

Proyecto N° UI-06-07

GUÍA PARA LA ESTABILIZACIÓN O MEJORAMIENTO DE RUTAS NO PAVIMENTADAS

Informe final

Preparado por
Unidad de Investigación (UI)

Ing. Fabián Elizondo Arrieta

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506) 25114382

E-mail: felizondo@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Denia Sibaja Obando

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica

Tel: (506) 25114994

E-mail: dsibaja@lanamme.ucr.ac.cr

San José, Costa Rica

Noviembre 2008

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	6
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Justificación e importancia	7
1.2. Objetivo General.....	9
1.3. Objetivos específicos.....	9
CAPÍTULO 2 ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES, CONCEPTOS GENERALES	10
2.1. Definición.....	10
2.2. Usos de la estabilización.....	10
2.2.1 Mejoramiento de la calidad.....	11
2.2.2 Reducción del espesor	11
2.3. Tipos de estabilización	11
2.3.1 Mecánicas.....	11
2.3.1.1 Concepto	11
2.3.1.2 Diseño.....	12
2.3.2 Con aditivos.....	13
CAPÍTULO 3 ESTABILIZACIÓN CON ADITIVOS.....	14
3.1 Selección del aditivo. Factores que se deben considerar.....	14
3.1.1 Tipo de suelo y aditivos.....	14
3.1.2 Selección de opciones de aditivos para la estabilización.....	15

3.2	Determinación del contenido del aditivo estabilizador	18
3.2.1	Estabilización con cemento hidráulico	18
3.2.1.1	Contenido de cemento para el mejoramiento de suelos	19
3.2.1.2	Contenido de cemento hidráulico para la estabilización de suelos	20
3.2.2	Estabilización con cal	23
3.2.2.1	Contenido de cal para el mejoramiento de suelos	25
3.2.2.2	Contenido de cal para la estabilización de suelos	25
3.2.3	Estabilización con bitumen	28
3.2.3.1	Diseño de mezcla	32
3.2.4	Estabilización con cal – cemento y cal – bitumen	35
3.2.4.1	Estabilización con cal – cemento	35
3.2.4.2	Estabilización con cal – bitumen	35
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN		37
4.1	Construcción con cemento Pórtland	37
4.1.1	Etapas generales para la construcción	37
4.1.2	Equipo de mezclado	38
4.1.3	Distribución de cemento	38
4.1.4	Construcción	40
4.1.4.1	Preparación	40
4.1.4.2	Proceso de trabajo	41
4.1.5	Problemas constructivos especiales	44
4.2	Construcción de una base estabilizada y/o mejorada con cal	45
4.2.1	Métodos de estabilización con cal	45
4.2.1.1	Estabilización en sitio	46
4.2.1.2	Estabilización en planta	47
4.2.1.3	Estabilización mediante inyección a presión	47
4.2.2	Procedimiento de construcción	48
4.2.2.1	Preparación del suelo	48
4.2.2.2	Aplicación de la cal	48

4.2.2.3 Pulverización y mezclado	49
4.3 Construcción de una base estabilizada y/o mejorada con bitumen.....	53
4.3.1 Equipo para mezclado en sitio.....	53
4.3.2 Equipo de colocación	55
4.3.3 Construcción (mezclado en sitio)	55
CAPÍTULO 5: CONDICIONES EXISTENTES EN COSTA RICA PARA LA FACTIBILIDAD DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES.....	61
5.1 Características de los materiales	61
5.1.1 Suelos residuales rojizos (símbolo "Lat")	63
5.1.2 Suelos residuales de color amarillento (símbolo "Am").....	64
5.1.3 Suelos aluviales (símbolo "Lic"):	64
5.1.4 Suelos volcánicos V3	65
5.1.5 Suelos en zonas húmedas (V3w, Latw, Amw):	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución y ubicación de la Red Vial nacional	7
Figura 2: Estado de la Red Vial nacional.....	8
Figura 3: Selección de los aditivos	16
Figura 4: Determinación del contenido de cal (alternativo)	26
Figura 5: Fases de la estabilización en sitio	37
Figura 6: Dosificador automático de cemento en polvo	39
Figura 7: Dosificación manual de cemento en polvo.....	39
Figura 8: Escarificadora.	41
Figura 9: Compactador de rodillo y de llanta de hule.	43
Figura 10: Construcción con cal.	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz para la selección del aditivo estabilizador.....	17
Tabla 2: Requerimientos granulométricos para material de base y subbase estabilizadas con cemento.	19
Tabla 3: Requerimientos de cemento para distintos tipos de suelos.....	21
Tabla 4: Resistencia mínima a la compresión inconfiada para suelos estabilizados.	22
Tabla 5: Requerimientos de durabilidad.....	22
Tabla 6: Requerimientos granulométricos para material de base y subbase estabilizadas con cal.	25
Tabla 7: Graduaciones recomendadas para materiales de sub-rasante.....	31
Tabla 8: recomendadas para materiales de bases y sub-bases	31
Tabla 9: Porcentaje de emulsión requerida	32
Tabla 10: Criterios de diseño Marshall para mezclas con asfalto rebajado.....	33
Tabla 11: Porcentaje de vacíos mínimos en el agregado mineral.	34
Tabla 12: Criterios de diseño, basados en parámetros Marshall para mezclas de emulsión asfáltica - agregado.	34
Tabla 13: Tipo de suelo característico de rutas de lastre.....	62

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e importancia

En Costa Rica se cuenta con un total de 2714km de carreteras en lastre que forman parte de la red vial nacional, durante el 2008 y 2009 se piensa invertir sumas considerables en el mantenimiento de estas rutas.

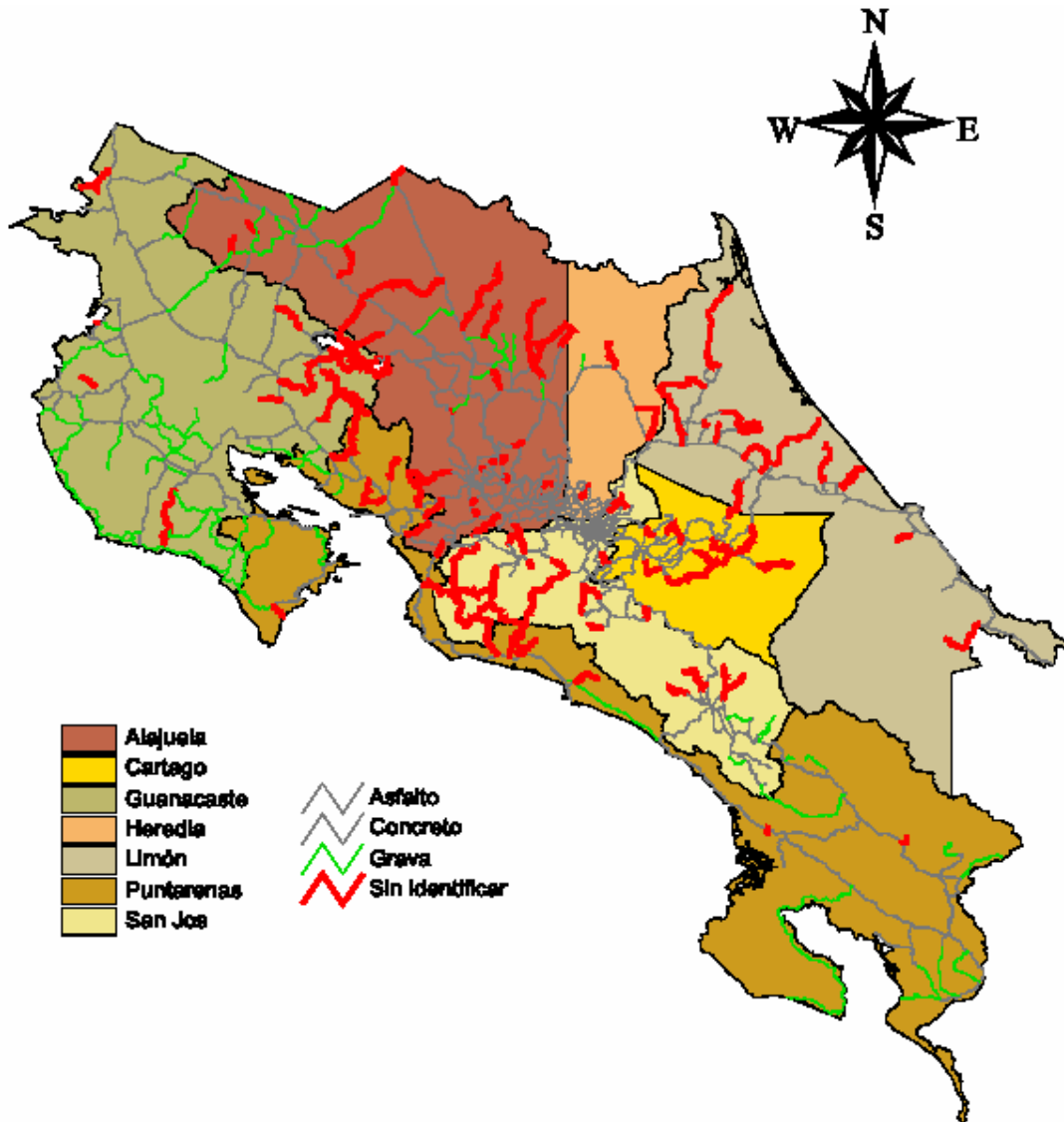
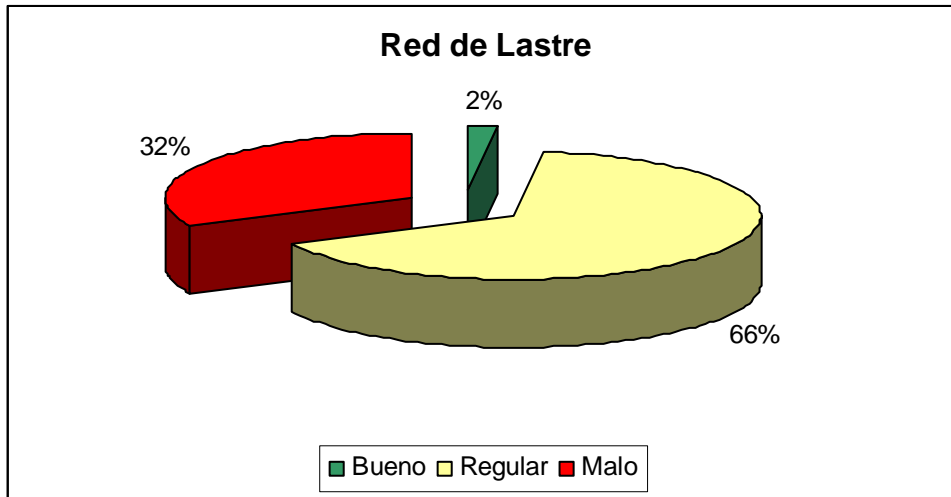


Figura 1: Distribución y ubicación de la Red Vial nacional



Bueno	50.510
Regular	1814.990
Malo	881.620
Total	2747.120

Figura 2: Estado de la Red Vial nacional
(Fuente: Evaluación de la Red Vial Nacional, 2006)

Este nivel de inversión genera la necesidad de contar con un mayor número de técnicas y opciones para el mantenimiento de estas rutas que las utilizadas actualmente, las cuales se reducen básicamente a la nivelación y el relastre de la superficie de ruedo, alternativas que aunque son comparativamente baratas requieren de un mantenimiento intensivo que se ve incrementado por el clima característico de nuestro país.

Algunas de las técnicas de estabilización han sido utilizadas en otros países con gran éxito, logrando aumentar la vida útil de este tipo de rutas, disminuyendo la frecuencia en el mantenimiento que, al analizar a mediano y largo plazo resultan ser soluciones competitivas económicamente, ofreciendo mejores superficies de ruedo y que indiscutiblemente poseen un mejor desempeño ante condiciones de lluvia y humedad extrema como las presentes en CR, en donde la época lluviosa abarca más del 50% del año en muchas zonas.

Otra consideración importante es que este tipo de soluciones, no son exclusivas de carreteras de lastre, también son utilizadas en el mejoramiento de sub-rasantes dentro de una estructura de pavimento para volúmenes medios y altos de tránsito, mejorando por mucho la capacidad estructural de estos materiales, impermeabilizando el resto de capas de la estructura y evitando la migración de finos o contaminación del paquete estructural con la consecuente desmejora en su desempeño.

1.2. Objetivo General

Desarrollar una guía práctica para la estabilización de sub-rasantes en Costa Rica, basada en un profundo estudio bibliográfico, en experiencias internacionales y tomando en cuenta la factibilidad de la aplicación de las diferentes técnicas en Costa Rica.

1.3. Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica enfocada en conocer las alternativas más utilizadas en la estabilización de sub-rasantes, y las consideraciones generales requeridas para su aplicación.
- Plantear las alternativas de estabilización más recomendadas para ser utilizadas en Costa Rica, basadas en criterios como: características de las sub-rasantes (suelos) predominantes en Costa Rica, equipos requeridos para su construcción, disponibilidad de los estabilizadores en el país, entre otros.
- Recomendar los posibles métodos de diseño y ensayos requeridos para garantizar un desempeño adecuado y la correcta estabilización de las Sub-rasantes.
- Investigar respecto a la tecnología existente para la implementación de estas alternativas, el estado en el que se encuentra este tipo de tecnologías y posibles experiencias que se hayan tenido en nuestro país.
- Revisar resultados en cuanto a desempeño entre las diferentes alternativas de estabilización.
- Establecer los costos relacionados con la estabilización de subrasantes (implementación – construcción)

CAPÍTULO 2 ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES, CONCEPTOS GENERALES

2.1. Definición

La estabilización es el proceso de combinar o mezclar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades.

El proceso puede incluir la mezcla entre diversos tipos de suelos para alcanzar una graduación deseada (estabilización mecánica) o la mezcla del suelo con aditivos disponibles en el mercado (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura o plasticidad. Igualmente el estabilizante puede actuar como ligante para la cementación del suelo.

