

GUIA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS

**JAIME RIASCOS MENA
NORMA LUCIA SANTOS**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2004**

GUIA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS

**JAIME RIASCOS MENA
NORMA LUCIA SANTOS**

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

**GUILLERMO MUÑOZ RICAURTE
I.C., ESPECIALISTA EN INGENIERIA
DE VIAS TERRESTRES**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2004**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, lunes 12 abril de 2004

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES	24
1.1 DEFINICIÓN	25
1.2 RAZONES PARA HACER LA ESTABILIZACIÓN	26
1.3 PROPIEDADES DE INTERÉS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	26
1.3.1 Estabilidad Volumétrica	27
1.3.2 Resistencia Mecánica	27
1.3.3 Compresibilidad	29
1.3.4 Durabilidad	30
1.3.5 Permeabilidad	30
1.4 PROCESOS GENERALES DE ESTABILIZACIÓN	31
1.4.1 Mecánico	31
1.4.2 Físico	31
1.4.3 Físico-Químico	31
1.4.4 Químico	31
1.5 ETAPAS GENERALES DE ESTUDIO PARA UN PROCESO DE ESTABILIZACIÓN	32
1.5.1 Identificación del Suelo	32
1.5.2 Alternativas de Estabilización	32
1.5.3 Procesos Constructivos	32

1.5.4	Economía	32
1.6	SUELOS PROBLEMÁTICOS COMUNES EN COLOMBIA RECOMENDACIONES GENERALES PARA SU IDENTIFICACIÓN Y MANEJO	32
1.6.1	Suelos Arcillosos Blandos Compresibles y Suelos Orgánicos	34
1.6.2	Suelos Volcánicos	36
1.6.3	Suelos Expansivos	37
2.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL	49
2.1	REACCIONES DE LA CAL Y EL SUELO	50
2.2	MATERIALES USADOS EN LA ESTABILIZACIÓN SUELO-CAL	52
2.2.1	Los Suelos	52
2.2.2	La Cal	53
2.3	CONTROL DE CALIDAD DE LA CAL	56
2.4	OBJETIVO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL	56
2.5	INFLUENCIA DE LA CAL	58
2.5.1	Influencia de la Cal en las Características de los Suelos	58
2.5.2	Influencia de la Cal Sobre las Constantes Físicas del Suelo	58
2.5.3	Influencia Sobre la Humedad	59
2.5.4	Influencia Sobre la Textura Elemental del Suelo	59
2.5.5	Influencia Sobre los Cambios Volumétricos	61
2.5.6	Influencia Sobre la Acidez del Suelo	61
2.5.7	Influencia Sobre la Densidad	62
2.5.8	Influencia Sobre la Resistencia	62
2.6	DETERMINACIÓN DE LA CAL ÚTIL VIAL	68

2.7	DISEÑO DE LA MEZCLA SUELO CAL	70
2.7.1	Selección del Porcentaje Optimo	70
2.7.2	Influencia Sobre las Condiciones de Curado	71
2.7.3	Recomendaciones para la Selección el Porcentaje Optimo de Cal	75
2.7.4	Normas Sobre los Materiales	76
2.8	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN	77
2.8.1	Generalidades	77
2.8.2	Mejoramamiento de la Subrasante	78
2.8.3	Estabilización de la Capa de Pavimento	79
2.8.4	Empleo de la Cal en Forma de Lechada	80
2.8.5	Normas de Seguridad	80
2.9	OPERACIONES DE CONTROL Y ESPECIFICACIONES	81
2.9.1	Control	81
2.9.2	Especificaciones	81
3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE LA ADICIÓN DE CEMENTOS PÓRTLAND	83
3.1	GENERALIDADES	83
3.2	ACCIÓN DEL CEMENTO EN LOS SUELOS	84
3.3	DIFERENTES MATERIALES PRODUCIDOS CON CEMENTO	85
3.3.1	Naturaleza de los Materiales Tratados con Cemento	85
3.4	MATERIALES PARA SUELO-CEMENTO	86
3.4.1	Suelos	86
3.4.2	Cemento Pórtland	88

3.5	VENTAJAS EN LA UTILIZACIÓN DE LA MEZCLA DE SUELO-CEMENTO	90
3.6	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA UTILIZACIÓN DE LA MEZCLA DE SUELO-CEMENTO	91
3.6.1	El tipo de Suelo	91
3.6.2	La Cantidad de Cemento.	91
3.6.3	La Cantidad de Agua que se Agrega a la Mezcla	92
3.6.4	La Compactación de la Mezcla	92
3.6.5	Curado de la Mezcla Compactada	93
3.7	MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN	93
3.7.1	Norma General para la Dosificación	95
3.7.2	Norma Simplificada de Dosificación	97
3.8	SUELOS MODIFICADOS CON CEMENTO	103
3.9	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN	105
3.9.1	Preparación	105
3.9.2	Procesos Específicos de la Mezcla en Vía	105
3.9.3	Procesos Específicos de la Mezcla en Planta	111
3.9.4	Compactación	113
3.9.5	Acabado	115
3.9.6	Curado	117
3.9.7	Juntas de Construcción	117
3.9.8	Construcción en Varias Capas	119
3.9.9	Apertura al Transito	119

4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON MATERIALES BITUMINOSOS	121
4.1 GENERALIDADES	121
4.2 TIPOS DE ESTABILIZACIONES BITUMINOSAS	122
4.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE ESTABILIZACIÓN BITUMINOSA	123
4.3.1 Características de los Materiales Disponibles y Aptos para su Estabilización	123
4.3.2 Calidad Requerida	124
4.3.3 Condiciones Climáticas en La Zona del Proyecto	125
4.3.4 Procesos Constructivos	125
4.4 FUNDAMENTOS DE LA ESTABILIZACIÓN BITUMINOSA	126
4.4.1 Sistema Suelo Ligante	126
4.4.2 Sistema Arena Ligante	127
4.5 MATERIALES RECOMENDADOS PARA ESTABILIZAR	127
4.5.1 Las Arenas	127
4.5.2 Los Suelos	127
4.5.3 Grava – Arena	127
4.6 LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON ASFALTO	128
4.6.1 Los Agregados Pétreos	128
4.6.2 Los Ligantes Bituminosos	129
4.7 AFINIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS Y LOS LIGANTES BITUMINOSOS	133
4.7.1 Definición de Adherencia	133

4.7.2	Factores que Influyen en el Fenómeno de la Adherencia	133
4.7.3	Ensayos de Laboratorio para Determinar la Afinidad Ligante Agregado Pétreo	135
4.8	MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ESTABILIZADAS CON PRODUCTOS ASFÁLTICOS	138
4.8.1	Métodos Basados en el Calculo de la Superficie Especifica	139
4.8.2	Métodos Basados en Ensayos Mecánicos	139
4.9	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS CON ASFALTO	142
4.10	PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN	150
4.10.1	Elaboración de la Mezcla	150
4.10.2	Curado de la Mezcla	152
4.10.3	El Extendido de la Mezcla en Frío	152
4.10.4	La Compactación	152
4.10.5	Puesta en Servicio	153
4.11	OPERACIONES DE CONTROL Y ESPECIFICACIONES	153
5.	GENERALIDADES DE ESTABILIZACIÓN CON PRODUCTOS DIVERSOS	155
5.1	ESTABILIZACIÓN CON SALES	155
5.1.1	Estabilización con Cloruro de Sodio	155
5.1.2	Estabilización con Cloruro de Calcio	160
5.1.3	Estabilización con Silicato de Sodio	163
5.1.4	Empleo de Otros Tipos de Sales	167
5.1.5	Conclusiones Generales Respecto al Empleo de Sales para la Estabilización de Suelos	167
5.2	ESTABILIZACIÓN CON ÁCIDOS INORGÁNICOS	168

5.2.1	Estabilización con Ácido Fosfórico	169
5.2.2	Estabilización con Ácido Fluorhídrico	174
5.3	TRATAMIENTO CON RESINAS Y POLÍMEROS	174
6.	CONCLUSIONES	175
	BIBLIOGRAFÍA	176

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Identificación de suelos blandos	35
Cuadro 2. Método de Holtz y Gibbs	43
Cuadro 3. Método de Altmeyer	43
Cuadro 4. Método de Seed, Woodward and Lungren	44
Cuadro 5. Método de Lambe	44
Cuadro 6. Requerimientos de las calizas y carbonatos de calcio naturales para formar cal estabilizante	50
Cuadro 7. Efecto de la inclusión de silicatos de sodio, como aditivo, en la resistencia de suelos estabilizados con cal después de 7 días de curado y 1 día de inmersión	51
Cuadro 8. Clasificación de las cales IRAM 1516	56
Cuadro 9. Fracciones según análisis mecánico	59
Cuadro 10. Fracciones según análisis mecánico 2	61
Cuadro 11. Influencia sobre el PH	62
Cuadro 12. Influencia de las condiciones de curado	73
Cuadro 13. Influencia de las condiciones de curado	75
Cuadro 14. Efecto de la cal en la trabajabilidad de una arcilla	76
Cuadro 15. Requisitos granulométricos para suelos de subrasante	77
Cuadro 16. Perdidas admisibles en el ensayo de durabilidad por mojado y secado	92
Cuadro 17. Contenido de cemento para el ensayo de compactación	96
Cuadro 18. Contenido de cemento probable para suelos arenosos no orgánicos	96
Cuadro 19. Propiedades de los materiales que pueden ser estabilizados con productos bituminosos	128
Cuadro 20. Rebajados de fraguado medio	130
Cuadro 21. Rebajados de fraguado lento	131
Cuadro 22. Temperaturas de mezclado exigidas a los materiales	137
Cuadro 23. Índices de adhesividad de Riedel – Weber	137

