kg/m³ = 7.72 kN/m³

Peso específico en estado inalterado (γ_m) = 1.45g/cm³ = 1459.3kg/m³ = 14.31kN/m³

Densidad de sólidos (Ss) = 2.29

Límite Líquido, usando el Penetrómetro de Cono, (LL) = 36.5%

Límite Plástico (LP) = 18.075%

Índice Plástico (LL obtenido con el Penetrómetro de Cono) = 18.425%

4.3. PRUEBA DE EADES Y GRIM

El procedimiento de esta prueba consiste en la obtención del pH para determinar el porcentaje de cal necesaria para la estabilización del suelo, de esta manera se prepararon las muestras y arrojamos los resultados que se mostraron a continuación.



Figura IV-3. Material cribado en malla #40

Para la prueba de Eades y Grim se preparo el material pasándolo por la malla No. 40, la cantidad de 958 gr, con esta misma materia se prepararon en un principio 7 pruebas de 20 gr, cada una de ellas se le adicionó el porcentaje recomendado.



Figura IV-4. Maquina cribadora

Por medio de esta máquina cribadora fue más sencillo realizar la extracción del material que nos interesaba para aplicar la prueba de Eades y Grim

Se peso los gramos de cal a utilizar según la cantidad que se introdujo de tierra.



Figura IV-5. Preparación de las muestras con su porcentaje de conglomerante

Para una muestra de suelo de 20 gr, se le agrego el porcentaje recomendado de cal, en base al peso del mismo suelo: ejemplo:

Peso de suelo de muestra 1: 20 gr

Porcentaje recomendado: 2%

Operación: $(20 \text{ gr}) \cdot (2/100) = .4 \text{ gr}$

Esta misma dinámica se aplico para el resto de las muestras



Figura IV-6. Muestras preparadas con porcentajes: 2%,3%,4%,5%,6%, 7% y 8%.

Se agitaron las muestras por 30 segundos cada 10 minutos durante 1 hora, una vez pasado la hora se procede a medir el pH de cada una de las muestras no si antes calibrar el medidor de pH mediante la solución amortiguadora, se utilizo la solución de 10 por ser la más cercana al resultado que debemos obtener.



Figura IV-7. pH-metro utilizado en las pruebas realizadas

Los resultados arrojados fueron los siguientes:

Tabla 4. Tabla de resultados de medición del pH

Muestra	peso en (gr)	Porcentaje %	agua añadida (ml)	peso cal (gr)	pH
M-1	20	2	100	0.4	14.04
M-2	20	3	100	0.6	14.1
M-3	20	4	100	0.8	14.48
M-4	20	5	100	1	14.48
M-5	20	6	100	1.2	14.67
M-6	20	7	100	1.4	14.65

M-7	20	8	100	1.6	14.77
-----	----	---	-----	-----	-------

Como el pH requerido es de 12.4 y el resultado más bajo fue de 14.04 con un porcentaje de 2% se procedió a medir el pH del suelo para tener una mejor visualización de la información recabada.

Se preparo la muestra con contenido de cal dando el siguiente resultado:

Muestra 1 de suelo sin conglomerante (Cal):

Tabla 5. Resultado de pH del suelo sin conglomerante

Muestra	peso en (gr)	Porcentaje %	agua añadida (ml)	peso cal (gr)	pH
M-1	20	0	100	0	9.7

Obtuvimos un suelo alcalino, así que fue necesario reducir los porcentajes a 1%, 0.5% y 0.25%. Fue necesario doblar la cantidad de tierra a 40 gr, y la cantidad de agua a 200 ml con el fin de reducir a la mitad la reacción de la cal, debido a la sensibilidad de la balanza.

De esta manera se prepararon 3 muestras más con el porcentaje de 1%, 0.5% y 0.25%



Figura IV-8. Muestras de menor porcentaje de cal

Arrojando los siguientes resultados:

Tabla 6. Tabla de resultados de la segunda comparación con menor porcentaje

Muestra	peso en (gr)	Porcentaje %	agua añadida (ml)	peso cal (gr)	pH
M-9	40	1	200	0.4	12.67
M-10	40	0.5	200	0.2	11.48
M-11	40	0.25	200	0.01	11.42

Como resultado obtuvimos un pH de **12.67** con un porcentaje optimo de cal de **1 %**, se doblaron las cantidades de tierra y agua entonces prácticamente las porciones de cal disminuyeron a la mitad, dando qué $(.4/2) = 0.2$ gr de cal, es decir un 1%

Por cada 1000 kilogramos de suelo, se estabilizara con 10 kg de cal

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se cumplió con el objetivo establecido al inicio del estudio ya que por medio del método propuesto se encontró la dosificación óptima de la muestra de suelo, los resultados más importantes de la metodología que se siguió fue lo siguiente:

- 1) Se realizó la prueba para determinar los límites de Atterberg lo cuales arrojaron un índice de plasticidad de 18.425
- 2) Por tener un índice plasticidad mayor a 10 se determinó que era un suelo plástico y el conglomerante que reacciona mejor para este tipo de material y nos implica menores costos es la Cal.
- 3) Se realizó la prueba de Eades y Grim la cual arrojó que el porcentaje óptimo de cal fue de 1% con un pH de 12.67

Tomando como base las aportaciones de los autores, Crespo (2007), Grupo Calhidra (2010) "portland cement Association (PCA)" establecimos una metodología para determinar la elección y dosificación del conglomerante para cualquier tipo de suelo.

Como recomendaciones al estudio hecho consideramos que es necesario realizarle pruebas de resistencia para observar las propiedades mecánicas que adquiere el suelo, con esto analizaremos y comprobaremos el resultado que nos arroja la utilización de este método.

VI. BIBLIOGRAFÍA

(FICEM), L. F. (2007). *ingenieria*. Recuperado el 23 de 11 de 2011, de C:\Users\Dago\Desktop\tesis, estabilizacion quimica de suelos\SUELO - CEMENTO 1a_ Parte - Ingeniería.mht

Arias, Z., Duran, E., & Nicolle, P. (01 de junio de 2011). *scribd*. Recuperado el 13 de noviembre de 2011, de <http://es.scribd.com/doc/57971514/estabilizacion-SueloCemento>

Atterberg, 1.-1. (s.f.). *wikipedia*. Recuperado el 27 de 11 de 2011, de <http://es.wikipedia.org/wiki/Atterberg>

Calhidra, G. (s.f.). Recuperado el 24 de 11 de 2011, de <http://calidra.com/mejores-practicas/grupo-calidra-y-su-compromiso-con-el-medio-ambiente>

Concreto, i. s. (12 de 2006). Recuperado el 24 de 10 de 2011, de <http://iscyc.net/files/DMS/ISCYC%2043%20DIC.06.pdf>

Crespo. (2005). *tesis doctoral*. Recuperado el 02 de 11 de 2011, de http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/quintana/TESIS_COMPLETA.pdf

Herrera, L. (1998). *Manual de Laboratorio de Mecánica de suelos I*. Obregón, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.

Interamericana, f. (s.f.). *ingenieria civil*. Recuperado el 13 de 11 de 2011, de <http://ingenieria-civil2009.blogspot.com/2010/09/carreteras-de-suelo-cemento.html>

Rocha, M. (2002). *dosificacion de mezclas de suelo-cemento, normas de dosificacion*. la paz: asociacion brasileña del cemento portland.