El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varíen dentro de los rangos adecuados. Con esto se logran tres objetivos importantes: adecuada **estabilidad** ante las cargas, **durabilidad** de la capa y una **variación volumétrica** mínima.

2.2. Usos de la estabilización

El diseño de pavimentos se basa en la premisa de que el paquete es tan competente como cada una de las capas que lo componen. Por lo tanto cada capa debe soportar el cortante, las deflexiones excesivas que causan el agrietamiento por fatiga y prevenir la excesiva deformación permanente.

Entonces, la calidad de la capa de suelo puede ser mejorada de forma tal que con menores espesores se logre una mejor distribución de cargas.

Los dos usos principales de la estabilización son:

2.2.1 Mejoramiento de la calidad

Una de las principales mejoras que se logran a través de la estabilización de la subrasante es en cuanto a la graduación del suelo. Igualmente se logra reducir el índice de plasticidad y el potencial de expansividad. Por otro lado se incrementa su durabilidad y dureza. En climas húmedos la estabilización puede también ser usada para proveer una superficie más aptas para llevar a cabo operaciones constructivas. Estos tipos de mejoras pueden ser llamadas: "modificación del suelo".

2.2.2 Reducción del espesor

La dureza y rigidez del suelo puede ser mejorada a través de la incorporación de aditivos que permitan la reducción en los espesores de diseño, respecto a los materiales sin tratar. Los espesores de diseño de la base o la subbase pueden ser reducidos si el material estabilizado presenta la graduación, la dureza, la estabilidad y la durabilidad requerido.

En los casos en los que se requiere realizar sustitución de material, la posibilidad de reducir el espesor del material que se va a colocar es de mucha utilidad ya que se reducen los costos en cuanto a excavaciones.

2.3. Tipos de estabilización

2.3.1 Mecánicas

2.3.1.1 Concepto

La estabilización mecánica es la combinación o mezcla de suelos con dos o más graduaciones, para obtener un "nuevo" material, ya sea para material de base, subbase o cualquier otro material deseado. Lo que se busca entonces es complementar las características en cuanto a graduación de los suelos existentes

en el lugar del proyecto con materiales que le provean mejores características granulométricas principalmente.

Otro de los objetivos de este tipo de estabilización es mejorar la **plasticidad** de los materiales, es decir, disminuir la susceptibilidad del material a la humedad y mejorar su capacidad drenante. Esto último está íntimamente relacionado con la resistencia, la trabajabilidad y la compacidad (compactación) final.

Cuando se emplea este tipo de estabilización, lo importante es utilizar las proporciones adecuadas de cada material, esto se puede lograr mediante prueba y error y/o empleando diagramas triangulares, cuando se trate de tres materiales diferentes.

2.3.1.2 Diseño

Para diseñar una estabilización mecánica, es necesario conocer las siguientes propiedades del material:

- Porcentaje pasando el tamiz de 0.40mm (malla N° 40)
- Límite Líquido e Índice de Plasticidad
- Equivalente de arena
- Curvas granulométricas

Con base en estos datos y conociendo las especificaciones o requerimientos para el material que se va a generar se inicia el cálculo de los porcentajes de cada material utilizando proporciones de los materiales de acuerdo con sus características actuales y teniendo en cuenta las características que se quieren lograr.

2.3.2 Con aditivos

Los **aditivos** son productos que cuando son agregados al suelo en las cantidades apropiadas mejoran algunas de sus propiedades ingenieriles, tales como resistencia, textura, trabajabilidad y plasticidad.

Es importante que los aditivos estabilizantes sean incorporados en porcentajes apropiados, y que sean **seleccionados de acuerdo a la característica que se le desea mejorar al suelo.**

Cuando se desean mejorar características tales como graduación, trabajabilidad y plasticidad, se requieren cantidades mínimas de aditivos (mejoramiento de materiales), sin embargo cuando se desean mejorar propiedades como resistencia y durabilidad de manera significativa se necesitan cantidades mayores de aditivos (estabilización de materiales).

En el siguiente capítulo se describen los tipos de estabilización con aditivos más utilizadas.

CAPÍTULO 3 ESTABILIZACIÓN CON ADITIVOS

3.1 Selección del aditivo. Factores que se deben considerar

Los factores que deben de ser considerados en la selección de un estabilizador son, el tipo de suelo a estabilizar, el propósito para el cual la capa será utilizada, el tipo de mejora que se desea del suelo (objetivo de la estabilización), la resistencia requerida y durabilidad de la capa estabilizada, las condiciones ambientales y el costo.

3.1.1 Tipo de suelo y aditivos

Pueden existir varios candidatos o aditivos para la estabilización de un tipo de suelo específico, sin embargo, existen algunas consideraciones generales que permiten seleccionar un estabilizador específico como el más apto, basado en la granulometría, plasticidad o textura del suelo. Por ejemplo el cemento Pórtland es utilizado en una gran variedad de tipos suelos; sin embargo dado que es sumamente importante que esté íntimamente mezclado con la fracción fina del suelo ($<0.074\text{mm}$), los materiales mas plásticos deben ser evitados. Generalmente aquellos materiales granulares bien graduados que posean suficientes finos que produzcan o permitan una matriz de agregado homogénea, son los mas deseados para la estabilización con cemento Pórtland.

Por su parte la cal reaccionará con los suelos de mediana y alta plasticidad produciendo un decremento en el Índice de Plasticidad, aumento de trabajabilidad, disminución de expansión, y aumento de resistencia. La cal es utilizada para la estabilización de una gran variedad de materiales incluyendo suelos de muy baja resistencia, transformándolos en una "superficie de trabajo" o sub base; además con cantidades marginales de materiales granulares de base como las grava arcillas, gravas "sucias" pueden formar una base de alta resistencia y calidad. En la práctica es común la utilización de pequeñas cantidades de

cemento Pórtland junto con la cal para aumentar resistencia.

El bitumen y materiales bituminosos son empleados para impermeabilizar y aumentar la resistencia, generalmente los suelos deseables para una estabilización con materiales bituminosos son las arenas sedimentarias y los materiales granulares ya que se requiere que las partículas de suelo queden completamente cubiertas.

3.1.2 Selección de opciones de aditivos para la estabilización

La selección de las opciones de aditivos para la estabilización se podría realizar mediante la Figura 3 y la Tabla 1. En la Figura 3 se define un triángulo basado en las características granulométricas del suelo, específicamente en el tamaño de las partículas y porcentajes retenidos en ciertas mallas (Nº4 y Nº200). Este triángulo es dividido en varias áreas de suelos con tamaños de partículas similares y características de pulverización.

El proceso de selección continúa con la Tabla 1, en la cual se especifican para cada área de suelos mostrados en la Figura 3, opciones de aditivos y restricciones basados en el tamaño de partícula o el índice de plasticidad (IP).

Además en la segunda columna de esta tabla se muestra una lista con los tipos de suelos (SUCS) que entrarían dentro de esta categoría, esta caracterización se utilizaría para comprobar que el área fue seleccionada correctamente.

Para iniciar con el proceso de selección de las opciones de aditivo se requiere de la información granulométrica y los límites de Atterberg del suelo. La información requerida para ingresar en la Figura 3 es: el porcentaje de material pasando la malla Nº200 y el porcentaje de material pasando la malla Nº4 pero retenido en la malla nº200. Se ingresa a la Figura 3 con estos dos valores y el área correspondiente (1A, 2A, 3, etc.) es ubicada mediante la intersección de estos dos valores.

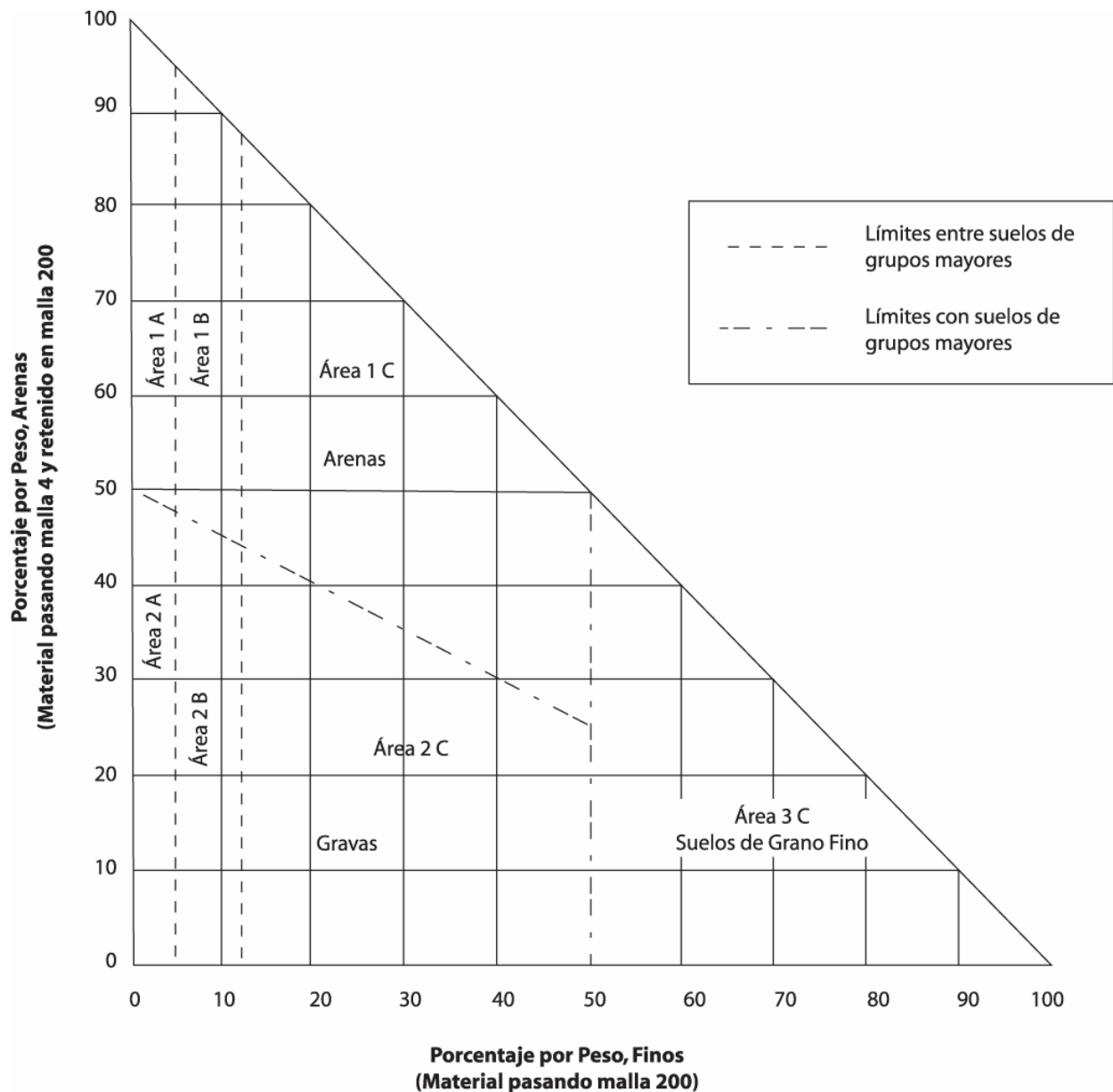


Figura 3: Selección de los aditivos

El área determinada mediante la Figura 3 es ubicada en la primera columna de la Tabla 1 y el tipo de suelo podrá ser chequeado en la segunda columna. Las opciones de aditivos para la estabilización según el tipo de suelo son propuestos en la tercer columna y las restricciones para el uso de cada aditivo son presentadas en las columnas siguientes. Las restricciones establecidas para prevenir el uso de algunos aditivos estabilizadores bajo condiciones particulares del suelo, para las cuales no son aplicables.

Una vez seleccionado el tipo de aditivo estabilizador se deben de preparar y ensayar especímenes en laboratorio para definir, mediante el diseño de mezcla las condiciones mínimas con las que se cumplen los criterios para la estabilización en campo.

Tabla 1: Matriz para la selección del aditivo estabilizador

Área	Clase de Suelo	Tipo de estabilizador Aditivo recomendado	Restricción en LL e IP del suelo	Restricción en porcentaje pasando la malla No. 200	Comentarios
1A	SW ó SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		
1B	SW-SM ó SP-SM ó SW-SC ó SP-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no exceda a 12 IP no exceda a 25		
1C	SM ó SC ó SM-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no menor de 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	
2A	GW ó GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2B	GW-GM ó GP-GM ó GW-GC ó GP-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no menor de 12 IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2C	GM ó GC ó GM-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	Material bien graduado solamente
3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1) Portland (2) Cal	LL menor de 40 e IP menor de 10 IP no menor de 12		Materiales orgánicos y altamente ácidos que se encuentran dentro de esta área no son susceptibles a la estabilización por mecanismos ordinarios.

^a La calificación del suelo corresponde a MIL-STD-619B. Restricción en el líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP) está de acuerdo con el Método 103 en MIL-STD-621A.

^b $IP \leq 20 + \frac{50 - \text{porcentaje pasando malla No. 200}}{4}$

3.2 Determinación del contenido del aditivo estabilizador

3.2.1 Estabilización con cemento hidráulico

Esta técnica de estabilización surgió, en sus inicios como un mecanismo, para evitar el bombeo de finos cuando se construía pavimentos rígidos, ya que el cemento lograba aglomerar las partículas y evitaba que el agua las disolviera, de esta forma se impedía que la losa de concreto se socavara.

La estabilización del suelo, en el caso de las subrasantes puede llevarse a cabo in situ, sin embargo, si se piensa estabilizar otros materiales, para su uso en capas del paquete del pavimento, se puede realizar en planta, para asegurar la rigurosidad de los controles de calidad.

El cemento hidráulico puede ser utilizado para modificar y mejorar la calidad del suelo o también para transformar el suelo en una masa cementada con incremento en resistencia y durabilidad. La cantidad de cemento a utilizar dependerá de si se desea modificar o estabilizar el suelo presente.

Los requisitos granulométricos para una base o sub base estabilizada con cemento se indican en la Tabla 2.

Tabla 2: Requerimientos granulométricos para material de base y subbase estabilizadas con cemento.