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Selección preliminar de la estabilización	33
Figura 2. Influencia de la cal sobre las constantes físicas de una arcilla de bayunca	60
Figura 3. Curvas unidad – densidad para una grava arcillosa típica	63
Figura 4. Efecto de la cal sobre la resistencia de los suelos	65
Figura 5. Efectos del tiempo y la temperatura en la resistencia de una arcillosa limosa estabilizada con cal	66
Figura 6. Variación del C.B.R. con el porcentaje de cal	67
Figura 7. Variación del tenor óptimo de cal de acuerdo a las condiciones de curado	72
Figura 8. Nomograma para transformar contenido de cemento en peso a contenido de cemento en volumen	94
Figura 9. Dosificación de mezclas de suelo cemento norma simplificada. Método A	102
Figura 10. Dosificación de mezclas de suelo cemento norma simplificada. Método B	104
Figura 11. Esquema del proceso constructivo de una capa de suelo cemento	106
Figura 12. Preparación de la vía	110
Figura 13. Prehumedecimiento del Terreno	110
Figura 14. Pulverización utilizando equipo Agrícola	110
Figura 15. Pulverización utilizando motoniveladora	110
Figura 16. Distribución manual del cemento	112
Figura 17. Operación de la mezcladora rotativa en seco	112
Figura 18. Operación de la mezcladora rotativa con adición de agua	112
Figura 19. Compactación utilizando cilindro liso	114
Figura 20. Compactación utilizando cilindro pata de cabra	114
Figura 21. Proceso de terminación	114
Figura 22. Curado utilizando compuesto bituminoso	118
Figura 23. Curado utilizando membrana plástica	118
Figura 24. Efecto en el peso volumétrico seco y en la resistencia a la compresión simple del contenido de solventes en especímenes estabilizados con asfaltos	144
Figura 25. Efecto del contenido de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso, estabilizados con emulsión	144
Figura 26. Efecto del tiempo de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso, estabilizados con 5 % de asfalto y sin aditivos	146

Figura 27. Efecto del contenido de solventes en la resistencia a la compresión simple tras un periodo de rehumedecimiento, de especímenes con productos asfálticos	146
Figura 28. Variación de la absorción de agua con el contenido de asfalto	147
Figura 29. Variación del V.R.S. con el contenido de asfalto	147
Figura 30. Variación de la absorción de agua con el contenido de Asfalto	149
Figura 31. Relación de la resistencia en la proporción de ácido fosfórico agregado a un suelo arcilloso-limoso	170
Figura 32. Relación de la resistencia con el tiempo de curado	171
Figura 33. Efectos producidos por el ácido fosfórico en una arcilla Limosa	171
Figura 34. Curvas de compactación de una arcilla limosa tratada con ácido fosfórico	173

GLOSARIO

AASHTO: acrónimo de American Association of state Higways and Transportation Official, Asociación de empleados estatales de transit y carreteras. La clasificación geotécnica de la ASSHTO fue desarrollada por Terzaghi y Hogentogler que se basa en sus características granulométricas y de plasticidad.

ABRASIÓN: es el desgaste de un material producido por fricción, frotamiento, raspaduras o percusiones.

ADSORCIÓN: fijación de moléculas de agua y de iones a la superficie de las partículas de suelo, por efecto de atracción eléctrica que resulta del desequilibrio de origen eléctrico de dichos partículas.

AGUA HIGROSCÓPICA: la retenida por el suelo seco al aire en equilibrio con la presión de vapor de la humedad atmosférica.

ASTM: acrónimo de American Society for Testig and Materials, Sociedad Norteamericana de Ensayos y Materiales.

BENTONITA: nombre comercial aplicado a algunos depósitos de arcilla rica en Montmorillonita.

CALICHE: suelo endurecido por la acumulación secundaria de minerales principalmente de oxido de hierro y carbonato de calcio en suelos áridos y semiáridos.

CAOLÍN: arcilla blanca muy pura originada por descomposición de rocas graníticas que se utilizan para la fabricación de porcelana.

C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO): relación de soporte de California, es una medida del esfuerzo cortante del suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas y se expresa como un porcentaje del esfuerzo requerido para hacer penetrar un pistón en el suelo que se ensaya, dividido entre el esfuerzo

requerido para hacer penetrar el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón.

COMPACTACIÓN: se denomina compactación de suelos al proceso mecánico mediante el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo deformación de los mismos.

ESCARIFICAR: quebrar o levantar el terreno por medio de un escarificador, escarificador arado mecánico denominado Rooter cuando es objeto de remolque por parte de un tractor y Ripper en los modelos automotrices formando parte del equipo de una topadora de cadenas. Sirve para desgarrar los suelos compactos y las rocas semiduras a manera de arado.

FATIGA: carga que debe soportar un elemento constructivo o la totalidad de la construcción.

FLOCULACIÓN: es el proceso mediante el cual la fase dispersa de un sistema coloidal se separa del sistema, formando una fase continua.

FRAGUADO: proceso químico que se produce en un amasado de aglomerantes, tales como cales, yeso y cemento por el que la masa al secar adopta un endurecimiento irreversible ya que no podrá ablandarse de nuevo en caso alguno. Es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento.

FUERZAS DE VAN DER WAALS: debido a la multiplicidad de cargas dan como resultado fuerzas atractivas sin importar el signo de las partículas.

GRANULOMETRÍA: esta definida como la distribución de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD: mide el rango dentro del cual un suelo se comporta plásticamente entre mayor sea el I_p mayor será la plasticidad de un suelo.

JUNTA DE DILATACIÓN: la que se deja sin cerrar, para permitir las dilataciones y contracciones de la obra sin que se produzcan agrietamientos.

LECHADA: masa muy clara de cal yeso o cemento.

LIMITE DE CONTRACCIÓN: es el menor contenido de agua bajo el cual un suelo no cambia de volumen al perder agua, sirve para obtener una orientación de la expansión.

LIMITE PLÁSTICO: es el menor contenido de agua para el cual un suelo pasa del estado plástico al estado semisólido.

LOESS: sedimentos eólicos, uniformes y cohesivos, comúnmente de color castaño claro (Desiertos).

MONTMORILLONITA: es la arcilla más expansiva, que al secarse después de estar saturada produce retracción considerable (contracción), con el consiguiente agrietamiento. Tiene mayor plasticidad, mayor actividad, más baja permeabilidad y más bajo ángulo de fricción interna.

NIVEL FREÁTICO: del total del agua que cae a un suelo, parte se infiltra; el agua que se infiltra lo hace por gravedad hasta alcanzar estratos impermeables profundos que forman la capa freática, cuya parte superior se llama nivel freático.

PERMEABILIDAD: es la capacidad de un material de dejarse o no atravesar por un fluido a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material. La permeabilidad esta determinada por el caudal filtrado de acuerdo con la ley experimental de Darcy, en el cual el flujo es laminar y permanente.

PESO ESPECIFICO: relación entre el peso y volumen de una masa determinada.

PESO VOLUMÉTRICO: el peso volumétrico de un agregado mas comúnmente conocido como masa unitaria, esta definido como la relación existente entre el peso de una muestra de agregado compuesta por varias partículas y el volumen que ocupan estas partículas agrupadas dentro de un recipiente de volumen conocido.

PÉTREO: que presenta la dureza y compacidad de la piedra.

PLASTICIDAD: un suelo debido a la presencia de agua se puede o no dejar moldear o adquiere una forma de consistencia característica. Es aplicable a suelos finos la consistencia puede ser variada a voluntad, aumentando o disminuyendo la humedad.

RESINA: exudado vegetal de menor dureza que las gomas, no soluble al agua pero sí al alcohol.

SUBRASANTE: es la correspondiente al terreno de fundación, quien llevara las secciones transversales y pendientes especificadas. Constituye la capa superior de las explanaciones sobre la cual se constituye el pavimento, y como tal, quien finalmente soporta las cargas producidas por el tráfico.

VERMICULITA: material derivado de la composición de la mica; de la estructura escamosa y peso específico muy reducido, que tiene aplicación en la protección de estructuras metálicas o para rellenar huecos de fábrica, se utiliza también como buen aislante térmico y acústico.

RESUMEN

La diversidad de suelos que existen en Colombia, así como la variabilidad de sus características físicas y químicas dan suelos de difícil manejo; para controlar los problemas que generan este tipo de suelos para la construcción de obras, se han estudiado diferentes alternativas para la estabilización de suelos, siendo las más comunes no sólo por los resultados obtenidos sino también por la economía que representa la utilización de estos productos, la estabilización con cal, cemento Pórtland y productos bituminosos.

Lo que se busca al utilizar cualquier producto para estabilizar un suelo, es modificar sus propiedades para hacer cumplir los requerimientos de diseño y especificaciones de construcción en obra; las principales propiedades que se busca mejorar con un proceso de estabilización son la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica, compresibilidad, durabilidad y permeabilidad. Para hacer una selección preliminar del tipo de estabilización a utilizar es importante tener en cuenta la granulometría y los Límites de Atterberg del suelo, sin embargo, el criterio y experiencia del ingeniero, es en último caso quien decide el tipo de estabilización.