Tipo de material	Tamaño de la malla	Porcentaje pasando
Base	1 ½	100
	¾	70-100
	No. 4	45-70
	No. 40	10-40
	No. 200	0-20
Subbase	1 ½	100
	No. 4	45-100
	No. 40	10-50
	No. 200	0-20

3.2.1.1 Contenido de cemento para el mejoramiento de suelos

Mejoramiento de plasticidad: La cantidad de cemento requerida para mejorar la calidad del suelo mediante la modificación es determinada mediante una aproximación por prueba y error. Si se desea reducir el Índice de plasticidad (IP) de un suelo, se deberá preparar diferentes especímenes de suelo-cemento a diferentes dosificaciones para luego determinar el IP (ASTM D 423 y ASTM D 424) para cada contenido de cemento. El contenido de cemento mínimo será aquel que cumpla con el IP deseado. Debido a que el IP es calculado con la fracción que pasa la malla N°40 se debe de realizar un ajuste del contenido de cemento basado en el peso total de la muestra, lo anterior mediante la siguiente expresión.

$$A = 100BC$$

Ecuación 1

Donde:

A: Contenido de cemento del diseño, como porcentaje del peso total de suelo.

B: Porcentaje pasando la malla N°40, expresado en decimales.

C: Porcentaje de cemento requerido para obtener el PI deseado para la fracción pasando la malla N°40, expresado como decimal.

Mejoramiento de granulometría: Si el objetivo de la modificación es mejorar la granulometría de un suelo granular mediante la adición de finos, se deberá realizar el ensayo de granulometría (ASTM D 422) a varias dosificaciones de cemento hasta determinar el contenido mínimo aceptable.

Reducción del hinchamiento o expansión: Dosificaciones bajas de cemento podrán reducir la susceptibilidad a la expansión de algunos suelos con estas características, sin embargo, el cemento Pórtland no es considerado tan efectivo como la cal y puede incurrir en costos muy elevados.

3.2.1.2 Contenido de cemento hidráulico para la estabilización de suelos

El siguiente procedimiento es recomendado para determinar el contenido de cemento hidráulico de diseño para suelo cemento estabilizado.

Paso 1: Determinar la granulometría y clasificación del suelo original a estabilizar mediante los procedimientos ASTM D 2487 y ASTM D 244, respectivamente.

Paso2: Utilizando la clasificación del suelo, seleccione un contenido de cemento estimado para realizar ensayos de humedad densidad, los contenidos de cemento se obtienen mediante la Tabla 3.

Tabla 3: Requerimientos de cemento para distintos tipos de suelos

Clasificación del suelo	Contenido inicial (estimado) de cemento. Porcentaje de peso seco
GW, SW	5
GP, GW-GC, GW-GM, SW-SC, SW-SM	6
CC, GM, GP-GC, GP-GM, GM-GC, SC SM, SP-SC, SP-SM, SM-SC, SP	7
CL, ML, MH	9
CH	11

Paso 3: Utilizando el contenido de cemento estimado, realizar el ensayo de densidad-humedad para determinar la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptima de la mezcla de suelo cemento. El procedimiento establecido en ASTM D 558 deberá ser utilizado para preparar las mezclas de suelo cemento y realizar los cálculos necesarios; el procedimiento ASTM D1557 será utilizado para realizar en ensayo de humedad densidad.

Paso 4: Preparar muestras por triplicado de la mezcla de suelo cemento para los ensayos de compresión inconfiada y durabilidad. Los contenidos de cemento a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cemento determinado en el paso 2 y al **2% de cemento por arriba y por debajo** de esta dosificación. Las muestras deberán ser preparadas a la densidad y contenido de humedad que se prevé estará presente en el campo. Los especímenes deben de prepararse de acuerdo con el ASTM D1632, exceptuando cuando mas del 35% del material esté retenido en el tamiz N°4 para el cual se deberían de utilizar moldes de 4 pulgadas de diámetro por 6 pulgadas de altura. Los especímenes preparados se deberán de curar por un periodo de 7 días en un cuarto de humedad controlada antes de ser ensayados.

Tres especímenes se deberán de fallar a compresión inconfiada de acuerdo con el procedimiento ASTM D1633, y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad, este ensayo podrá ser realizado mediante ciclos de humedecido y secado (ASTM D559) o congelamiento y descongelamiento (ASTM D 560).

Paso 5: Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones contractuales, o con las especificaciones recomendadas en la Tabla 4 y en la Tabla 5. El contenido de cemento más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión inconfiada y demuestre la durabilidad requerida, será el contenido de cemento de diseño.

En caso de que la mezcla cumpla con los requerimientos de durabilidad no así con los requerimientos de resistencia se dirá que el suelo esta en una condición modificada o mejorada. En caso de no cumplir los requerimientos de resistencia y durabilidad, se deberá de seleccionar contenidos de cemento mayores y repetir los pasos del 1 al 4.

Tabla 4: Resistencia mínima a la compresión inconfiada para suelos estabilizados

Capa de suelo estabilizada	Resistencia mínima a la compresión	
	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
Base	750	500
Subbase, material selecto y subrasante	250	200

Resistencia mínima a la compresión determinada a los 7 días para la estabilización con cemento y a los 28 días para la estabilización con cal.

Tabla 5: Requerimientos de durabilidad

Capa de suelo estabilizada	Pérdida máxima permitida luego de 12 ciclos de humedecido y secado o ciclos de congelamiento y descongelamiento, como el porcentaje de peso inicial del espécimen
Granular IP < 10	11
Granular IP > 210	8
Limos	8
Arcillas	6

3.2.2 Estabilización con cal

Las principales características que vuelven atractiva la cal, como aditivo estabilizante, son su carácter aglomerante y su afinidad por el agua.

Para estabilización, la cal se utiliza aérea – viva o mezclada en presencia de agua – apagada.

Este tipo de estabilización se emplea principalmente en suelos arcillosos, con elevado contenido de finos de plasticidad media o alta. También es utilizada en suelos de elevada humedad natural, dado que modifica la curva de compactación, ya que reduce la densidad seca máxima y aumenta la humedad óptima de compactación.

Los procesos físicos – químicos que ocurren en el suelo al agregar cal en presencia del agua son los siguientes:

- Rápida reacción de floculación por el intercambio iónico del calcio de las arcillas presentes en el suelo lo cual cambia favorablemente la plasticidad del suelo
- Se forman nuevos compuestos – silicatos y aluminatos – que son insolubles en agua, este proceso se prolonga durante varios meses y mejora la resistencia mecánica del suelo.

Estos procesos tienen como consecuencia una serie de mejoras la cuales se citan a continuación:

- Mejora en las propiedades de resistencia: Dado el carácter aglomerante de la cal, se mejora la resistencia a compresión así como la resistencia ante el cortante ya que se aumenta el rozamiento interno y la cohesión del suelo
- Reducción de la plasticidad: se aumenta el límite plástico en suelos plásticos ($IP > 15$) lo cual hace que se reduzca el Índice de plasticidad, lo cual ocasiona un aumento en la humedad óptima de compactación. Si los suelos son poco plásticos, la cal actúa de manera opuesta, es decir, aumenta el Índice de Plasticidad del material.
- Aumento de la trabajabilidad: Con la adición de cal, el suelo se puede separar más fácilmente, ya que se vuelve más granular, esto unido al aumento del LP y de la humedad óptima de compactación, facilita su utilización y puesta en obra.

En general todos los suelos de grano fino estabilizados con cal, muestran una reducción de la plasticidad, mejoran la trabajabilidad y reducen la susceptibilidad a los cambios de volumen o hinchamiento. Sin embargo no todos los suelos presentan una mejora en las propiedades de resistencia. Las propiedades de los suelos estabilizados con cal dependen de muchas variables entre las más importantes se encuentran: tipo de suelo, tipo de cal, porcentaje de cal, condiciones de curado (tiempo, temperatura y humedad).

Varios tipos de cal han sido utilizados de manera exitosa en la estabilización de suelos, entre ellos la más comúnmente utilizada ha sido la cal hidratada (rica en calcio). Las especificaciones para este y otros tipos de cal pueden ser encontradas en ASTM C 977.

Los requisitos granulométricos para una base o sub base estabilizada con cal se indican en la Tabla 6.

Tabla 6: Requerimientos granulométricos para material de base y subbase estabilizadas con cal.

Tipo de material	Tamaño de la malla	Porcentaje pasando
Base	1 ½	100
	¾	70-100
	No. 4	45-70
	No. 40	10-40
	No. 200	0-20
Subbase	1 ½	100
	No. 4	45-100
	No. 40	10-50
	No. 200	0-20

3.2.2.1 Contenido de cal para el mejoramiento de suelos

Los contenidos de cal, necesarios para mejorar la calidad de los suelos es determinada mediante el mismo procedimiento de prueba y error descrito para suelos estabilizados con cemento en el apartado 3.2.1.1

3.2.2.2 Contenido de cal para la estabilización de suelos

El siguiente procedimiento es recomendado para determinar el contenido de cal de un suelo estabilizado con cal.

Paso 1: El método más utilizado para calcular un contenido estimado inicial de cal es mediante el ensayo de pH. En este método varias muestras de suelo cal son preparadas a diferentes niveles o dosificaciones de cal como 2, 4, 6 y 8 por ciento y el pH de cada muestra es obtenido. El contenido de cal más bajo al cual se logra un pH de alrededor de 12.4 (pH correspondiente a la cal) será el contenido inicial de cal.

Como método alternativo para determinar el contenido inicial de cal es mediante la Figura 4. Los datos requeridos para el uso de este gráfico es el Índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de material pasando la malla N°40.

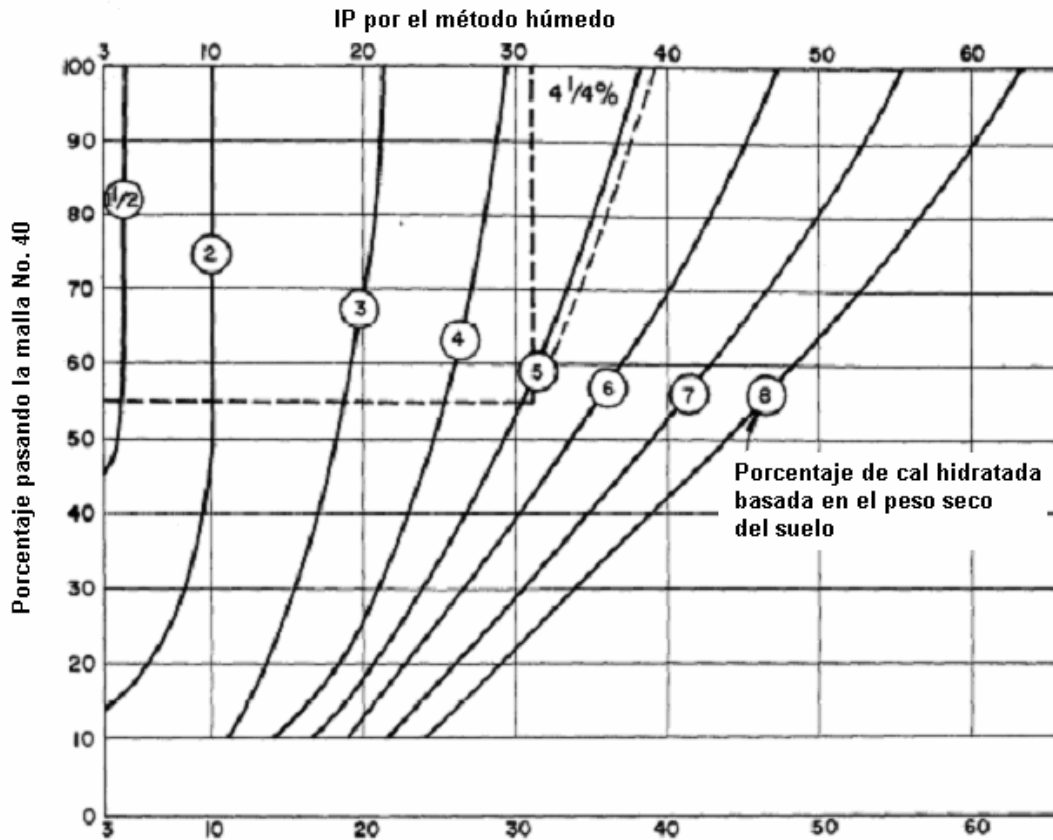


Figura 4: Determinación del contenido de cal (alternativo)

Para el cálculo del porcentaje de cal a utilizar, se deben realizar los siguientes pasos:

- Ingresar al gráfico mediante el índice de plasticidad (IP) en el eje horizontal superior (líneas rectas verticales)
- Seguir paralelo a la línea curva hasta topar con el porcentaje pasando la N°40 (soil binder).
- Al tocar la línea horizontal proveniente del % pasando la N°40 subir verticalmente hasta el eje del 100% de material pasando la N°40.
- El porcentaje de cal a utilizar será aquel definido en el eje horizontal superior, mediante las líneas curvas.

Notas:

*Evitar el uso del gráfico para materiales con porcentajes pasando la malla N°40 inferiores a 10% y materiales no cohesivos (IP menores a 3).

**Porcentaje relativo de cal pura, usualmente 90% o mas hidróxidos de Ca y/o Mg y 85% o mas de material pasando la malla N°200. Los porcentajes mostrados son para estabilizaciones de bases y sub rasantes donde se deseen efectos duraderos. Resultados satisfactorios temporales pueden ser logrados con el uso de cantidades tan pequeñas como de 0.5% o menores dosificaciones.

Paso 2: Utilizando el contenido inicial de cal, se deben llevar a cabo ensayos de humedad densidad para determinar la densidad máxima y el contenido de humedad óptima. Los especímenes de suelo cal se prepararán de acuerdo con la norma ASTM D 3551. El ensayo de densidad humedad deberá realizarse de acuerdo con la norma ASTM D 1557.

Paso 3: Preparar muestras por triplicado de la mezcla se suelo cemento para los ensayos de compresión inconfiada y durabilidad. Los contenidos de cal a los cuales se deben de preparar las mezclas serán: el contenido de cemento determinado en el paso 2 y al 2% y 4% de cal por encima de este contenido.

Los especímenes deben de prepararse de acuerdo con el ASTM D 3551, cuando el porcentaje retenido en la malla N°4 sea menor al 35%, los especímenes serán de 2 pulgadas de diámetro y 4 pulgadas de altura, en caso de que este porcentaje sea mayor al 35% los especímenes deberán tener un diámetro de 4 pulgadas y una altura de 8 pulgadas. Las muestras deberán ser preparadas a la densidad y contenido de humedad que se prevé estará presente en el campo.

Los especímenes preparados se deberán de curar en un contenedor sellado para evitar pérdidas de humedad y carbonatación de la cal, el curado se hará preferiblemente por un periodo de 28 días a 23°C. También se puede utilizar un curado acelerado por 48 horas a 49°C, este tipo de curado ha demostrado tener

resultados satisfactorios, sin embargo se recomienda realizar ensayos de chequeo bajo las condiciones normales.

Paso 4: Tres especímenes se deberán de fallar a compresión inconfiada de acuerdo con el procedimiento ASTM D1633, y otros tres especímenes deberán ser sometidos al ensayo de durabilidad, este ensayo de durabilidad podrá ser mediante ciclos de humedecido y secado (ASTM D559) o congelamiento y descongelamiento (ASTM D 560).

Paso 5: Se deberán de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos solicitados de acuerdo con las especificaciones contractuales, o con las especificaciones recomendadas en la Tabla 4 y en la Tabla 5. El contenido de cal más bajo, el cual cumpla con los requerimientos para los resultados de compresión inconfiada y demuestre la durabilidad requerida será el contenido de cal de diseño.

En caso de que la mezcla cumpla con los requerimientos de durabilidad no así con los requerimientos de resistencia se dirá que el suelo esta en una condición modificada o mejorada. En caso de no cumplir los requerimientos de resistencia y durabilidad, se deberá de seleccionar contenidos de cal mayores y repetir los pasos del 1 al 5.

3.2.3 Estabilización con bitumen

La estabilización de suelos y agregados con bitumen difiere mucho de las estabilizaciones realizadas con cemento y cal. El objetivo principal de la estabilización de suelos de grano fino (arenas) contempla el impermeabilizar la capa. Las partículas de suelo son cubiertas por bitumen que previene o disminuye la penetración de agua, evitando una reducción de la resistencia del suelo. Adicionalmente, la estabilización con bitumen puede mejorar las características de durabilidad, por ejemplo evitando cambios volumétricos. En materiales no cohesivos

como, arenas, gravas quebradas, y roca quebrada, son dos los efectos producto de la estabilización con bitumen: impermeabilización y adhesión (cohesión). Desde el punto de vista de la adhesión el bitumen cementa las partículas incrementando la resistencia al corte mediante la cohesión.

Los criterios utilizados para la estabilización de suelos y agregados se basan mayormente en requisitos y criterios granulométricos y de estabilidad. En este tipo de mezclas no se establecen requisitos de durabilidad.

Tipos de suelos estabilizados con bitumen:

- a. Arena bitumen: Mezclas de arena y bitumen en las cuales las partículas de arena son cementadas para lograr un material con mayor estabilidad.
- b. Grava o rocas quebradas y bitumen: mezcla de bitumen con grava bien graduada o agregado quebrado que, después de la compactación presenta una alta estabilidad e impermeabilidad, con calidad de base o sub base.
- c. Cal y bitumen: Mezcla de suelo, cal y bitumen que, luego de compactarla podría presentar características de un tratamiento bituminoso. La cal es utilizada en materiales con IP por encima de 10.

Tipos de bitumen

Las estabilizaciones bituminosas son realizadas por lo general con cementos asfálticos, asfaltos rebajados (cut back) o emulsiones asfálticas. El tipo de bitumen a utilizar dependerá del suelo a estabilizar, método de construcción y condiciones climáticas.

Los cementos asfálticos no son afectados significativamente por cambios en la temperatura; sin embargo se deben de utilizar asfaltos con grado apropiado para el clima de la zona. Como criterio general se ha identificado que los resultados más satisfactorios se dan al utilizar asfaltos con viscosidades más elevadas, pero que

permitan una adecuada mezcla con el suelo.

La mayoría de las estabilizaciones son efectuadas en el proyecto, en donde se pueden utilizar los tres tipos de bitumen mencionados, cementos asfálticos, asfaltos rebajados y emulsiones. Entre las emulsiones y asfaltos rebajados, las primeras tienen mayor aceptación por temas energéticos y esfuerzos en la disminución de la contaminación.

Los siguientes tipos de materiales bituminosos se utilizan de acuerdo con el tipo y granulometría del suelo, según las siguientes recomendaciones:

- a. Agregados de granulometría abierta:
 - Asfaltos rebajados de curado medio y rápido RC-250, RC-800, y MC-3000.
 - Emulsiones asfálticas de rompimiento medio MS-2 y CMS-2

- b. Agregados bien graduados con poca o ningún material pasando la malla N°.200
 - Asfaltos rebajados de curado medio y rápido RC-250, RC-800, y MC-250 y MC-800.
 - Asfaltos rebajados de curado lento SC-250 y SC-800.
 - Emulsiones asfálticas de rompimiento medio y lento MS-2 y CMS-2, SS-1 y CSS-1.

- c. Agregados con porcentajes altos de agregados finos y materiales pasando la malla N°.200.
 - Asfaltos rebajados de curado medio MC-250 y MC-800.
 - Asfaltos rebajados de curado lento SC-250 y SC-800.
 - Emulsiones asfálticas de rompimiento lento SS-1, SS-01h, CSS-1 y CSS-1h.

La estabilización bituminosa más simple es la realizada en una ruta con material granular no ligado y la aplicación de asfalto rebajado sobre la superficie. Para este tipo de trabajos, los asfaltos rebajados de curado medio y lento son los mas utilizados, SC-70, SC-250, MC-70 y MC-250.

Los requisitos granulométricos recomendados para materiales granulares a utilizar en subrasante y bases o sub bases estabilizadas se muestran en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

Tabla 7: Graduaciones recomendadas para materiales de **sub-rasante** estabilizadas con bitumen

Tamaño de la malla	Porcentaje pasando
3 in	100
No. 4	50-100
No. 30	38-100
No. 200	2-30

Tabla 8: recomendadas para materiales de **bases y sub-bases** estabilizadas con bitumen

Tamaño de la malla	Tamaño máximo 1 1/2 in	Tamaño máximo 1 in	Tamaño máximo 3/4 in	Tamaño máximo 1/2 in
1 1/2	100	-	-	-
1	84 ± 9	100	-	-
"3/4"	73 ± 9	83 ± 9	100	-
M	66 ± 9	73 ± 9	82 ± 9	100
"3/8"	59 ± 9	64 ± 9	72 ± 9	83 ± 9
No.4	45 ± 9	48 ± 9	54 ± 9	62 ± 9
No. 8	35 ± 9	36 ± 9	41 ± 9	47 ± 9
No. 16	27 ± 9	28 ± 9	32 ± 9	36 ± 9
No. 30	20 ± 9	21 ± 9	24 ± 9	28 ± 9
No. 50	14 ± 7	16 ± 7	17 ± 7	20 ± 7
No.100	9 ± 5	11 ± 5	12 ± 5	14 ± 5
No. 200	5 ± 2	5 ± 2	5 ± 2	5 ± 2

3.2.3.1 Diseño de mezcla

Para la estabilización de la sub rasante, la siguiente ecuación puede ser utilizada para estimar la cantidad inicial de **asfalto rebajado** a utilizar:

$$p = \frac{0.02a + 0.07b + 0.15c + 0.20d}{100 - S} \times 100$$

p = Porcentaje de asfalto rebajado por peso de agregado seco.

a= Porcentaje de agregado retenido en la malla N°50.

b= Porcentaje de agregado pasando la malla N°50 y retenido en la malla N°100.

c= Porcentaje de agregado pasando la malla N°100 y retenido en la malla N°200.

d= Porcentaje de agregado pasando la malla N°200.

S= Porcentaje de solvente.

La cantidad preliminar de emulsión asfáltica a ser utilizada en la estabilización de sub rasantes puede ser determinada mediante la Tabla 9.

Tabla 9: Porcentaje de emulsión requerida

Porcentaje pasando la malla No. 200	Libras de emulsión asfáltica por cada cien libras de agregado seco					
	Porcentaje pasando la malla No. 10					
	<50	60	70	80	90	100
0	6.0	6.3	6.5	6.7	7.0	7.2
2	6.3	6.5	6.7	7.0	7.2	7.5
4	6.5	6.7	7.0	7.2	7.5	7.7
6	6.7	7.0	7.2	7.5	7.7	7.9
8	7.0	7.2	7.5	7.7	7.9	8.2
10	7.2	7.5	7.7	7.9	8.2	8.4
12	7.5	7.7	7.9	8.2	8.4	8.6
14	7.2	7.5	7.7	7.9	8.2	8.4
16	7.0	7.2	7.5	7.7	7.9	8.2
18	6.7	7.0	7.2	7.5	7.7	7.9
20	6.5	6.7	7.0	7.2	7.5	7.6
22	6.3	6.5	6.7	7.0	7.2	7.5
24	6.0	6.3	6.5	6.7	7.0	7.2
25	6.2	6.4	6.6	6.9	7.1	7.3

El contenido final de asfalto rebajado o de emulsión asfáltica deberá ser seleccionado basado en los resultados obtenidos del procedimiento de diseño Marshall modificado para la estabilización de sub rasantes.

Los requisitos solicitados para las diferentes propiedades de ensayo son presentados en la Tabla 10 y en la Tabla 11 en el caso de estabilizaciones con asfaltos rebajados y para emulsiones respectivamente.

Tabla 10: Criterios de diseño Marshall para mezclas con asfalto rebajado.

Propiedad ensayada	Mínimo	Máximo
Grado de curado		
Porcentaje de solvente evaporado	25	
Mezclas para mantenimiento	50	
Mezclas para pavimentación		
Número de golpes		
Compactador manual	75	
Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada	3	5
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)	Ver tabla 11	
Estabilidad, lb (N) a 77 °F (25 °C)		
Mezclas para mantenimiento	500 (2224)	
Mezclas para pavimentación	750 (3336)	
Flujo, unidades de 0.01 in (0.25 mm)	8	16
Porcentaje de Estabilidad retenida		
Después de 4 días en agua a 77 °F (25 °C)	75	

Tabla 11: Porcentaje de vacíos mínimos en el agregado mineral.

No. de malla estándar	Tamaño máximo nominal (in)	Tamaño máximo nominal (cm)	%VMA Mínimo
16	0.0469	0.119126	23.5
8	0.093	0.23622	21
4	0.187	0.47498	18
3/8	0.375	0.9525	16
1/2	0.500	1.27	15
3/4	0.750	1.905	14
1	1.00	2.54	13
1 ½	1.50	3.81	12
2	2.00	5.08	11.5
2 ½	2.50	6.35	11

Tabla 12: Criterios de diseño, basados en parámetros Marshall para mezclas de emulsión asfáltica - agregado.

Propiedad ensayada	Mínimo	Máximo
Estabilidad, lb (N) a 72 °F (22.2 °C) Mezclas para pavimentación	500 (2224)	-
Porcentaje de vacíos total Mezcla compactada (mezclas granulares, no hay requerimientos para arenas)	2	8
Porcentaje de pérdida de estabilidad Después de 4 días sumergida a 72 °F (22.2 °C)	-	50
Porcentaje de humedad absorbida Después de 4 días sumergida a 72 °F (22.2 °C)	-	4
Porcentaje de recubrimiento del agregado	50	-

3.2.4 Estabilización con cal – cemento y cal – bitumen

La ventaja de utilizar una combinación de estabilizadores es que se puede lograr que un estabilizador compense las carencias del otro a la hora de tratar un aspecto o característica particular de un suelo dado. Por ejemplo en zonas arcillosas que no poseen materiales de base, la cal ha sido utilizada junto con otros estabilizadores (cemento Pórtland o bitumen) para lograr materiales de base competentes. El cemento Pórtland o el asfalto no puede ser mezclado con arcillas plásticas, por lo tanto la cal se incorpora para volver el suelo más friable, es decir para que se vuelva más trabajable para permitir que el cemento o el asfalto se mezclen adecuadamente con el suelo. A pesar de que emplear dos estabilizadores puede resultar más costoso que emplear un solo método de estabilización esto puede resultar beneficioso si se trata de mejorar una ruta en una zona donde los agregados no existan o sean muy costosos.

3.2.4.1 Estabilización con cal – cemento

La cal puede ser utilizada como un aditivo inicial con cemento Pórtland o como un estabilizador primario. El propósito principal de la cal es mejorar las características de trabajabilidad, principalmente reduciendo la plasticidad del suelo. El objetivo del diseño es agregar la cal suficiente para mejorar la trabajabilidad y reducir el índice de plasticidad a niveles aceptables. El diseño del contenido de cal es el mínimo que logre alcanzar los resultados deseados. El diseño del contenido de cemento es el que fue explicado anteriormente.

3.2.4.2 Estabilización con cal – bitumen

La cal puede ser utilizada como un aditivo inicial con el asfalto como aditivo primario o principal. El propósito principal de la cal en este sentido, es mejorar las características de trabajabilidad y actuar como un agente que ayude a evitar el desnudamiento de los agregados. Cuando el material llega a su capacidad última,

la cal actúa como neutralizador de ácidos, es decir impide que se pierda la afinidad o se rompan las uniones entre el agregado o el suelo con el asfalto. Generalmente cerca de 1 % ó 2 % de cal es suficiente para lograr este objetivo. Debido a que el asfalto es el estabilizador principal, el procedimiento para dicho diseño es el que fue explicado anteriormente.

CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

4.1 Construcción con cemento Pórtland

4.1.1 Etapas generales para la construcción

En la construcción de suelo cemento el objetivo es mezclar a fondo el suelo pulverizado y el cemento en proporciones correctas con suficiente humedad para permitir la máxima compactación. Los métodos de construcción son simples y siguen un procedimiento definido:

1. Preparación inicial

- a. Conformar la superficie, coronar y preparar pendientes transversales
- b. De ser necesario; escarificar, pulverizar y prehumedecer el suelo
- c. Reconformar la superficie

2. Procesamiento

- a. Dispersar cemento y mezclar
- b. Aplicar agua y mezclar
- c. Compactar
- d. Afinar
- e. Curar

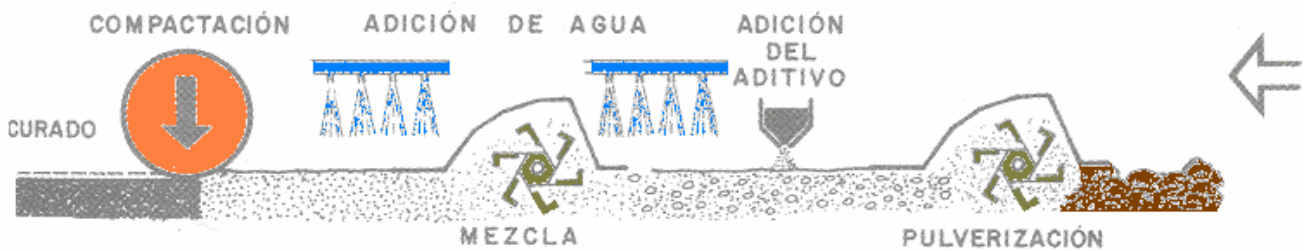


Figura 5: Fases de la estabilización en sitio

4.1.2 Equipo de mezclado

El suelo, cemento y agua pueden ser mezclados en sitio utilizando una "recuperadora" de caminos o utilizando una planta central de mezclado. Los tipos de equipos de mezclado son:

5. Recuperadoras de caminos
 - a. Con eje transversal plano
 - Mezcladora de eje simple
 - Mezcladora de eje múltiple
 - b. Molino de mezclado en hilera

5. Planta central de mezclado
 - a. Molino mezclador de tipo continuo
 - b. Molino mezclador de tipo bache
 - c. Tambor mezclador rotatorio

Cualquiera que sea el equipo de mezclado el objetivo y los principios generales son los mismos. Algunos suelos no pueden ser suficientemente pulverizados o mezclados debido a sus altos contenidos de arcillas o limos y por su plasticidad. Casi todos los tipos de suelos, desde los granulares hasta los finos pueden ser pulverizados y mezclados con una mezcladora transversal de eje simple, con excepción de materiales con muy alto contenido de arcillas plásticas. Estas arcillas requerirían mayor esfuerzo de mezclado para obtener la pulverización. Las plantas centrales de mezclado y molinos móviles pueden ser utilizados en materiales granulares no plásticos o con muy baja plasticidad.

4.1.3 Distribución de cemento

Hay varios métodos para la distribución de cemento en los proyectos en donde se realizará el mezclado en sitio. Los mas utilizados son distribuidores móviles de cemento que cubren con cemento la totalidad del área, simulando un manto de

cemento o los que depositan unas "hileras" de cemento las cuales serán homogenizadas luego por el mezclador.



Figura 6: Dosificador automático de cemento en polvo

En algunos casos se utilizan los sacos de cemento los cuales son dispuestos en cierta posición sobre la superficie a estabilizar con base en la dosificación calculada sin embargo este procedimiento es recomendado en proyectos pequeños.



Figura 7: Dosificación manual de cemento en polvo

4.1.4 Construcción

La construcción de un suelo cemento involucra dos etapas; la preparación y el proceso de trabajo, y existen algunas variaciones dependiendo del equipo que se utilice para la construcción. Independientemente del equipo que se utilice para la construcción existen algunas consideraciones que son sumamente necesarias para garantizar la calidad del proyecto, una adecuada compactación, dosificación correcta y homogénea de cemento y humidificación, correcta pulverización y curado.

4.1.4.1 Preparación

Antes de iniciar el proceso se debe garantizar el coronamiento o pendiente transversal y los niveles. Debido a que existe muy poco desplazamiento en el proceso, los niveles al final serán determinados por la condición inicial. Si será utilizado material de préstamo, el material a estabilizar deberá ser compactado y dispuesto garantizando una pendiente transversal y niveles adecuados. Todos los suelos blandos deben ser corregidos para evitar retrasos costosos.

Todos los equipos deben de ser chequeados previamente, asegurando que están en buen estado de operación y que cumplen con los requerimientos del trabajo.

Estacas de guía deben ser utilizadas para la ubicación del operador del equipo.

Se debe realizar un cronograma para el recibido, manejo y distribución del cemento así como para suplir el agua requerida. El prehumedecido, adicionando agua antes de distribuir el cemento, es comúnmente utilizado y ahorra tiempo durante el proceso de construcción.

Materiales granulares friables requieren de poca o ninguna pulverización o escarificación. Suelos de arcillas o limos posiblemente requieran de mayor esfuerzo para pulverizarlos principalmente cuando estén muy secos o muy húmedos, en aquellos caso en los cuales el material este seco se pueden humedecer un poco para facilitar el pulverizado, en el caso contrario es conveniente secar un poco el material mediante "volteo". La mayoría de especificaciones solicitan que el material sea pulverizado hasta lograr que el 100% del material pase el tamiz de 25mm (1") y al menos el 80% pase el tamiz N°4, con excepción del material granular o piedra

para el cual el tamaño máximo nominal será de 50mm (2"). El chequeo final de la pulverización debe realizarse al final del proceso de mezclado.



Figura 8: Escarificadora.

4.1.4.2 Proceso de trabajo

Para una máxima efectividad y cumplir con especificaciones de tiempo, la programación diaria debe dividirse en varias secciones adyacentes en vez de una o dos secciones totales. Este procedimiento resultara en una mayor productividad diaria y evitará que una gran longitud de construcción sea afectada por una lluvia repentina.

a. Manejo y distribución del cemento

Por lo general el cemento es transportado en sacos, en los casos en los que el cemento es transportado a granel este puede ser separado mediante vibración, o por medio de compresores de aire. Es importante tomar en cuenta que aquellos suelos que tengan cantidades excesivas de agua no podrán ser mezclados con el cemento inmediatamente, en un suelo arenoso el cemento se puede mezclar en condiciones de humedad un poco superiores que el contenido óptimo de humedad, en caso de los materiales arcillosos el contenido de humedad siempre tendrá que estar por debajo del óptimo. El cemento no podrá ser distribuido sobre charcos de agua y si el material está excesivamente húmedo el material se tendrá que airear para secarlo antes de aplicar el cemento.

b. Mezclado y dosificación de agua

Procedimientos para la aplicación de agua y cemento dependen del tipo de equipo de mezclado. Debe conseguirse una mezcla homogénea de material pulverizado, cemento y agua. La homogeneidad del material colocado puede ser fácilmente chequeada cavando trincheras o huecos a intervalos específicos en todo el espesor del tratamiento para luego inspeccionar el color y la textura del material

c. Compactación

La compactación de suelos estabilizados se rige por los mismos principios que los utilizados al compactar el mismo suelo sin tratamiento. La compactación de la mezcla de suelo cemento al óptimo contenido de humedad, debe alcanzar la máxima densidad y ser finalizada inmediatamente. La pérdida de humedad por evaporación durante la compactación, evidente por el fisurado superficial del material estabilizado, debe ser corregida mediante la aplicación leve de agua.

Los compactadores pata de cabra son utilizados generalmente en la compactación inicial de un suelo estabilizado con cemento, excepto para materiales mas granulares, para una adecuada compactación se acostumbra operar los compactadores con balastro para aplicar mayor presión de contacto. La regla general es utilizar presiones de compactación que no sobrepasen la capacidad final (bearing capacity) del suelo.

Imagen compactador pata de cabro

Los suelos limosos y arcillas arenosas, son compactados satisfactoriamente con compactadores con presiones unitarias de 75 a 125 libras por pulgada cuadrada, arenas arcillosas, arcillas magras y limos que tengan baja plasticidad pueden compactarse con compactadores que apliquen entre 100 y 200 libras por pulgada cuadrada. Arcillas con muy baja plasticidad y suelos granulares requerirán mayores presiones de compactación entre 150 y 300 libras por pulgada cuadrada. Espesores iguales o menores a 20cm pueden ser compactados en una sola capa.

Cuando los compactadores pata de cabra son utilizados en la compactación inicial, le material debe tener una condición suelta de tal manera que el pie del

compactador compacte la parte inferior del material y vaya subiendo en las subsecuentes pasadas, en caso de que no se de la penetración de la pata dentro del material se podrá utilizar un escarificador para soltar el material.

Los compactadores de rodillo metálico y de rejas pueden ser utilizadas en suelos granulares para una compactación satisfactoria. Compactadores de plato vibratorio pueden utilizarse en materiales granulares sin plasticidad y los compactadores de llanta pueden ser utilizados en arenas y gravas con muy poca plasticidad.



Figura 9: Compactador de rodillo y de llanta de hule.

d. Acabado

Para obtener una superficie de buen calidad se debe lograr un acabado con una adecuada compactación cercana al óptimo contenido de humedad y evitar la presencia de planos de compactación. La superficie debe de ser lisa, densa, libre de surcos, crestas y grietas. Cuando el conformado se este dando en el acabado se debe procurar un raspado de todas aquellas irregularidades presentes en la superficie que faciliten su eliminación, este raspado se utiliza en todos los suelos estabilizados con cemento con excepción de los granulares. El proceso final de acabado por lo general consiste un una aplicación leve de agua seguida por una compactación mediante compactadores neumáticos para sellar la superficie

e. Curado

Se debe colocar una membrana de curado inmediatamente después del acabado

que permita retener la humedad y la hidratación del cemento. La mayoría de los suelos estabilizados con cemento se curan con materiales bituminosos, los tipos comúnmente utilizados son los asfaltos rebajados del tipo RC-250, MC-250, RT-5 y emulsiones asfálticas SS-1. La tasa de aplicación varía desde 0.7 hasta 1.4 litros por metro cuadrado. La superficie debe de ser humedecida antes de aplicar el material bituminoso y en algunos casos una pequeña aplicación de agua es utilizada inmediatamente después de la colocación del material bituminoso.

f. Juntas de construcción

Luego de cada día de construcción, se debe de conformar una junta de construcción transversal a través de todo el espesor del material de suelo cemento estabilizado. Esta tarea es realizada como la última labor durante la noche luego de la colocación o durante las primeras labores antes de iniciar la nueva colocación por la mañana. La junta debe de ser vertical y perpendicular a la línea de centro. Cuando se utiliza material bituminoso como agente de curado, este debe ser colocado en la junta, luego de que ha sido adecuadamente limpiado y reconformado de ser necesario, se recomienda la aplicación de arena para prevenir la exudación o adhesión en las llantas.

g. Construcción de capas consecutivas

Cuando el espesor especificado de una base granular de suelo cemento excede la profundidad (20-22cm compactados) a la que puede ser colocada en una capa, esta debe ser construida como capas sucesivas. Ninguna de ellas debe de tener menos de 10cm de espesor. El acabado de la capa inferior no necesariamente debe presentar el coronamiento o pendiente final, ni los planos de compactación deben ser eliminados, ya que ellos están lejos de la superficie final como para que sean dañinos. La capa inferior puede ser curada con el material húmedo que será posteriormente utilizado en la capa posterior ya sea construida inmediatamente después o mas adelante.

4.1.5 Problemas constructivos especiales

a. Lluvia

Tomar en cuenta algunas consideraciones durante la preparación de las labores reducirá enormemente las posibilidades de serios daños producto de climas húmedos y lluviosos.

Por ejemplo, cualquier material que este suelto o pulverizado debe de ser conformado o coronado de tal manera que escurra el agua y en pequeños lugares en la superficie donde el agua se pueda acumular debe de atrincherarse de tal manera que el agua pueda escurrir frecuentemente. De acuerdo con la experiencia en la colocación de estabilizaciones es incierto que la lluvia durante el proceso constructivo sea un problema serio de acuerdo con la experiencia de los ingenieros y constructores, siempre y cuando se controle el contenido de humedad requerido. Usualmente la construcción requiere el equivalente a 2.5 a 3.75 cm de lluvia.

Si la lluvia cae durante la colocación del cemento, la dosificación se debe de suspender y el cemento ya colocado debe de ser rápidamente mezclado con la masa de suelo. Si una fuerte lluvia ocurre luego de que la mayoría del agua óptima haya sido dosificada o en caso de que el suelo se encuentre cercano al contenido de humedad óptima podrían ocasionarse problemas serios por exceso de agua. Generalmente la mejor solución es una rápida compactación utilizando todo el equipo disponible de tal manera que la estructura quede conformada antes de producirse mucho daño. En estos casos puede ser necesario un perfilado final, el material obtenido en este perfilado deberá ser desechado.

Luego que la mezcla haya sido compactada y se haya dado el acabado, la lluvia no le producirá daño a la estructura del pavimento.

b. Suelos con alta humedad

Materiales con una excesiva humedad son difíciles de mezclar y pulverizar. De acuerdo con la experiencia el cemento se puede mezclar con materiales arenosos cuando el contenido de humedad se encuentre como máximo dos por ciento por encima del contenido óptimo de humedad. Para suelos arcillosos, el contenido de humedad debe estar por debajo del óptimo para un mezclado eficiente, de lo contrario será necesario secar los materiales por aireación.

4.2 Construcción de una base estabilizada y/o mejorada con cal

4.2.1 Métodos de estabilización con cal

Existen tres métodos reconocidos para la estabilización de suelos: en sitio, en planta

y mediante inyección a presión.

4.2.1.1 Estabilización en sitio

Este método se puede subdividir en tres métodos: mezclado de la cal con material existente como parte del sitio de proyecto (sub rasante) o pavimento; mezclado fuera del sitio en el cual la cal es mezclado con material de préstamo y luego la mezcla es transportada al sitio de la construcción para la manipulación y compactación final; Y el mezclado en donde el material de préstamo es llevado y colocado en el sitio de construcción y procesado como en el primer caso.

a. Procedimiento para mezclado en sitio

La dosificación de cal es adicionada a un suelo arcilloso o granular que sea fácilmente pulverizable. El material es mezclado y compactado en una operación sin requerir de periodos de "maduración" (el término madurar se refiere a la reacción entre la arcilla y la cal la cual vuelve a la arcilla mas friable y fácil de pulverizar).