Como se mencionó anteriormente, los productos más utilizados para estabilizar son: la cal que tiene poco efecto en suelos muy orgánicos, pero que tiene su máximo efecto en las gravas; la estabilización con cemento Pórtland que es aplicable a casi todo tipo de suelo y que es la más utilizada ya que su dosificación y diseño de espesores son sencillos y se requieren equipos de construcción simples, y la estabilización con productos bituminosos que se puede utilizar en una amplia gama de suelos granulares y finos pero que su utilización requiere de experiencia; Sin embargo, se ha venido estudiando la estabilización con productos químicos que aunque no son muy utilizados, los resultados han sido satisfactorios, tales como las sales, ácidos inorgánicos y tratamientos con polímeros y resinas.

ABSTRACT

The diversity of soils that exist in Colombia, as well as the variability of its physical and chemical characteristics gives us soils of difficult handling; to control the problems that generate this type of soils for the construction, different alternatives they have been studied for the stabilization of soils, being not only the most common for the results obtained but also for the economy that represents the use of these products the stabilization with lime, Pórtland cement and bituminous products.

What is looked for when using any product to stabilize, is to modify their properties with the purpose of making complete the requirements of designs and construction specifications; the main properties that it is looked for to control with a stabilization process are the volumetric stability, mechanical resistance, compresibility, durability and permeability. To make a preliminary selection of the stabilization type to use it is important to keep in mind the granulometric analysis and the Limits of Atterberg, however, the approach and the engineer's experience, are in last case who decides the stabilization to use.

As it was mentioned previously, the most used stabilizations are with lime that has little effect in organic soils, but has their maximum effect in the gravels; the stabilization with cement that is applicable to almost all soil type and it is the more used their dosage and the design of thickness are simple and simple construction teams are required, and, the stabilization with bituminous products that you can use in a wide range of granular and fine soils but that their use requires of a wide experience; however it has been come studying the stabilization with chemical products that although they are not very used, the results have been satisfactory, such as the salts, inorganic acids and treatments with polymers and resins.

INTRODUCCION

El estudio del suelo donde se proyecta levantar una estructura, es de gran importancia, puesto que las características de éste son fundamentales para determinar el diseño de la cimentación ya que dependiendo de la estabilidad y capacidad portante de un determinado tipo de suelo la cimentación sufrirá variaciones que pueden elevar considerablemente el costo de la estructura.

Teniendo en cuenta que los suelos colombianos presentan diferentes problemas en casi toda su extensión, surge la necesidad de mejorar el comportamiento del suelo en circunstancias donde el reemplazo de éste es imposible algunas veces por la carencia del material de préstamo cerca de la zona afectada y los elevados costos que esto representa.

El conocimiento de los procesos de estabilización de suelos constituye una herramienta importante en la Ingeniería Civil, ya que permite solucionar problemas relacionados con las propiedades del suelo de una manera rápida, eficiente y económica.

Esta monografía brinda las herramientas necesarias a los estudiantes de ingeniería civil para el aprendizaje sobre los procesos más utilizados en la estabilización de suelos, explicando en forma sencilla y dinámica los diferentes métodos para estabilizar; teniendo en cuenta el origen, reacción que produce en el suelo, métodos de dosificación y sistemas constructivos de cada uno.

Como se ha dicho anteriormente este texto ofrece las bases suficientes para conocer los diferentes procesos de estabilización, sin embargo, la aplicación de cualquiera de ellos debe estar acompañado de la experiencia puesto que cada situación en la que se requiere estabilizar es única, y necesita de un análisis propio para determinar la metodología a utilizar.

1. GENERALIDADES

Una de las principales labores del ingeniero civil es la de proporcionar a los usuarios estructuras de las mejores características al mas bajo costo. Para lograr esto no solo es importante que los materiales sean de optima calidad, sino que la parte inferior de la estructura presente una adecuada resistencia que le permita soportar los esfuerzos deformantes que a ella lleguen y, además, ser capaz de resistir cambios volumétricos por acción del agua.

Con el fin de alcanzar estos objetivos, y en virtud de que no siempre los materiales del lugar presentan las mejores condiciones, la ingeniería ha recurrido a diversas técnicas de estabilización de suelos, cada una de las cuales es conveniente en determinadas circunstancias y con una correcta interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Con frecuencia el ingeniero, debe enfrentarse con suelos que tiene que utilizar para una obra determinada y cuyas características no satisfacen las necesidades del proyecto, por tal razón el ingeniero puede tomar algunas de las siguientes posibles decisiones:

- Aceptar el suelo y considerarlo con sus propiedades para el diseño de la estructura teniendo en cuenta las restricciones impuestas por su calidad.
- Remover el suelo total o parcialmente, mejorándolo con la adición de otro de mejores condiciones.
- Modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados, cuando menos, que la calidad obtenida sea la adecuada.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. Por ende son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr la mejoría de las propiedades de los suelos, con el objetivo de hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización.

Las propiedades de un suelo se pueden alterar por cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido.
- Estabilización por drenaje

- Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrólisis y la utilización de pilotes electrometálicos son probablemente los más conocidos.
- Estabilización por empleo de calor y calcinación.
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal, el asfalto u otros.

Teniendo en cuenta la variabilidad de los suelos y la composición de los mismos, es de esperarse que cada método resulte sólo aplicable a un número limitado de ellos; en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económico, hayan de involucrarse varios tipos de suelos, a veces con variaciones de alguna significación, teniendo que renunciar correspondientemente al empleo del procedimiento “óptimo” en cada clase.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse; sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

1.1 DEFINICIÓN

La estabilización de suelos es un conjunto de procesos físicos, químicos y físico-químicos tendientes a modificar sus propiedades con el fin de hacer cumplir los requerimientos de diseño y especificaciones de construcción en un proyecto de ingeniería. En algunos proyectos los procesos pueden ser parciales como requisito para mejorar condiciones de trabajabilidad, en este caso suele denominarse mejoramiento del suelo.

La estabilización de suelos en la medida que se han desarrollado los conocimientos sobre la formación de suelos, las características físicas y químicas, las propiedades de nuevos materiales con los cuales pueden mezclarse y la información técnica estadísticamente procesada de las experiencias de proyectos ejecutados, se ha convertido en una ciencia estructurada lo que inicialmente era un arte.

1.2 RAZONES PARA HACER ESTABILIZACIÓN

Las siguientes razones pueden justificar un proyecto de estabilización de suelos:

- **Subrasante de condiciones pobres.** Posibilidad de cambios volumétricos excesivos, baja capacidad portante, altas deformaciones frente a las cargas. Un diseño de pavimentos aceptando esta subrasante, conduce a una estructura con espesores muy grandes y alto riesgo de destrucción temprana.
- **Control de humedad.** En regiones tropicales, el exceso de agua en los suelos finos dificulta adelantar un proceso constructivo; la mezcla con un bajo porcentaje de cal, ayuda a la reducción de humedad del suelo y facilita la trabajabilidad.
- **Mejorar materiales de base.** Ajustar granulometría a especificaciones, controlar plasticidad de finos, garantizar cohesión o adherencia entre partículas; son algunos de los casos que justifican un proyecto de estabilización.
- **Control de polvo.** En algunos proyectos con el fin de prevenir la erosión eólica, para dar comodidad al tránsito o facilitar procesos constructivos, puede controlarse la fracción fina proporcionando humedad o algún aditivo de liga.
- **Rehabilitación de pavimentos.** La oportunidad de reutilizar materiales de pavimentos antiguos (reciclaje) para adaptar las capas a las nuevas exigencias de las cargas de tránsito, exige mezclarlos con otros de mejor calidad o usar cementantes, favoreciendo así la ecología en la disposición de sobrantes y en la necesidad de nuevos suelos.
- **Construcción de bases de calidad superior.** El proceso de desarrollo de la economía del país, crecimiento de las cargas del tránsito en peso y en frecuencia, demanda carreteras con estructuras de pavimentos más reforzadas, una alternativa para no incrementar demasiado los espesores de capas es construir bases de suelo-cemento o suelo-asfalto.

1.3 PROPIEDADES DE INTERÉS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Entre las principales propiedades que se estudian y se controlan en un proyecto de estabilización se mencionan:

1.3.1 Estabilidad volumétrica. La expansión y contracción de muchos suelos, originados por los cambios de humedad, se pueden presentar en forma rápida o

acompañando a las variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. Por tanto, si las expansiones que se desarrollan debido a un incremento de humedad no se controlan en alguna forma, estas presiones pueden ocasionar grandes deformaciones y rupturas en el pavimento y, en general, en cualquier obra. Es por ello que resulta necesario detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado.

Actualmente, las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos consisten en introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y apoyar la estructura a profundidades tales que no se registre variación estacional en la humedad. Otro medio podría consistir en modificar la arcilla expansiva transformándola en una masa rígida o granular cuyas partículas estén lo suficientemente ligadas para resistir la presión expansiva interna de la arcilla, lo cual puede lograrse por medios químicos o térmicos. En estos casos, cuando la capa a estabilizar sea de poco espesor, deberá tenerse en cuenta que el suelo subyacente es aún susceptible de expandirse, pero tales movimientos podrían tolerarse siempre y cuando la capa estabilizada se mueva en forma uniforme.

1.3.2 Resistencia Mecánica. La resistencia de los suelos, con algunas excepciones, es en general más baja cuanto mayor sea su contenido de humedad.

Los suelos arcillosos al secarse, alcanzan grandes resistencias teniéndose inclusive la condición más alta de resistencia cuando se calientan a temperaturas muy elevadas como sucede en la fabricación de tabiques y ladrillos. Existen casos en donde la disminución de humedad puede significar reducción en la resistencia, pues se han presentado casos de deslizamientos de tierra provocados por arcillas que se secaron y se agrietaron, provocando con ello que el comportamiento del material sea el de un suelo friccionante que puede tener menor resistencia que si se considera como cohesivo a humedades mayores. La acción abrasiva del tránsito, por ejemplo, puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión.

Por otro lado, dependiendo de la humedad y energía de compactación, se pueden lograr diferentes características de resistencia en un suelo arcilloso, ya que un suelo de éstos compactado del lado seco en la curva de compactación presenta, con la humedad de compactación, un comportamiento relativamente elástico y con una resistencia relativamente alta; mientras que este mismo suelo compactado con una alta humedad, no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso: este efecto se debe, en general, a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas, propiciando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación bajas.

Por otra parte, se ha visto que en suelos finos, tiene una importancia decisiva la forma de aplicación de la energía de compactación, sobre todo cuando se emplean humedades mas altas que la óptima, por ejemplo, la energía aplicada por impactos puede ocasionar que un suelo compactado del lado húmedo presenta resistencia del orden de hasta un cuarto de veces menor que la resistencia, que, a igualdad de circunstancias, presenta el mismo suelo compactado en forma estática. La explicación a lo anterior reside en la diferente estructuración que adoptan las arcillas al ser compactadas mediante procedimientos de compactación diferentes.

Algunos de los principales procedimientos para incrementar el peso volumétrico de un suelo son:

- Compactación mediante amasado, vibración o impactos
- Vibroflotación
- Precarga
- Drenaje
- Adición de agentes que reduzcan la fricción y cohesión entre las partículas

Resulta evidente que los procedimientos que sirvan para mantener un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo, como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino en una masa rígida o granular. Estos agentes pueden ser químicos o térmicos teniendo entre los primeros al cemento Pórtland y la cal como los más comunes.

El procedimiento de vibroflotación es especialmente aplicable en la compactación de arenas o suelos con alta permeabilidad y consiste en la inserción, en el suelo arenoso suelto de un dispositivo vibratorio, capaz de aplicar un chiflón de agua simultáneamente con el vibrado, de tal manera que al encontrarse dicho dispositivo dentro del suelo inyectando agua y vibrando se produce la licuación de la arena y lográndose con ello su compactación.

El incremento del peso volumétrico en un suelo arcilloso mediante la precarga consiste en la colocación de una carga superficial sobre el suelo en cuestión, con el objeto de preconsolidarlo. Después de la precarga el suelo tiene todas las características deseables de un terreno preconsolidado, si se compara con uno normalmente consolidado, es decir, que es menos compresible y más resistente, aumentándose con ello la capacidad de carga y disminuyéndose los asentamientos. Es muy importante, sin embargo, tener presente que este método de estabilización puede requerir períodos largos, dependiendo estos de condiciones tales como las trayectorias de drenaje, permeabilidad del suelo, espesor de las capas, coeficientes de consolidación y grado de saturación.

El drenaje de un suelo hace que se reduzca la cantidad y/o presión en el agua intersticial, lo que suele permitir el aumento del peso volumétrico de un suelo y, de esta manera mejorar su resistencia. Se suelen utilizar drenes de arena verticales junto con la precarga, para provocar una rápida consolidación.

En general la resistencia mecánica es baja en suelos finos húmedos, finos con alto porcentaje de materia orgánica y granulares con gradación pobre. La evaluación a través de pruebas de resistencia al corte, de ensayos de carga repetida, de deformación y capacidad portante confirman con resultados, esta afirmación.

Posibilidades de incrementar la densidad en suelos no activos, tratamientos con cal, cemento, asfalto y aditivos químicos en otros suelos, mejoran notablemente la resistencia mecánica.

1.3.3 Compresibilidad. Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

En el caso de arcillas saturadas, si no se permite el drenaje y se aplican esfuerzos, éstos serán tomados por el agua. En el momento en que se permita el drenaje los esfuerzos son transmitidos gradualmente al esqueleto o estructura del suelo; este proceso produce una compresión gradual de dicha estructura, fenómeno conocido como consolidación.

Por otra parte, la compresibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes, dependiendo de algunos factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente, tiempo de aplicación de la carga una vez que se ha disipado la presión de poro en exceso de la hidrostática, naturaleza química del líquido intersticial, aunados estos factores a los originados por el muestreo, sensibilidad del suelo y aun la forma de ejecutar las pruebas que se utilizan para estudiar la consolidación.

Es un tanto obvio que al remodelar un suelo se modifica su compresibilidad, por lo que esta característica se puede modificar mediante procedimientos de compactación. Se ha encontrado que la humedad de compactación tiene una gran importancia en la compresibilidad de suelos compactados, pues si se compactan dos especímenes al mismo peso volumétrico pero uno en la rama seca de la curva de peso volumétrico contra humedad y el otro en la rama húmeda, se tendrá que para presiones de consolidación bajas el espécimen compactado del lado húmedo será más compresible, debido a que su estructura se encuentra más dispersa, pero para grandes presiones se tienen colapsos y reorientaciones en la

estructura del espécimen que se encuentra en el lado seco, lo cual provoca que éste sea ahora más compresible. Bajo presiones muy altas, ambas muestras llegan a la misma relación de vacíos ya que se llega a una orientación similar.

1.3.4 Durabilidad. Interpretada cualitativamente como la resistencia a la acción del intemperismo, de la erosión y del tránsito, es una propiedad cuya deficiencia es más notoria en los costos de mantenimiento que en las fallas estructurales.

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

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducir en forma eficiente al ataque a que estarán sujetos. En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aún una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien de orden cualitativo que cuantitativo. La durabilidad es, pues, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobrediseñar, lo cual a veces puede no ser lo más adecuado.

1.3.5 Permeabilidad. No es difícil modificar substancialmente la permeabilidad de deformaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección de lechadas de cemento o cal en materiales arcillosos, el uso de floculantes (por ejemplo polifosfatos) puede reducir la permeabilidad también significativamente; el uso de floculantes (muchas veces hidróxido de cal o yeso) aumenta correspondientemente el valor de la permeabilidad.

En los suelos la permeabilidad se plantea, en términos generales desde dos puntos de vista: como medio para disipar excesos de presión de poros o como medida para permitir el flujo de agua a través del suelo. Las presiones de poro excesivas originan disminución de la resistencia al corte lo que puede originar deslizamientos en explanaciones y el flujo de agua puede originar arrastre de partículas y tubificación.

Si se compacta un suelo arcilloso con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad en el suelo debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales; mientras más alta sea la humedad de compactación, se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado, ya que éste tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

El control de humedad de arcillas, la densificación, modificaciones granulométricas, inyecciones de lechadas de cemento o cal, aplicación de floculantes o defloculantes modifican la permeabilidad de los suelos.

Los métodos de estabilización cuyo objetivo central sea modificar la permeabilidad del suelo, no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica, en algunos casos puede resultar de efecto contrario.

1.4 PROCESOS GENERALES DE ESTABILIZACIÓN

Las formas clásicas más conocidas de estabilización de suelos se agrupan en los siguientes métodos:

1.4.1 Mecánico. La compactación es el proceso mecánico más usual de estabilización de suelos, siempre y cuando se garantice la calidad de los materiales y en suelos no activos, el aumento del peso volumétrico mejora las propiedades del suelo tratado.

1.4.2 Físico. Puede considerarse en este grupo la estabilización suelo-suelo que mediante la combinación o mezcla de dos o más suelos se consigue ajustar la granulometría, plasticidad y resistencia a especificaciones. También la colocación de elementos de refuerzo como geotextiles preparan al suelo para recibir cargas.

1.4.3 Físico –Químico. Aquí se agrupan los procesos que incluyen el uso de un cementante o agente cohesivo que al entrar en contacto con el suelo se produce algún tipo de reacción química, que ayudados por la compactación se logran las propiedades deseadas. Ejemplos: suelo –cemento, suelo-asfalto, suelo-cal.

1.4.4 Químico. Incluye los procesos en los cuales las reacciones químicas predominan para la obtención de las propiedades objetivo, aditivos como:

Dynasolo, aceite sulfonado, geoestab, son químicos que existen en el mercado como alternativas para la estabilización química.

1.5 ETAPAS GENERALES DE ESTUDIO PARA UN PROCESO DE ESTABILIZACIÓN

1.5.1 Identificación del Suelo. Estudio de las propiedades en estado natural y definición de aquellas que se quiere alcanzar.

1.5.2 Alternativas de Estabilización. Estudio detallado de laboratorio.

1.5.3 Procesos Constructivos. Conocimiento de procesos constructivos y de las posibilidades de adaptación o desarrollo del medio.