La dosificación de cal es adicionada a un suelo y se le permite a la mezcla madurar por un periodo de 1 a 7 días para ayudar a rompimiento de suelos con arcillas pesadas.

La dosificación de cal es adicionada a un suelo para modificarlo y pulverizarlo antes de tratarlo con cemento o cal.

Una dosificación de cal es adicionada para crear una superficie de trabajo. Una prueba de ruedo se requiere en vez de la pulverización y mediciones de densidad.

Dos dosificaciones de cal son adicionadas a suelos que son extremadamente difíciles de pulverizar. Entre las aplicaciones de cal se debe permitir que la mezcla madure.



Figura 10: Construcción con cal.

b. Estabilización de profundidad

Puede realizarse mediante una o dos dosificaciones. Una dosificación de cal es aplicada para modificar hasta una profundidad de 60cm. Una segunda dosificación se adiciona para la estabilización de una capa superior que puede tener de 15 a 30cm de espesor para la estabilización completa. Una especie de arados y rompedoras son utilizados para romper las terrones de arcilla que se encuentran a mayores profundidades

Una dosificación de cal puede ser aplicada para una completa estabilización a una profundidad de 45cm. Mezcladoras mecánicas están disponibles para pulverizar arcillas a profundidad total mediante pasadas progresivas. La primera pasada corta hasta los 15cm, la segunda hasta los 23cm, tercera a los 30cm, cuarta los 38cm y algunas pasadas más para llegar a los 45cm. El total del espesor (45cm) puede ser compactado desde la superficie por compactadores vibradores de rodillo de alta capacidad.

4.2.1.2 Estabilización en planta

El mezclado en planta normalmente involucra el acarreo del suelo a una planta de mezclado, donde la cal el suelo y el agua son uniformemente mezclados y luego transportados al sitio de la construcción para la manipulación posterior.

4.2.1.3 Estabilización mediante inyección a presión

La utilización de lechadas de cal mediante inyección a profundidades de 2 a 3m para controlar la expansivos y suelos no deseados en carreteras son colocados en

espaciamientos máximos de 1.5m. La capa superficial con espesores entre los 15 y 30cm debe de ser totalmente estabilizada mediante métodos convencionales.

4.2.2 Procedimiento de construcción

4.2.2.1 Preparación del suelo

El suelo de subrasante debe de ser llevado al nivel y pendiente final. En algunos casos el nivel deberá requerir ajustes ya que algunos suelos al mezclarse con la cal y el agua tienden a hincharse, para minimizar este efecto se recomienda homogenizar el suelo con la subrasante en periodos cortos de tiempo y contenidos de humedad cercanos al óptimo.

4.2.2.2 Aplicación de la cal

Cal hidratada seca: La cal seca puede ser aplicada a granel o en sacos. El uso de sacos por lo general es el más simple pero también el método más costoso de aplicación. Los sacos son colocados manualmente hasta lograr la distribución requerida. Una vez que los sacos son colocados los sacos se rompen y la cal es colocada en apilamientos o en hileras transversales a la calzada. La cal es distribuida mediante rastrillado manual o algún equipo mecanizado. Inmediatamente después la cal se rocía con agua para evitar el polvo. La mayor desventaja del uso de sacos son los costos elevados producto de los sacos, mayores costos de mano de obra y menor rendimiento. Sin embargo el uso de sacos es el método más práctico para proyectos pequeños o en proyectos donde es difícil el uso de equipo pesado. En los proyectos grandes, y principalmente cuando el polvo no es un problema, el uso de cal a granel se ha convertido en una práctica común, en estos casos equipos mecánicos para distribución son comúnmente utilizados.

Cal viva seca: La cal viva puede ser aplicada en sacos o a granel. La distribución de la cal viva es similar a la de la cal hidratada, excepto que se requiere poner especial énfasis en aspectos de seguridad. Primero, los sacos son espaciados adecuadamente en el área a ser estabilizada, y luego de distribuirla la cal, el agua es aplicada y el mezclado debe de iniciar inmediatamente. El realizar las labores de humedecido y mezclado más rápidamente minimiza el peligro de quemaduras. Debido a que la cal viva genera calor de hidratación, se debe tener especial cuidado al estabilizar para evitar quemaduras, al mismo tiempo que se garantice los

equipos de seguridad necesarios.

Método de lechadas: En este método la cal hidratada o cal viva son mezcladas con el agua para formar una lechada. En el caso de la cal viva esta debe de ser humedecida ("apagarla") y luego se agrega mayor cantidad de agua para formar la lechada.

Lechadas fabricadas con cal hidratada: Este método es muy popular especialmente en aquellos casos en los que el polvo es un problema. Primeramente la cal es mezclada con el agua en un tanque o mezclador, luego la lechada es distribuida sobre la subrasante por medio de equipo mecanizado equipado con válvulas aspersoras, puede ser requerida una o mas pasadas para alcanzar el porcentaje requerido basado en el contenido de cal sólido. Para prevenir el escurrimiento de la lechada y no lograr una dosificación homogénea se deberá mezclar la lechada y el suelo inmediatamente después del riego de la lechada. Una dosificación típica de una mezcla de lechada es de 1 Ton de cal en 500gal (1890litros) de agua que alcanzan aproximadamente 600 gal de lechada que contiene aproximadamente 31% de cal sólida. Concentraciones mayores conllevan problemas de bombeo y riego. La proporción final utilizada dependerá del porcentaje de cal requerida, tipo de suelo y su condición de humedad. Cuando se requieren pequeñas proporciones de cal la dosificación se reduce a 1Ton por 700 a 800 galones de agua. Cuando la humedad natural se encuentra cercana a la óptima se requerirá una concentración alta de cal.

Aplicaciones dobles de cal: En aquellos casos en donde se encuentran arcillas sumamente plásticas (IP 50+) puede ser útil agregar los requerimientos de cal en dos aplicaciones para lograr una adecuada pulverización y obtener una estabilización completa. Por ejemplo 2 o 3% de cal es adicionada primero, parcialmente mezclada y sellada permitiendo el curado por aproximadamente una semana. La cal restante es luego agregada y mezclada.

4.2.2.3 Pulverización y mezclado

Para obtener mezclas satisfactorias de suelo-cal se debe de alcanzar una adecuada pulverización y mezclado. Para suelos conformados por arcillas pesadas podrían requerirse dos ciclos de pulverizado y mezclado, pero para otros suelos un ciclo de mezclado y pulverización podría ser suficiente. Esta diferencia se debe

principalmente a que las arcillas pesadas son más difíciles de romper.

Dos ciclos de mezclado: El proceso constructivo del mezclado en dos etapas consiste en un mezclado inicial, un curado por 24 a 48 horas (o más), y un mezclado o remezclado final. El primer mezclado distribuye la cal en suelo y de esta manera iniciar la "maduración" del suelo. Para una mejor reacción química durante el periodo de maduración, los terrones de arcilla no deben ser mayores a 5cm de diámetro. Antes de la mezclado inicial y "maduración" se debe humedecer el suelo hasta llevarlo al menos a un 2% sobre el contenido de humedad óptimo, esto para permitir la desintegración de los terrones de arcilla. Existe una excepción en la dosificación de un exceso de agua en climas fríos o con mucha humedad donde la evaporación es mínima. Luego del mezclado inicial la carretera se debe sellar mediante un compactador neumático para prevenir la caída de lluvias fuertes de esta forma el sellado escurrirá el agua llovida y de esta manera prevenir aumentos de humedad que podrían retasar la construcción. Generalmente en un periodo de 24 a 48 horas se vuelven lo suficientemente friables de tal manera que la pulverización buscada puede ser fácilmente lograda durante el mezclado final. Un humedecimiento final durante la segunda etapa de mezclado puede ser requerido para llevar al suelo a una condición de humedad óptima o ligeramente superior. En climas calientes se requieren contenidos de humedad por arriba del óptimo de tal manera que compensen la pérdida por evaporación. Se recomienda la utilización de pulverizadores de disco (arados) o escarificadores mayores durante el mezclado preliminar, y recuperadoras de caminos para el mezclado final. Las niveladoras (motor graders) generalmente presentan problemas en el mezclado de la cal con arcillas pesadas.

Un ciclo de mezclado: Se han utilizado con éxito tanto las niveladoras de hoja como las mezcladoras rotatorias para el mezclado de materiales granulares. Sin embargo las mezcladoras rotatorias son preferibles por lograr un mezclado más homogéneo, mejor pulverización y mayor rendimiento. Las mezcladoras rotatorias (recuperadoras de caminos) son utilizadas generalmente en suelos muy plásticos, que no pueden ser pulverizados fácilmente y en la reconstrucción de rutas deterioradas para pulverizar la capa de mezcla asfáltica.

Mezclado con niveladoras de hoja: Cuando se utiliza una niveladora de hoja en conjunto con cal seca, el material por lo general es colocado en dos hileras, una a cada lado de la ruta. La cal es colocada dentro de cada hilera o sobre la línea de

centro de la calle. El suelo es luego volteado hasta cubrir la cal. Una vez que la cal está cubierta, el suelo es mezclado seco pasando la niveladora de un lado a otro de la ruta. Antes de terminar el mezclado se adiciona un agua ligeramente arriba del contenido de humedad óptima y se realiza un mezclado final. Para garantizar un mezclado total mediante este método el material debe ser volteado con la niveladora al menos tres veces lo largo de la ruta. Cuando el mezclado con niveladora es realizado con lechada de cal, el mezclado es hecho mediante raspados delgados que son mezclados y conformados en hileras. Una práctica es iniciar con el material conformando una hilera central y luego mezclar el material al lado luego de la adición de cada incremento de lechada que son conformados en hileras al lado de la hilera central. El material colocado en las hileras es colocado nuevamente a lo largo de la ruta y compactado, y verificando que el contenido de humedad este cerca del óptimo. Una segunda práctica es iniciando con una hilera en la orilla de la ruta, cortar a una profundidad de 5cm y conformarlo al lado opuesto de la ruta adicionar un incremento de cal y cortar y mezclar esta capa hasta llevarlo al lado contrario de la ruta. Para un proyecto este procedimiento es llevado a cabo varias veces hasta que todo el material por mezclar haya sido tratado y llevado a una nueva hilera. A esta altura solo la mitad de la cal ha sido dosificada por lo que el proceso debe de repetirse, movilizándolo el material para uno y otro lado. Este procedimiento es lento sin embargo proporciona una excelente uniformidad.

Requerimientos de pulverización y mezclado: Los requerimientos de pulverización y mezclado por lo general son especificados en términos del porcentaje pasando la malla de 1 o 1½ pulgadas y la N°4. Requerimientos típicos establecen el 100% del material pasando la malla de 1 pulgada y el 60% pasando de N°4. Sin embargo para algunas aplicaciones los requerimientos son abiertos o más permisivos.

Compactación: Para lograr una mayor resistencia y durabilidad, los suelos estabilizados con cal deben ser adecuadamente compactados. Muchas organizaciones solicitan de al menos un 95% de la densidad ASTM D698 para subbases y 90% para bases. Otras organizaciones solicitan un 95% de la densidad máxima ASTM D1557. Aunque estas densidades pueden ser alcanzadas en la mayoría de los suelos granulares, es difícil lograr este grado de compactación en suelos de grano fino. Si un gran espesor de suelo estabilizado con cal debe de ser logrado en una sola colocación. Muchas especificaciones solicitan una densidad del 95% ASTM D698 densidad máxima, en los 15 a 22cm superiores y densidades

menores son requeridas en la parte inferior del espesor. Para lograr altas densidades, se debe de compactar a humedades cercanas a la óptima con compactadores apropiados.

Los materiales granulares por lo general son compactados tan pronto son mezclados, aunque atrasos de hasta 2 días no son perjudiciales, especialmente cuando no le es permitido evaporar el agua y la cal no se carbonata. Los suelos de grano fino también suelen ser compactados una vez que son mezclados, aunque atrasos de hasta 4 días no son perjudiciales. Cuando son inevitables atrasos mayores en la compactación (2 semanas), puede ser necesaria la incorporación de pequeñas cantidades de arcilla en la mezcla (0.5%), para compensar las pérdidas debidas a la carbonatación y la erosión.

Varios compactadores y espesores de capa han sido utilizados en la estabilización con cal. La práctica mas común es estabilizar en un solo espesor, la primera compactación con un compactador "pata de cabro" hasta que se "levante el compactador" y luego utilizando un compactador de llanta múltiple. Las compactaciones de un solo espesor suelen ser acompañados de compactadores de impacto vibradores o compactadores neumáticos pesados y por último compactadores neumáticos livianos o de rodillo para el acabado. Cuando únicamente son utilizados compactadores neumáticos livianos, la compactación es hecha en espesores delgados de menos de 15cm. Durante la compactación se recomienda un humedecimiento leve especialmente en climas secos y cálidos, con el fin de compensar las pérdidas por evaporación.

Curado: El máximo desarrollo de la resistencia y la durabilidad también depende de un adecuado curado. Condición de temperatura y humedad favorables son requeridos para el curado. Temperaturas superiores a los 5-10°C y contenidos de humedad cercanos al óptimo son promotores del curado adecuado. Algunas especificaciones solicitan un periodo entre 3 y 7 días sin disturbios, mientras que otras especificaciones permiten la colocación inmediata de sobrecapas de pavimento (cuando son requeridas) siempre y cuando no existan irregularidades o deformaciones producto del equipo. Estas capas de agregados sobre la subrasante estabilizada mantienen el contenido de humedad de la capa compactada y es un medio adecuado para el curado. Dos tipos de curado pueden ser utilizadas, humedecimiento y membranas asfálticas. En el primer caso pequeñas cantidades de agua son rociadas sobre la superficie de la capa para mantenerla húmeda y compactadores livianos utilizados para mantener la capa conformada. El curado

con membrana, puede realizarse de dos maneras: (1) el primero mediante el sellado con una aplicación de asfalto rebajado con una dosificación de entre 0.45 a 1.2 litros por metro cuadrado aplicado durante el primer día luego de la compactación final, o (2) imprimir con incrementos de emulsión asfáltica aplicados varias veces durante el periodo de curado. Una práctica común es aplicar dos imprimaciones el primer día y una cada día después de esto en una dosificación de 0.45 a 1.2 litros por metro cuadrado. El tipo de membrana utilizado, cantidad y número de aplicaciones varía considerablemente. Usualmente, es difícil aplicar más de 1 litro por metro cuadrado debido a que una capa estabilizada con cal es relativamente impermeable luego de la compactación.

4.3 Construcción de una base estabilizada y/o mejorada con bitumen

La estabilización con bitumen puede comprender materiales en caliente así como materiales en frío. El bitumen y los agregados o suelos pueden ser mezclados en sitio o en planta. Los procedimientos de construcción presentados en esta guía corresponden a materiales en frío mezclados en sitio o en planta. Los procedimientos de construcción empleados para materiales en calientes son similares a aquellos utilizados en concretos asfálticos y se aplican estándares de construcción bajo las mismas consideraciones.

4.3.1 Equipo para mezclado en sitio

Algunos de los equipos utilizados para la estabilización con bitumen son similares a los utilizados en construcciones estándar y no serán tratados aquí. Estos incluyen distribuidores de agua, equipos de compactación y conformadores de caminos. Solamente equipo especial o con características propias para la estabilización con bitumen será discutido.

1. Plantas móviles. Las plantas móviles son plantas mezcladoras autopropulsadas y que dosifican y mezclan agregados y bitumen mientras estas están en movimiento sobre la calzada. Hay dos tipos generales de plantas móviles: una que se mueve a través de una hilera de agregado previamente conformada sobre la superficie de la ruta, adiciona y mezcla el bitumen y luego descarga en su parte trasera una hilera de material mezclado listo para ser aireado y distribuido. Otro equipo recibe el agregado en un depósito de alimentación

proveniente de una vagoneta, adicione y mezcla el bitumen y distribuye el material en su parte trasera mientras se mueve a lo largo de la superficie de la ruta. Ciertas propiedades y características de desempeño son comunes a todas las plantas móviles permitiéndoles operar efectivamente y producir una mezcla que cumple con el diseño y criterios de especificación. Para empezar las huellas o llantas de los equipos deben ser de un tamaño, diseño y ubicadas de tal manera que no dañen o deformen la superficie en la cual operan cuando el equipo está totalmente cargado. El propósito básico de las plantas móviles es mezclar asfalto y agregados. Algunos equipos presentan aditamentos que permiten dosificar automáticamente las proporciones requeridas, otras requieren mantener una tasa de avance sea fijada para asegurar una uniformidad en la dosificación. Una planta móvil eficiente es aquella que es capaz de mezclar completamente el agregado y bitumen, dispersar el asfalto uniformemente, y cubrir adecuadamente las partículas de agregado, produciendo una mezcla de color uniforme.

2. Mezcladoras rotatorias (recuperadoras de caminos): El mezclado rotatorio o mecánico en sitio es realizado por lo que esencialmente es una cámara de mezclado móvil montada en un equipo autopropulsado. En la cámara de usualmente unos 2.5m aproximadamente de ancho y abierta en la parte inferior se encuentran una serie de ejes transversales a la superficie de la ruta, en donde están colocadas unas cuchillas que giran a relativa alta velocidad. Conforme la máquina se mueve hacia delante, va conformando una superficie uniforme de bitumen y agregado. Algunos equipos tienen hasta cuatro ejes o rotores sin embargo la mayoría cuenta con solo uno. Algunos mezcladores de eje simple cuentan con un sistema que adiciona automáticamente el asfalto, rociándolo dentro de la cámara de mezclado, sincronizando la cantidad de bitumen con la velocidad de recorrido. Otras máquinas, deberán ser utilizadas en conjunto con distribuidoras de bitumen que dosifiquen inmediatamente antes de que la mezcladora. Ambos equipos tienen la capacidad de realizar un corte adecuado a la profundidad deseada y luego mezclar el material con el bitumen en la dosificación deseada. Equipos con dosificadores automáticos de bitumen deberán tener la capacidad de medir de manera precisa y mezclar la cantidad de asfalto requerida con el material del sitio de forma sincronizada con la velocidad de avance. Además deberán de tener válvulas de distribución que garanticen la uniformidad a todo lo largo de la cámara.

3. Niveladoras: El mezclado con la paleta o cuchilla se refiere a la mezcla en sitio del material y el bitumen mediante la niveladora. El bitumen es aplicado directamente delante de la niveladora por medio de un distribuidor de asfalto. Par aun mezclado más efectivo con la cuchilla la niveladora deberá tener una hoja de al menos 3m de largo y una distancia entre ejes de 4.6m. las niveladoras para la colocación final deberán usar llantas lisas en vez de utilizar llantas con taco.
4. Distribuidores de bitumen: Los distribuidores de bitumen son una pieza de equipo clave en la construcción con material bituminoso en frío, especialmente cuando se utilizan recuperadoras de asfalto con dosificación automática. El distribuidor de asfalto, ya sea jalado por un camión o montado en trailer, consiste en un tanque aislado, sistema de calentamiento, una bomba, y una barra con válvulas e inyectores por medio de las cuales es bitumen líquido es aplicado mediante presión en los materiales preparados. Los distribuidores de bitumen varían en cuanto a desempeño y capacidad, algunos capaces de aplicar mas de 4.6m a tasas controladas de hasta 13.5 litros por metro cuadrado. Es importante tener cerca del proyecto una reserva de bitumen para evitar atrasos.

4.3.2 Equipo de colocación

Algunos tipos de mezclas deben de ser colocados al espesor definido sin aireación. Generalmente, estas son mezclas abiertas colocadas bajo condiciones climáticas que permitan la evaporación de la humedad o volátiles en un tiempo razonable. Deben ser colocadas por un planta móvil, por hileras o por niveladora o equipos específicos para colocación. En equipos mas modernos la colocación espesor y pendientes son colocados pro sensores electrónicos que toman referencia de cables colocados a lo largo de la ruta.

4.3.3 Construcción (mezclado en sitio)

1. Hileras o camellones. En muchos casos la construcción de mezclas en frío requiere que el agregado sea colocado en hileras o camellones antes del mezclado y la colocación. Si las hileras serán utilizadas, la ruta debe de ser limpiada de vegetación a un ancho tal que permita la colocación de las hileras y el paso del tráfico, mientras que la mezcla cura. Como el espesor de la nueva capa es proporcional a la cantidad de agregado del camellón, se requerirá un

control preciso y medidas del volumen. Usualmente, no existe suficiente material suelto en la ruta para utilizar en la mezcla. En este caso se recomienda utilizar el material propio de la ruta en conformación de los espaldones en vez de realizar las labores necesarias que garanticen una adecuada homogenización con el material proveniente de otra fuente. Sin embargo algunas veces es factible incorporar el material existente en la ruta si es lo suficientemente homogéneo y se encuentra en suficiente cantidad. Cuando esta actividad es realizada, se deberá conformar un camellón con el material existente y ser medido, luego, deberá ser cuantificado para cumplir con especificaciones granulométricas agregando otros agregados de acuerdo a la necesidad. Finalmente el camellón será construido de acuerdo con las necesidades adicionando material de tal forma que se cumpla con especificaciones. Si se colocarán dos materiales ambos deberán colocarse en su propio camellón, luego serán mezclados completamente antes de que el bitumen sea incorporado.

2. Determinación de la tasa de aplicación del bitumen. Antes de iniciar las labores de mezclado, la tasa de aplicación del asfalto corregido y la velocidad de avance de la barra dosificadora de la mezcladora o del distribuidor de asfalto debe de ser determinado para la cantidad de agregado en el camellón. También cuando se utilice emulsión asfáltica es necesario humedecer el agregado antes de aplicar la emulsión por lo que la tasa de aplicación del agua y la velocidad de avance del distribuidor de agua deben ser determinados.
3. Control del asfalto. El asfalto es adicionado al agregado mediante un distribuidor o un mezclador móvil. Cualquiera sea el método que utilice, se debe llevar un estricto control de calidad y viscosidad para garantizar una mezcla adecuada. Mantener la viscosidad adecuada es crítico porque debe estar lo suficientemente líquido para moverse dentro de las válvulas e inyectores y para cubrir adecuadamente las partículas. Los asfaltos rebajados y en algunas ocasiones las emulsiones asfálticas aunque se encuentren fluidas, requieren calentamiento para llevarlas a una viscosidad adecuada para ser rociado. Si el grado del bitumen ha sido el adecuado, y el mezclado es efectuado de manera correcta, el asfalto rebajado o emulsión se mantendrán fluidos hasta que se complete el mezclado. Como la temperatura de la mezcla es controlada por la temperatura del agregado, se debe tener especial cuidado y evitar que el mezclado se realice con agregados a temperaturas inferiores a los 10°C.

4. Mezclado.

- a. Mezclado con plantas móviles. Ofrecen la ventaja de que se puede llevar un mejor control de la operación de mezclado que el realizado con niveladoras. Para las plantas que requieren camellones, los equipos se mueven a lo largo del camellón, recogiendo el agregado, mezclándolo con el bitumen en el mezclador para luego depositar la mezcla en un camellón, lista para su aireación y distribución. Par este tipo de plantas, el asfalto debe de ser calculado con exactitud de acuerdo con el ancho de la ruta y el espesor a colocar, la velocidad de avance del equipo y la densidad del material en le sitio. Como el espesor es especificado, la densidad fijada y la tasa de aplicación es definida, la variable es la velocidad. Si el tamaño del camellón es lo suficientemente grande que no pueda ser incorporada la cantidad total de bitumen en una sola pasada, deberá ser separada en dos o tres camellones con las correspondientes dosificaciones. Algunas veces es requerido mas de una pasada del equipo para garantizar una adecuado mezclado (ayuda a la aireación), en los casos en los que no pueda utilizarse el equipo en múltiples pasadas este mezclado puede ser efectuado con una niveladora.

- b. Mezclado con mezcladoras rotatorias. Al igual que en el caso de las plantas que requieren los camellones, las mezcladoras rotatorias o recuperadoras de caminos con sistemas de dosificación de bitumen requieren de una calibración de su sistema de acuerdo con el ancho de la ruta y el espesor de la capa, velocidad de avance y densidad del material en sitio. Cuando se utilizan equpos que no cuentan con adiciones para la dosificación de asfalto, requiriendo un dosificador delante del mezclador, por lo general son requeridos aplicaciones "incrementales" de bitumen y varias pasadas del mezclador para lograr la mezcla requerida. Cuando utilice equipos con adiciones para dosificar el bitumen estos son los pasos a seguir:
 - i. Distribuir el agregado a una tasa uniforme en toda la secció transversal con una niveladora.
 - ii. Mezcle completamente el agregado mediante una o mas masadas del mezclador. Cuando este listo para la adición del bitumen el contenido de agua no deberá exceder el 3%, a menos que ensayos de laboratorio muestren que mayores contenidos de humedad ayuden cuando se adiciona el bitumen.

- iii. Adicione el bitumen en incrementos de 0.5 galones por yarda cuadrada hasta que la cantidad total requerida sea aplicada y mezclada. Por lo general dosificaciones entre los 0,4 y 0,7 galones por yarda cuadrada por pulgada de espesor compactado son requeridos. Si el mezclador (recuperador de caminos) no tiene aditamentos para la dosificación el asfalto puede ser aplicado con un distribuidor.
 - iv. Realice las pasadas del mezclador necesarias para lograr un adecuado mezclado.
 - v. Mantenga la superficie con la pendiente y sección transversal requeridas mediante una niveladora durante las tareas de mezclado.
 - vi. Aire la mezcla mediante una manipulación adicional.
- c. Mezclado con niveladoras. El material de préstamo o propio del proyecto es colocado en una hilera o camellón. El camellón es achatado con la niveladora en un ancho similar al de tubo de irrigación del distribuidor. El bitumen es aplicado mediante pasadas sucesivas del distribuidor sobre el camellón achatado, las dosificación no deberá de exceder los 0,75 galones por yarda cuadrada. Para cada aplicación del distribuidor la mezcla es manipulada hacia delante y hacia atrás con la cuchilla de la niveladora, antes de cada pasada del distribuidor el material es conformado nuevamente en un camellón achatado. El material en el camellón será sometido a tantas mezcladas, distribuciones, manipulaciones y conformaciones necesarias para garantizar una adecuada distribución del bitumen y un adecuado recubrimiento de todas las partículas. Se debe buscar cambiar el ángulo vertical de la cuchilla en algunas ocasiones para lograr una adecuado volteado del camellón mientras se esta trabajando. La mayor cantidad de material posible debe de ser acarreado delante de la cuchilla, ya que la presión del peso del material facilita el mezclado. Se debe prestar especial atención al mezclar el material y evitar que durante este proceso se este incorporando más material de la superficie del terreno de que fue calculado, depositando material a las orillas del sitio de trabajo o dejando material en la superficie de trabajo sin ser tratado. Algunas veces cuando se utiliza asfalto rebajado, pueden producirse concentraciones de asfalto y agregado fino, lo cual hace la mezcla difícil de distribuir y compactar. Esta situación puede ser corregida conformando hileras suficientemente compactadas y permitiéndoles curar por un par de días. Una vez completado el mezclado y la aireación el camellón se mueve a un lado de la superficie

lista para una posterior distribución.