1.5.4 Economía. Consideraciones económicas para la ejecución de la obra.

1.6 SUELOS PROBLEMÁTICOS COMUNES EN COLOMBIA, RECOMENDACIONES GENERALES PARA SU IDENTIFICACIÓN Y MANEJO

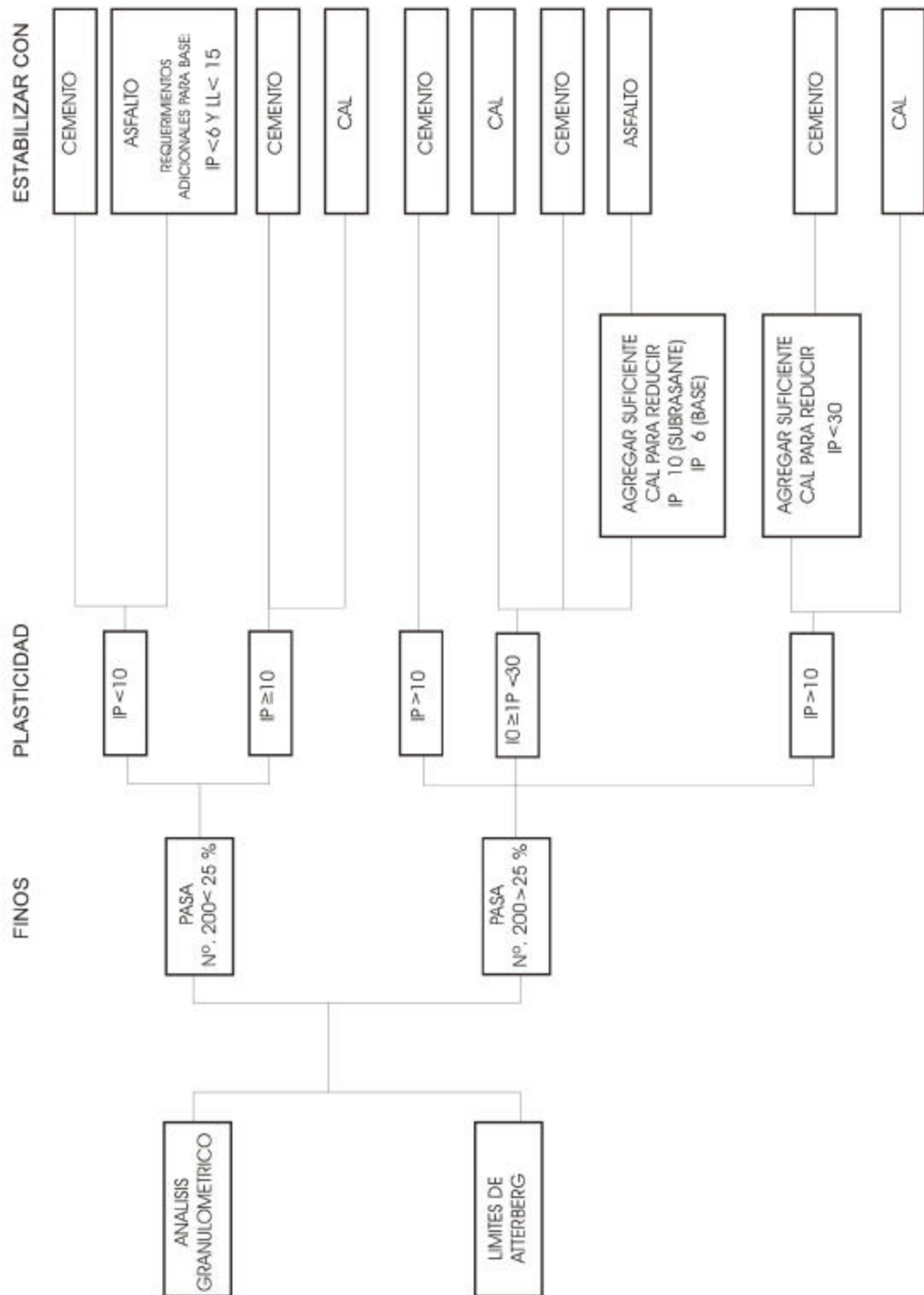
En Colombia existen diversidad de suelos con características físicas y mecánicas muy variables; dentro de esta gama, se han identificado algunos suelos de difícil manejo principalmente por sus características de deformabilidad, de baja resistencia, expansividad y sensibilidad, lo cual ocasiona problemas serios tanto en el proceso constructivo como en el comportamiento posterior de la estructura del pavimento.

Los suelos problemáticos más comunes detectados en Colombia son los suelos arcillosos blandos compresibles, los suelos orgánicos, los suelos volcánicos y los suelos expansivos.

Los suelos arcillosos blandos compresibles son aquellos depósitos comunes en zonas de alta precipitación, con deficiencias en el drenaje natural, que se caracterizan por sus altos contenidos de agua y bajas resistencias in situ, lo cual dificulta los procesos constructivos debido a que no garantizan el mínimo apoyo, ni para del equipo ni para las estructuras.

Los suelos orgánicos tipo turbas, están compuestos principalmente de tejidos vegetales en estados variables de descomposición; con una estructura fibrosa o

Figura 1.1 SELECCION PRELIMINAR DE LA ESTABILIZACIÓN



Fuente: Universidad del Cauca

amorfa, usualmente de color café oscuro a negro, olor orgánico y elevadas relaciones de vacíos. Por su deficiente estructura, son altamente consolidables y, en general, su comportamiento mecánico es el más crítico dentro de este grupo de suelos problemáticos.

Los suelos volcánicos se encuentran en diversos sitios de la región andina; provienen de eyectos volcánicos y tienen particularidades que los diferencian de otros suelos, como la susceptibilidad al remoldeo y altos contenidos de humedad.

Los suelos expansivos son aquellos suelos que muestran un cambio volumétrico importante cuando experimentan cambios de humedad, estos suelos generan problemas en estructuras como los pavimentos lo que amerita su precisa identificación y tratamiento.

Por lo anterior, es importante fijar algunos procedimientos estandarizados para identificarlos, evaluarlos y tratarlos en forma adecuada, con el fin de minimizar sus efectos perjudiciales en los pavimentos.

1.6.1 Suelos arcillosos blandos compresibles y suelos orgánicos. En Colombia, por las condiciones climáticas de zona tropical con elevadas humedades, altos porcentajes de saturación en el aire y niveles freáticos superficiales ocasionados por las características de drenaje natural, son frecuentes los depósitos de arcillas blandas altamente compresibles y de suelos orgánicos de deficientes características.

Si durante el proceso de exploración y muestreo, se detectan posibles depósitos de estos suelos, se recomienda definir con mayor exactitud la extensión del depósito y la compresibilidad del mismo. Para lograr el nivel de detalle requerido, se sugiere aumentar la frecuencia de los sondeos por lo menos al doble de la especificada para una exploración geotécnica normal para el diseño de pavimentos y muestrear con tubo Shelby para la evaluación precisa de la consistencia y compresibilidad del suelo, mediante los resultados de laboratorio, utilizando ensayos como el de resistencia a la compresión simple, límites del suelo, humedad natural y el cálculo del índice de liquidez.

Algunos valores que sirven para identificar este tipo de suelos se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Identificación de suelos blandos

Tipo de suelo	Resistencia compresión simple (kg/cm ²)	Límite líquido (%)	Índice de liquidez (IL)
Muy blando	< 0.25	> 100	> 1.0

FUENTE: Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras

El índice de liquidez se define con la siguiente relación

$$IL = (w_n - L_p) / (L_I - L_p)$$

w_n = Humedad natural

L_I = Límite líquido

L_p = Límite plástico

En el país, en pavimentos y en general en obras viales, se han utilizado diferentes procedimientos que han permitido superar los problemas ocasionados por estos tipos de suelos. Entre las soluciones más generalizadas, se destacan:

- En vías de menor orden se han empleado las empalizadas simples y dobles con rellenos de material de la zona poco plástico que proporcione un perfil adecuado para la posterior colocación de la capa de afirmado.
- El uso de geotextil no tejido de alta resistencia a la tensión con 70 a 80 cms de relleno de material granular con finos poco plásticos.
- En suelos orgánicos sedimentarios se ha utilizado una solución combinada de empalizada y geotextil con su respectivo relleno.

Las soluciones anteriores van acompañadas con la construcción de obras de drenajes y subdrenaje.

De acuerdo con las experiencias obtenidas en el país y la disponibilidad de métodos analíticos para la solución de estos problemas, lo más aconsejable es el manejo de geotextiles no tejidos con altas resistencias a la tensión.

También, dependiendo de la disponibilidad, se puede considerar la factibilidad de usar rellenos contruidos con escorias de fondo o con cenizas volantes o con mezclas de estos residuos con material granular. Los residuos mencionados, por su bajo peso unitario y considerable resistencia al corte, resultan adecuados para

la construcción de rellenos sobre suelos blandos compresibles. Esta alternativa puede ser en muchos casos, una solución económica que, además, contribuye a minimizar el impacto ambiental causado por la forma como ellos se disponen al medio ambiente y porque de esta manera también se disminuye la explotación masiva de canteras.

1.6.2 Suelos volcánicos. Existen en la región andina colombiana algunos suelos que presentan problemas en el proceso de explanación y compactación debido a sus características de humedad, de susceptibilidad al remoldeo y de cambio en sus propiedades durante el secado. Estos suelos son formados por la meteorización en el sitio de eyectos volcánico del cuaternario reciente y poseen algunas propiedades peculiares, las cuales los diferencian de los suelos cohesivos de origen sedimentario; entre ellas sobresalen los muy altos contenidos de humedad natural y las variaciones difícilmente explicables durante el lapso entre el muestreo y el ensayo. También poseen bajos pesos unitarios, elevadas relaciones de vacíos y humedades al límite líquido, las cuales retienen en épocas de verano y en zonas por encima del nivel freático manteniéndose con altos grados de saturación.

A pesar de las altas humedades y demás características mencionadas, su comportamiento mecánico es superior al esperado en otro suelo de condiciones de humedad y relación de vacíos similares, sus resistencias al corte drenadas y sin drenar y sus valores de CBR son de buena magnitud.

En consecuencia, en proyectos viales se puede cometer errores en la clasificación de estos suelos, si no se toman los cuidados necesarios para determinar los parámetros reales en el laboratorio y se podría llegar a diseños equivocados y por demás conservadores si se usan correlaciones entre los valores índice y el CBR o entre los índices y el módulo resiliente.

Para este tipo de suelos se recomienda evitar el presecado cuando se vayan a determinar los límites de consistencia para su clasificación.

También, con el fin de complementar su identificación y evaluar su sensibilidad, se recomienda la determinación del índice de Agregación, parámetro que se obtiene mediante la siguiente expresión:

I_a = Índice de Agregación

I_a = $E.A$ seco al horno/ $E. A$. Con humedad natural

$E.A$ = Equivalente de Arena

Un índice de agregación mayor de 2 indica un suelo moderado al cambio y un valor mayor 12 indica un suelo altamente variable.

Otro parámetro que ayuda a identificar suelos sensibles al remoldeo, como es el caso de los suelos volcánicos, es la SENSITIVIDAD (St) definida como:

$$St = q_u (\text{sin perturbar}) / q_u (\text{remoldeado})$$

q_u = Resistencia a la compresión simple

La resistencia remoldeada se obtiene remoldeando la muestra usada para obtener la resistencia sin perturbar, de tal forma que su densidad y contenido de agua sean prácticamente los mismos.

Se consideran suelos sensitivos aquellos que tienen un valor de sensibilidad superior a 4.0.

Para lograr el mejor desempeño de estos suelos se recomienda evitar el remoldeo y evaluar las condiciones originales del material in situ, con el fin de usarlas posteriormente como parámetros de diseño de la fundación.

En el caso de tener que construir capas con estos suelos, se recomienda el presecado del material en obra lo cual disminuye como ya se ha mencionado el índice de plasticidad del suelo lográndose de esta manera un incremento en el peso unitario seco y en general un mejor comportamiento mecánico.

1.6.3 Suelos expansivos

▪ **Generalidades.** En términos generales, se denominan suelos expansivos aquellos que muestran un cambio volumétrico significativo bajo la presencia de agua.

Durante procesos constructivos relacionados con vías terrestres, es factible encontrar algunos materiales rocosos expansivos como son las arcillolitas y suelos arcillosos o suelos residuales que se han formado de rocas existentes o sedimentos. Estos suelos arcillosos poseen características expansivas debido a las características de la roca que los origina (generalmente arcillolitas) y/o procesos de meteorización bajo el cual se han formado.

El grado de expansión de estos suelos depende de la cantidad de minerales arcillosos activos presentes en el material. Estos minerales arcillosos activos que influyen más en los cambios volumétricos se caracterizan por tener partículas de tamaños muy pequeños, grandes superficies específicas y cargas eléctricas desbalanceadas en la superficie.

El mineral arcilloso más activo es la montmorillonita y con ciertas condiciones la clorita y la vermiculita. Las caolinitas y las illitas no son consideradas activas, sin embargo, pueden contribuir a las propiedades expansivas de los suelos, si se encuentran en apreciable cantidad.

En Colombia son comunes los suelos expansivos en zonas semiáridas y en abundancia se han encontrado en Cali, en el norte del Valle, en Barranquilla, en el Huila y en el sur del Cauca, entre otros.

Además de las propiedades químicas y mineralógicas de estos materiales, hay algunas propiedades físicas que influyen o contribuyen a los cambios volumétricos y tienen aplicación a los materiales tanto en el sitio como en el laboratorio, entre ellas se pueden mencionar:

- El tamaño de las partículas, su superficie específica y su estructura como ya se ha mencionado.
- La densidad seca: entre mayor sea la densidad seca para un contenido de humedad constante, mayor es la presión de expansión que puede ejercer el suelo, debido a la concentración de materiales arcillosos por unidad de volumen y a la mayor interacción entre partículas.
- Las propiedades del agua de los poros: Fluidos con altas concentraciones de cationes, como las sales disueltas, tienden a minimizar los cambios volumétricos; sin embargo, el agua con poca concentración de iones hace más susceptible el suelo a los cambios volumétricos.
- El confinamiento: Los suelos con sobrecargas o cargas externas tienden a reducir la magnitud del cambio volumétrico; por esta razón, cuando los suelos expansivos están debajo de otro no expansivo se reducen las posibilidades de daños.
- El tiempo para que aparezca el primer cambio volumétrico y la forma como estos cambios continúan, depende de la permeabilidad del suelo. La expansión se inicia cuando hay contacto con el agua y continúa hasta cuando el suelo alcanza su condición de equilibrio.
- La concentración del material y la cantidad de discontinuidad, grietas y fisuras influyen en el cambio volumétrico de un material. Los materiales cementados como las arcillolitas poseen menos propiedades expansivas que aquellos materiales no cementados.
- El espesor del manto del suelo expansivo: Entre mayor es su espesor, mayor es el cambio potencial de volumen del suelo.

- La profundidad en el contenido de humedad: Generalmente, esta profundidad es mayor en los climas más cálidos y más secos.
- La capa vegetal: En zonas donde antes de construir las vías existía vegetación como árboles, arbustos y diversidad de pastos, la humedad era usada por éstos y al removerse la capa vegetal la humedad se acumula debajo de la estructura del pavimento propiciando los cambios volumétricos. En las ciudades, la vegetación con un sistema de raíces grandes localizada en la proximidad del pavimento produce cambios de humedad que inducen cambios diferenciales de volumen.
- Las características de drenaje superficial: Un drenaje superficial pobre permite la acumulación de humedad que se convierte en un suministro de agua permanente para subrasantes expansivas. Este problema puede evitarse si las cunetas se separan lo más que se pueda de la vía y asegurándose de que el gradiente sea el apropiado para que, el agua superficial pueda escurrir fácilmente. También es importante conocer la posible ascensión capilar del agua, ya que si se construyen estructuras de pavimentos dentro de esta zona de ascensión, la Subrasante expansiva tendrá suministro permanente de agua.
- Las fuentes de agua: Entre las fuentes de agua que pueden causar cambios volumétricos se mencionan: La infiltración de aguas lluvias a través de materiales porosos, grietas, taludes de los bordes, la migración de humedad proveniente del nivel freático, las variaciones de humedad causadas por el hombre como las actividades de irrigación y otras como la falta de un sistema adecuado de alcantarillado.
- **Identificación de suelos expansivos.** Con el fin de identificar las subrasantes expansivas, es importante realizar un trabajo de exploración de campo a lo largo de la ruta, el cual incluye toma de muestras para prueba de laboratorio. La identificación de suelos expansivos indicará cuál de los suelos es el que posee el mayor cambio potencial de volumen. De este estrato se deben obtener más muestras, con el fin de conocer o preceder el futuro comportamiento del suelo en el sitio.

La cantidad y la variación de los cambios volumétricos de la fundación es bastante compleja de determinar; sin embargo, para estimar en forma adecuada el comportamiento en el sitio, se han desarrollado numerosos procedimientos basados en aspectos tecnológicos importantes que se pueden considerar como el estado del arte actual en este campo.

Los procedimientos de identificación se refieren generalmente al potencial máximo de hinchamiento, basado en el conocimiento de la estructura del suelo y de sus

condiciones de carga; generalmente para este fin se utilizan ensayos de consolidación unidimensional.

La información obtenida de la exploración y muestreo de campo, combinada con la experiencia y criterio ingenieriles, son importantes para el diseño de estructuras de pavimentos de suelos expansivos.

- **Muestreo en suelos expansivos.** Los suelos expansivos tienen consistencias de varían de media a muy alta y es obvio que se pueden usar muchas técnicas de muestreo para obtener muestras alteradas e inalteradas.

Para pruebas que no requieren muestras inalteradas como gravedad específica, límites de consistencia y granulometrías, entre otras, el muestreo puede realizarse durante la realización de los sondeos preliminares.

Si se requiere mayor cantidad de muestra para pruebas de compactación, diseño de estabilización y otras, ese necesario realizar apiques o perforaciones mayores.

Para obtener muestras inalteradas en suelos expansivos se pueden usar diferentes tipos de muestreadores de pared delgada, sin uniones y preferiblemente de hacer inoxidable con diámetro variable entre 2 y 5 pulgadas, estos tubos de pared delgada pueden hincarse a presión, a golpes y por sistema de rotación.

- **Técnicas de ensayo para identificación de suelos expansivos.** Una vez realizado el muestreo se pueden utilizar diferentes métodos de ensayo a saber:

- **Métodos Indirectos:** Son indicadores de los cambios potenciales de volumen de un suelo. Se apoyan en las propiedades fisicoquímicas, físicas e índices y en los sistemas de clasificación de suelos comúnmente usados.
- **Métodos Directos:** Involucran medidas directas de cambios volumétricos en aparatos de tipo consolidómetro. Estas pruebas pueden medir hinchamiento o presión de hinchamiento, de acuerdo con las necesidades que se tenga en obra.
- **Métodos combinados:** Esta técnica combina los métodos directos y los indirectos mediante correlaciones con el fin de definir la probable gravedad del problema.