5. Aireación. Antes de la compactación, la mayoría de los diluyentes que hacen de la mezcla con bitumen en frío trabajable debe permitírsele la evaporación. In la mayoría de los casos esto ocurre durante el mezclado y la colocación por lo que muy poca aireación es requerida en estos casos, pero alguna ayuda extra es requerida ocasionalmente para ayudar a acelerar el procesos y disipar el exceso de diluentes. Hasta que la mezcla esté lo suficientemente aireada, no resistirá el paso de los compactadores sin un excesivo empuje en los cilindros. Generalmente la mezcla está lo suficientemente aireada cuando se vuelve pegajosa y pareciera arrastrarse. Muchas factores afectan la tasa y la cantidad de tiempo de aireación, mezclas de grano fino y bien graduadas requerirán mayor tiempo de aireación que las mezclas abiertas y de grano grueso, al mantenerse el resto de variables. Además, si a una base bituminosa se le adicionará una capa de rodadura la cual se colocará poco tiempo después de colocada la base, la aireación antes de compactarse debe de ser mas intensa que en aquellos casos en los que se permitan mayores periodos antes de colocar la capa de ruedo, la capa de ruedo trabaja como un sello, retardando la remoción de los diluyentes.
 - i. Mezclas con emulsiones asfálticas. Experiencias han demostrado que el la compactación de una mezcla con emulsiones asfálticas debe iniciar inmediatamente antes, o al mismo tiempo en que la emulsión empieza a romper (reconocible por el cambio de color de café a negro). En este momento, el contenido de humedad de la mezcla es suficiente para lubricar las partículas de agregado, pero se reduce al punto donde no permite el llenado de los espacios vacíos, permitiendo la reducción ante las fuerzas de compactación. Además para este momento, la mezcla debe de ser capaz de soportar el compactador sin desplazamientos.
 - ii. Mezclas con asfaltos rebajados. Cuando se utilicen asfaltos rebajados, una correcta aireación será alcanzada cuando el contenido de volátiles alcance el 50% del contenido en la mezcla original y el contenido de humedad no exceda 2% por peso del contenido de la mezcla.
6. Colocación y compactación. Una vez completado el mezclado y la aireación, se efectúan las labores de colocación y compactación. Alcanzar una sección final y una superficie pareja de acuerdo con los planes es el objetivo de estas dos actividades del proceso de construcción. La mezcla siempre debe de ser

colocada en un espesor uniforme de tal manera que no existan superficies o puntos delgados en el acabado final. Las mezclas que no requieren aireación deben ser colocadas inmediatamente luego del mezclado y compactadas con compactadores de llantas vibratorias o de acero. Las mezclas que requieren aireación, son colocadas sobre la superficie en camellones, los cuales serán luego dispersados. El camellón debe de ser colocado a lo largo de la línea de centro o a uno de los lados si será extendido con una niveladora. Es una práctica común dejar una joroba o bulto cuando se realiza el extendido con niveladora y el camellón es ubicado sobre la línea de centro, por lo que es una buena práctica colocar la hilera o camellón a lo largo de uno de los lados de la ruta. Al extender el material con niveladora esta debe realizarse en capas sucesivas delgadas de no más de 1.5 veces el tamaño máximo de agregado utilizado. Conforme cada capa vaya siendo colocada se debe dar una compactación inmediata con un compactador de llanta neumática. Como las llantas de la niveladora compactan la mezcla recién colocada, sus huellas se marcarán a manera de crestas en la superficie a menos que se realice una adecuada compactación entre cada una de las capas. El compactador debe estar ubicado inmediatamente después de la niveladora con el fin de evitar estas marcas. Si durante la compactación la mezcla presenta una deformación o desplazamientos desmedidos, esta debe de ser detenida. La compactación no deberá ser reiniciada hasta no lograr una reducción significativa del contenido de diluyentes, provocada ya sea de manera natural o mediante medios mecánicos. Hasta que una capa este debidamente compactada y curada no se podrá colocar la capa siguiente. Esta operación debe de realizarse hasta lograr la pendiente y conformación adecuada. Para lograr una superficie lo suficientemente pareja la niveladora debe de utilizarse para corregir y nivelar, mientras los compactadores completan la capa superior. Luego de que la capa ha sido conformada en la sección final requerida, se le debe de aplicar una compactación final preferiblemente con un compactador de rodillo, hasta que todas las marcas de los compactadores sean eliminadas. Algunas veces será requerido abrir temporalmente el paso de vehículos sobre la superficie estabilizada, en estos casos para prevenir la adherencia del material en las llantas se recomienda el sellado de la superficie aplicando una emulsión de rompimiento lento diluida a un 50% y aplicada a una tasa de 0.45 litros por metro cuadrado. Esto permitirá que el curado evite que las llantas de los vehículos levanten el material. Para el paso inmediato de vehículos la colocación de arena sobre el riego de sello es recomendado.

CAPÍTULO 5: CONDICIONES EXISTENTES EN COSTA RICA PARA LA FACTIBILIDAD DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES

5.1 Características de los materiales

Existe una zonificación geotécnica general de Costa Rica elaborado por Roy Bogantes como proyecto de investigación. Con base en esta zonificación es posible caracterizar las rutas, según el tipo de suelo sobre el que se encuentran ubicadas.

Es importante aclarar en este punto, que el material con el que fueron conformadas las rutas no siempre corresponde al material característico del sitio, sin embargo, en el caso de las rutas que por dificultad de acceso o por lejanía se encuentran clasificadas como: "*sin identificar*" muy probablemente, el material que conforma la superficie de ruedo es el mismo material del sitio, ya que incluso puede tratarse de caminos que se han abierto para uso general pero que originalmente eran trochas de uso privado o vecinal.

A continuación se presentan los resultados de esta caracterización.

En la Tabla 13 se presentan los tipos de suelos característicos sobre los cuales se ubican las rutas no pavimentadas, tanto de grava como las clasificadas como: "*sin identificar*". Se puede observar que el tipo de suelo que predomina es del tipo Lat.

Tabla 13: Tipo de suelo característico de rutas de lastre

Tipo de suelo	Longitud (km)
Lat	876.8
Amw	317.4
Am	307.5
Latw	291.8
Lic	185.5
V3w	181.3
Arc	110.9
V3	84.7
Licw	70.6
Pant	65.1
V2w	63.5
Roc	54.8
Sat	18.6

En el Gráfico 1 se puede observar la distribución porcentual de cada tipo de suelo, sobre el cuál se encuentra ubicada la red vial nacional sin pavimentar.

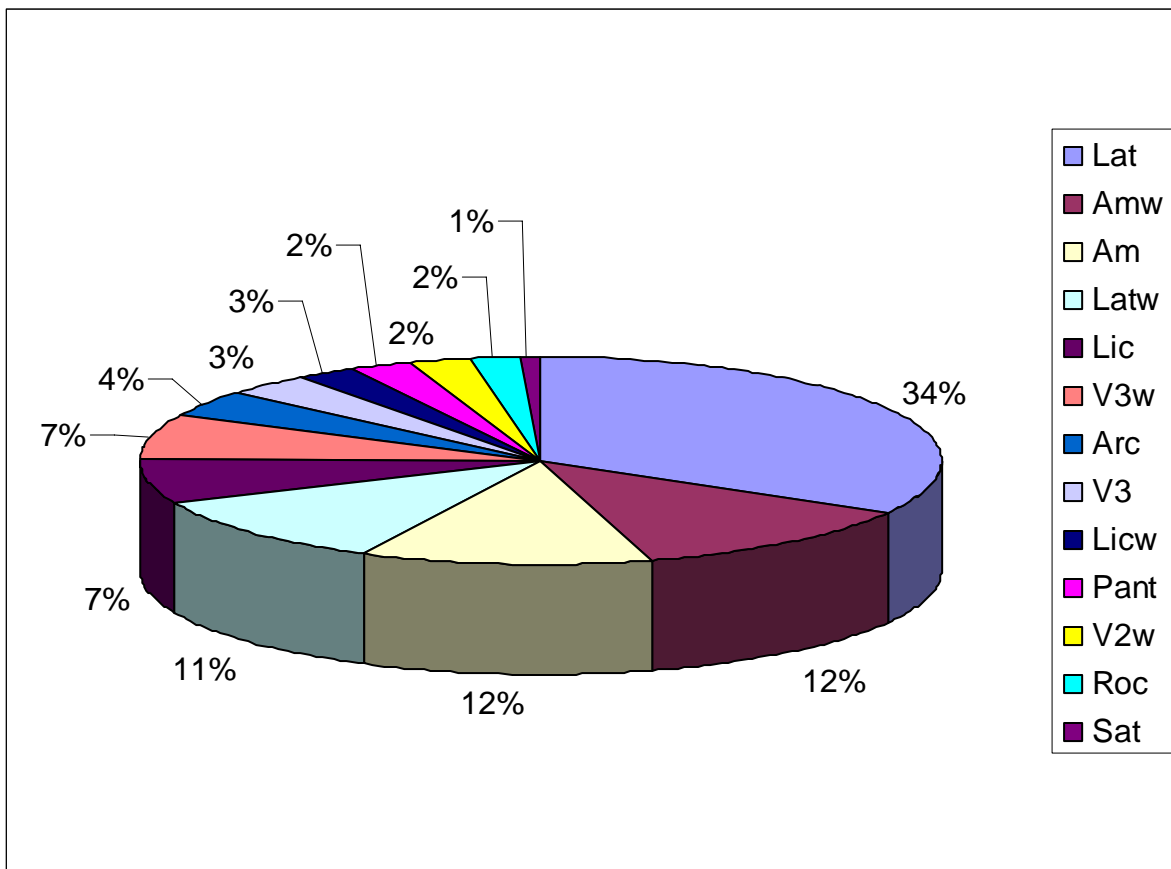


Gráfico 1: Distribución porcentual de los distintos tipos de suelos.

Como se puede observar, los que representan mayor peso porcentual, además del tipo Lat, son los tipos: Amw, Am, Latw, Lic y V3w.

Las características ingenieriles más importantes de estos suelos se resumen a continuación:

5.1.1 Suelos residuales rojizos (símbolo "Lat")

Descripción

Son suelos rojizos residuales con un espesor superior a los 2m. Se encuentran extendidos a lo largo y ancho del país, y pueden desarrollarse prácticamente a partir de cualquier roca madre y en cualquier clima. Los óxidos de hierro le confieren la coloración. Son arcillas limosas de alta plasticidad (generalmente MH), con límites líquidos superiores al 70%. Usualmente contienen más del 65% de arcilla caolinítica en su granulometría.

Características

- Presentan buenas condiciones de cimentación para obras livianas como casas y carreteras.
- Susceptibles a fenómenos de inestabilidad de taludes como reptación y deslizamientos superficiales.
- Buena permeabilidad por su alto contenido de arcilla caolinítica, es decir es un tipo de suelo que, debido a su composición minearológica tiende a formar estructuras mayores, y a pesar de ser arcillas tienden a comportarse más como un material granular por su estructura.
- Difíciles de compactar, por su alta humedad natural y óptima. Se han encontrado casos en los que su consistencia es muy blanda, principalmente en zonas lluviosas.

5.1.2 Suelos residuales de color amarillento (símbolo "Am")

Descripción

Son suelos pardo – amarillentos que durante todo el año se caracterizan por estar húmedos, lo cual les confiere este color. Estos suelos tienen menos contenido de arcilla que los suelos lateríticos, y pueden ser pedregosos, sobre todo en zonas de relieve ondulado. Mineralógicamente presentan caolinita principalmente.

Características

- Suelos residuales, sus características mecánicas tienden a mejorar conforme aumenta la profundidad.
- Presentan alto contenido de humedad durante todo el año lo cual implica que sean difíciles de compactar, por su consistencia y por la dificultad de secarlos al aire para alcanzar la humedad óptima.
- Son suelos blandos, aunque aptos para la cimentación de estructuras livianas, para cimentar estructuras pesadas se requeriría mejorar o sustituir las capas más superficiales.
- Son suelos con buena permeabilidad, mayor que la de los suelos rojizos.

5.1.3 Suelos aluviales (símbolo "Lic"):

Descripción

Formados por la depositación de los materiales finos (limos y arcillas) arrastrados por los ríos, por lo que son típicos de las llanuras aluviales del país, principalmente en la Zona Atlántica. Por ser suelos transportados, sus características y estratigrafías son muy variables, tanto en planta como en profundidad. Presentan un nivel freático

superficial por la topografía en la que se ubican y además debido a que contienen poca arcilla son susceptibles a licuación en caso de sismo.

Características

- Presentan susceptibilidad a licuación
- Son suelos en general blandos
- Por sus constituyentes no cohesivos (limos y arenas) son suelos permeables
- Es muy factible encontrar estratos blandos sub-yacentes bajo estos suelos transportados

5.1.4 Suelos volcánicos V3

Descripción

Suelos derivados de cenizas volcánicas y de la meteorización de rocas volcánicas. El contenido de cenizas y su grado de alteración es lo que determina en gran medida sus características.

El suelo tipo "V3" presenta apenas una leve influencia de la ceniza volcánica en su estructura. Su contenido de arena es de alrededor de un 20%, y generalmente son del tipo MH o ML según clasificación SUCS. En condiciones de saturación o de alta humedad permanente, las cenizas volcánicas contenidas en estos suelos meteorizan en arcillas grises de alto potencial de expansión. En algunos sitios, estos suelos pueden presentar comportamiento colapsable, aunque en menor grado que los suelos del tipo V2.

Características

- Estructura porosa y altas relaciones de vacíos, producto del transporte aéreo de la

ceniza volcánica.

- Estructura inestable y que puede colapsar por saturación
- Alta humedad natural
- Muy permeables
- Por su estructura porosa, son suelos blandos para fines de cimentación
- Bajos pesos unitarios
- Tienden a disminuir su resistencia conforme la zona en que se ubican es más lluviosa, producto del aumento en la porosidad de la estructura y en su contenido de humedad natural.

5.1.5 Suelos en zonas húmedas (V3w, Latw, Amw):

Estos suelos tienen humedades naturales sumamente altas, con frecuencia superiores al 100%, aparte de tener una estructura más porosa que suelos del mismo tipo ubicados en regiones más secas, lo cual los hace más blandos. Es común que los suelos rojizos o volcánicos de gran espesor en estas zonas presenten valores de **NSPT** nulos en ciertos tramos, e inferiores a 5 en otros, con lo cual pueden encontrarse 5m o más de suelos de consistencia muy blanda.

La **compactación** de estos suelos es especialmente difícil, dadas la humedad óptima requerida y las bajas densidades secas que se consiguen.