- **Métodos Indirectos.** Existe una gran variedad de técnicas para identificar suelos expansivos en forma indirecta, desafortunadamente en Colombia no se cuenta con experiencia suficiente en el manejo de algunas pruebas.

El primer paso para identificación de suelos expansivos es la observación visual del sitio, la apariencia de los suelos expansivos después de las desecaciones es distinta de otros tipos de suelos, las grietas de contracción de forma poligonal indican la posible presencia de minerales arcillosos expansivos. Mientras menores sean los polígonos mayor es la cantidad de arcilla presente. En algunos casos, cuando los suelos contienen mucha montmorillonita sódica, la desecación produce una apariencia similar a la de las palomitas de maíz, textura común en los campos de bentonita.

La identificación mediante algunas pruebas de laboratorio es la más exacta que se puede realizar. La técnica más importante es la de identificación de la cantidad de minerales arcillosos expandibles presentes en una muestra de suelo, mediante la difracción con rayos X (XRD), este es un método rápido y requiere poca cantidad de muestra.

Existen otros métodos para determinar la composición del suelo entre los cuales se pueden mencionar: El método de análisis térmico diferencial, el de radiación infrarroja, el de la dispersión dieléctrica y el de adsorción de diferentes tinturas.

La técnica más utilizada para la mayoría de los laboratorios para identificar suelos expansivos es la determinación de sus propiedades índices.

La experiencia ha demostrado que los cambios volumétricos se correlacionan razonablemente con el límite de contracción; sin embargo, su aplicación generalizada es de alguna forma controlada por la variación de un área a otra en relación con el cambio volumétrico. Lo anterior significa que en algunas áreas los cambios volumétricos del suelo son insignificantes para un intervalo de valores de propiedades índices, mientras que esos mismos valores son indicadores de problemas serios en otras áreas. Esto plantea la necesidad de definir bien los intervalos de valores para áreas de comportamiento similar y de complementar estos métodos con los otros de mayor exactitud.

- **Métodos Directos.** Estos métodos son los que miden en forma cuantitativa las características de cambios volumétricos de los suelos expansivos. Estas características son el hinchamiento y la presión de hinchamiento. Las cargas aplicadas y la rigidez de la estructura determinan en forma general, cuál de las características (deformación o esfuerzo) controla el diseño de una estructura específica. La medición de estas características se efectúa mediante el uso de procedimientos de ensayos del tipo consolidómetro. Si la deformación (hinchamiento) es la característica requerida, la muestra se carga con una

sobrecarga determinada según experiencia o condiciones de esfuerzos en el sitio, luego se inunda y se deja expandir hasta su condición de equilibrio. La relación entre la deformación medida y la altura inicial de la muestra es definida como porcentaje de expansión. Si se requiere conocer las características de esfuerzo (presión de expansión) la muestra se carga con una carga de fijación o sobrecarga predeterminada, luego se inunda y se aplica carga para mantener el volumen constante. Esta carga define la presión de expansión. Otro procedimiento alternativo que se ha utilizado para definir la presión de expansión es permitir que el suelo se expanda y luego aplicar una carga para volver la muestra a su altura original. Bajo estos procedimientos básicos se han desarrollado y estandarizado métodos de laboratorio que buscan medir hinchamiento y presión de expansión de muestras de suelo alteradas e inalteradas.

- **Métodos Combinados.** Estos métodos involucran la correlación de los métodos indirectos y directos para originar una mejor clasificación de acuerdo a la severidad de los cambios volumétricos.

La correlación que se utiliza más comúnmente es la de los límites de Atterberg (límite líquido, índice de plasticidad y límite de contracción), contenido de partículas coloidales, actividad y porcentaje de cambio volumétrico y presión de expansión utilizando el consolidómetro con diferentes condiciones de carga.

Esta técnica por lo general da origen a una categorización de acuerdo a la relativa severidad de los cambios volumétricos. No obstante, en algunos casos se han obtenido ecuaciones de predicción basadas en comparaciones estadísticas de las propiedades medidas.

Entre los métodos combinados, los más comunes y de aplicación en nuestro medio son los siguientes:

- **El método del Bureau of Reclamation (Holtz y Gibbs):** Este método correlaciona el contenido de partículas menores de 1 micra, con el índice de plasticidad y el límite de contracción. El porcentaje de cambio volumétrico se determina usando el consolidómetro, sobrecargando la muestra con una presión de 0.07 Kg/cm^2 y llevándola de un estado seco al aire a saturación. Las correlaciones obtenidas son las siguientes:

Cuadro 2. Método de Holtz y Gibbs

%Partículas <1u	IP	Lc %	Expansión probable	Grado de Expansión
< 15	< 18	> 15	< 10	Bajo
13-23	15-28	10-16	10-20	Medio
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
> 28	>35	< 11	> 30	Muy alto

FUENTE: Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras.

El porcentaje de partículas coloidales se mide mediante una prueba de hidrómetro lo que ha originado algunas críticas por no ser ésta prueba un ensayo de rutina en todos los laboratorios

- **Método Altmeyer:** Este método sugiere correlaciones entre el porcentaje de hinchamiento, el límite de contracción y la contracción lineal. El porcentaje de hinchamiento se mide en el consolidómetro con muestras compactadas al 90% de la densidad máxima obtenida en ensayo Proctor estándar y con una sobrecarga de 0.33 Kg/cm^2 . Los resultados de estas correlaciones son las siguientes.

Cuadro 3. Método de Altmeyer

Contracción Lineal %	Límite de Contracción %	Expansión Probable %	Grado de Expansión
< 5	> 12	< 5	No crítica
5-8	10-12	0.5 –1.5	Marginal
> 8	< 10	> 12	Crítica

FUENTE: Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras.

La mayor crítica que se ha hecho a este método es el hecho de efectuar la prueba sobre muestras remoldeadas.

- **Método Seed, Woodward and Lundgren:** Este método establece correlaciones entre el potencial de hinchamiento de un suelo, el tamaño de las partículas arcillosas y la actividad del suelo. El potencial de hinchamiento se determina en el consolidómetro con muestras remoldeadas compactas con humedad y densidad iguales a la humedad óptima y densidad máxima del Proctor estándar.

Cuadro 4. Método Seed, Woodward and Lungren

Potencial de Hinchamiento %	Grado de Expansión
0 –1.5	Bajo
1.5 –5	Medio
5-25	Alto
> 25	Muy alto

FUENTE: Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras.

La mayor crítica que se ha hecho a este método es que las correlaciones obtenidas se basan en pruebas realizadas sobre muestras de minerales arcillosos comerciales, los cuales no representan el comportamiento del suelo, debido a la composición tan variable de la mayoría de los suelos.

- **Cambio potencial de volumen de un suelo:** Este ensayo es conocido como el P.V.C. (Potencial volumen Change) definido por Lambe, el cual mide la presión de expansión que es capaz de generar un suelo al absorber agua y se restringe su cambio volumétrico bajo una presión vertical de 1 Ton/m^2 . El ensayo se realiza en un aparato estándar denominado Expansómetro de Lambe y bajo ciertas especificaciones relacionadas con la preparación de la muestra, contenidos de aguas iniciales, etc. El suelo se inunda con agua y se hacen lecturas de presión a los 5, 10, 15, 30, 45, 60 y 120 minutos; estos datos se grafican y se obtiene una curva asintótica, en la cual se determina la presión máxima de expansión. Esta presión está relacionada con el cambio potencial de volumen del suelo y dependiendo de su valor el suelo puede clasificar como suelo con cambio potencial de volumen: Nulo, Marginal, Crítico y muy crítico, valiéndose de un gráfico preestablecido propio de cada equipo.

Cuadro 5. Método de Lambe

Valor P.V.C.	Categoría
Menor de 2	No crítica
2 – 4	Marginal
4 – 6	Crítica
Mayor de 6	Muy Crítica

FUENTE: Montejo Fonseca Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras.

- **Métodos para minimizar los cambios volumétricos de la Subrasante.** En las prácticas recientes de diseño de pavimento sobre arcillas expansivas se han adoptado las siguientes alternativas para minimizar los cambios volumétricos de la Subrasante:

- **Reemplazo del material expansivo.** En el caso de reemplazar suelos expansivos por suelos no expansivos la Federal Highway Administration revisó la experiencia de varios estados en los Estados Unidos y encontró que esta técnica no es una panacea, al menos que todo o un suficiente espesor del manto expansivo pueda ser removido de tal forma que el hinchamiento sea mínimo o tolerable, desafortunadamente este, rara vez es el caso.

En el caso de optar por esta alternativa, el reemplazo se debe hacer con materiales impermeables para evitar el acceso de humedad al suelo expansivo que no ha sido removido.

- **Aplicación de sobrecargas.** En relación con la técnica de aplicar sobrecargas mayores que las presiones de expansión, se considera que es un método que puede prevenir la expansión; sin embargo, las cargas del pavimento son generalmente insuficientes para prevenir el problema y este método se ha generalizado más en el caso de estructuras grandes o aquellas que transmiten cargas altas.

- **Minimizar los cambios de humedad.** Teniendo en cuenta que el contenido de humedad es el principal factor que origina cambios de volúmenes en suelos expansivos, es obvio pensar que si el material se aísla de los cambios de humedad, el cambio de volumen puede reducirse o minimizarse. Teniendo en cuenta lo anterior las membranas impermeables se han convertido en un prometedor método para minimizar los cambios de humedad, limitando el acceso de agua.

En el caso de regiones áridas donde la humedad proviene de agua de infiltración, las membranas asfálticas y los pavimentos de espesor pleno son bastante efectivos. Sin embargo, en los casos donde hay humedad capilar o niveles freáticos muy altos, el sellado extensivo de la Subrasante expansiva mediante el uso de membranas no es efectivo. Los productos asfálticos parecen ser los materiales más ampliamente usados para membranas y para que éstas surtan buen efecto, el sellado debe ser completo a través de las cunetas e incluyendo parte de taludes naturales.

La minimización de los cambios en los contenidos de agua es, sin duda, un aspecto muy importante; por lo tanto, el drenaje debe manejarse adecuadamente. Si es pobre, las variaciones estacionales en la humedad de la Subrasante serán inevitables y producirán expansiones. Sin embargo, si las zanjas y drenajes son

muy profundos o cercanos a la estructura del pavimento ocurrirá estacionalmente o parcial desecación de bermas.

- **Prehumedecimiento del Suelo Expansivo.** El prehumedecimiento del suelo ha sido otro procedimiento utilizado para que los suelos expansivos logren un cambio volumétrico antes de colocar la estructura del pavimento. Dentro de estas técnicas, la más efectiva es la de inundar la Subrasante y para que con ella se obtengan buenos resultados se requiere la presencia de un extenso sistema de grietas y fisuras del suelo.

Las arcillas o rellenos relativamente impermeables no responden bien a esta técnica. El uso de perforaciones, drenes de arena y otros sistemas que faciliten la entrada de agua al suelo no han dado muy buenos resultados, debido a que con ellos se logra humedecer un espesor pequeño alrededor de las perforaciones, pero si además de ellos se usa la inundación, la combinación de estas técnicas puede ser algo benéfica en algunos casos.

Después de que el material ha sido inundado se recomienda estabilizar los primeros 15 o 20 cms. Del suelo con cal, en un ancho que se extienda de cuneta a cuneta, para dar lugar a una plataforma de trabajo y a un material suficientemente impermeable a cambios de humedad y prevenir la desecación de las áreas inundadas.

- **Estabilización de suelos expansivos.** Otra de las metodologías ampliamente utilizadas para prevenir cambios volumétricos es subrasantes expansivas es la estabilización de suelos y dentro de estas técnicas la que ha dado mejores resultados y ha sido utilizado con mayor frecuencia es la estabilización con cal. Además de las técnicas convencionales de mezclado en el sitio o mezclas en planta, otras técnicas como inyección de cal a través de perforaciones, inyección de lechadas de cal a presión y estabilizaciones con cal tipo Deep-plow se han utilizado con bastante éxito.

- **Estabilización con cal por método de perforaciones.** Esta técnica consiste básicamente en perforar huecos en la Subrasante y llenarlos con una lechada de cal o una mezcla de cal y arena. Una vez se llenan los huecos, la cal emigra o se difunde en el estrato de suelo iniciándose las reacciones suelo-cal.

- **Lechadas de cal inyectadas a presión.** Con el objeto de lograr una mayor distribución de la cal en las subrasantes expansivas, se ha desarrollado la técnica de inyecciones a presión. La técnica consiste en inyectar las lechadas con cal a presiones del orden de 14.0 Kg/cm^2 , dependiendo de las condiciones del suelo la

tubería de inyección de penetra en éste, aproximadamente, 30 cms y la lechada se prepara con 1 a 5 Kgs de cal por galón de agua, la inyección se hace hasta que el suelo rechace la lechada.

La experiencia ha demostrado que con este sistema se logran buenos resultados si el suelo expansivo tiene un extenso sistema de fisuras y grietas a través el cual la lechada pueda ser inyectada eficientemente. El mayor beneficio de este tipo de tratamiento se obtiene también por el prehumedecimiento producido, la barrera de humedad formada por el suelo-cal y las limitadas cantidades del suelo que ha reaccionado produciéndose la estabilización.

- **Estabilización con cal por el Método Deep-ploww:** La técnica consiste en remover un espesor aproximado de 30 cms antes de regar la cal, posteriormente se riega la cal necesaria para la estabilización, se mezcla la cal con el suelo con tres pasadas del plow hasta una profundidad de 60 cms., se esparce agua sobre la mezcla seca en la vía, se hace un mezclado final con un ripper profundo, se efectúa una compactación inicial del espesor de 60 cms. del material estabilizado en una sola capa, utilizando un equipo de compactación pata de cabra o un rodillo pata de cabra vibratorio, la compactación final se efectúa utilizando 6 pasadas con un rodillo de 70 toneladas de peso.

Esta técnica permite estabilizar con cal y compactar en forma adecuada espesores de 60 a90 cms.

Experiencias sobre la utilización de este método indican que se logran densidades superiores al 95% del AASHTO –99 y que la distribución de la cal es homogénea en los primeros 40 cms y menos en los restantes 20 cms.

- **Precauciones para estudios y diseños de pavimentos sobre suelos expansivos.** Deben tomarse las siguientes precauciones:

- Determinar la profundidad de la capa de arcilla problemática a intervalos suficientemente cortos como para hacer un buen perfil estratigráfico. La expansividad de la arcilla debe determinarse a lo largo de la longitud y la profundidad.

- Las propiedades índice pueden usarse para este propósito como una aproximación del potencial expansivo. La expansividad de unas pocas muestras seleccionadas puede chequearse mediante ensayos de PVC.

- Siempre que sea posible, deben adoptarse la construcción por etapas y permitir que la Subrasante permanezca sin ningún tratamiento por un período mínimo de un año. Podría también colocarse una cobertura granular no solo para conservar la humedad, sino también para actuar como filtro, se recomienda un material triturado de 19 mm a 20 mm como el filtro más aconsejable sobre suelos cohesivos.
- Debe especificarse requisitos de compactación y humedad relativos al Proctor Estándar en lugar del Modificado. A menor densidad y mayor humedad se reduce el potencial expansivo del suelo. La densidad baja no afecta apreciablemente la capacidad portante, por cuanto los valores de CBR con ambos esfuerzos compactivos son muy bajos. Los contenidos de agua por encima del óptimo no producen bajos CBR, por lo tanto, no es ninguna ventaja especificar altas compactaciones.
- La cubierta mínima sobre un suelo expansivo debe ser de 1 mt. Por ejemplo, una Subrasante no expansiva con CBR de 2 requiere una cobertura mínima de 60 cms, pero si llega a ser expansiva se requiere 50 cms adicionales de material seleccionado.
- No deben colocarse materiales muy gruesos directamente sobre un suelo expansivo, sino más bien colocar una capa de arena para prevenir el bombeo de los finos hacia las capas estructurales. La arena deberá satisfacer los requisitos del material de filtro.

2. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL

El empleo de la cal como material cementante se remonta a tiempos casi inmemoriales, una de las primeras aplicaciones que se conoce fue de la construcción de las pirámides de Chensi en el Tibet, cuya edad probable es de 5.000 años.

La cal en construcción de caminos, se cree que fue usada por primera vez por los romanos, en la Vía Apia, quizás hace 2.000 años.

En nuestro medio, el empleo de la cal como correctora de suelos para carreteras es de aplicación muy incipiente y puede decirse que prácticamente su uso se ha restringido a algunas investigaciones que el Laboratorio Central del MOP realizó no hace mas de 10 años sobre arcillas expansivas de la carretera Barranquilla–Cartagena.

Sobra decir que los resultados obtenidos demostraron la manera notable como la cal mejora las características de estos suelos como material de fundación de una obra vial.

La eficiencia de la cal en la reducción de la plasticidad es un hecho de fundamental importancia práctica, debido a que a diferencia de lo que ocurre con el cemento permite una adecuada pulverización de los suelos finos y húmedos, haciéndolos mas trabajables obteniendo así uniformidad en la mezcla final. Los mejores resultados se obtienen en suelos arcillosos, presentando una notable disminución de la plasticidad, mayor trabajabilidad en la construcción generando excelentes superficies de trabajo para la operación de los equipos, disminuyendo así los plazos de construcción apreciables.

Una de las acciones fundamentales de la cal en un suelo arcilloso o limo-arcilloso es la modificación de sus propiedades de plasticidad mediante la elevación del límite plástico que produce un aumento en la zona de estado sólido del suelo. Al flocular la partícula de arcilla por adición de cal, se produce una modificación en la textura del suelo, esto se puede verificar si se realiza un ensayo de sedimentación, en el que se puede apreciar una reducción de la fracción arcilla aparejada con un aumento de la proporción de limo y arena fina produciendo una disminución en la capacidad del suelo para sufrir perjudiciales cambios de volumen debido a la presencia de agua.

La forma más usual de la cal empleada en las estabilizaciones es la hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. Los carbonatos de calcio no tienen virtudes estabilizantes dignas de mención.

Para formar la cal estabilizante no es preciso partir de calizas puras sino que pueden tolerarse algunas impurezas. El cuadro 6 expresa los requisitos que suelen pedirse a la materia prima para formar cal estabilizante.

Cuadro 6. Requerimientos de las calizas y carbonatos de calcio naturales para formar cal estabilizante

Propiedad	Cal Viva (CaO)	Cal Hidratada Ca(OH) ₂
Óxidos de calcio Magnesio	No menos de 92%	No menos de 95%
Bióxido de carbono		
En el horno	No más de 3%	No más de 5%
Fuera del horno	No más de 10%	No más de 7%
Finura	-----	No más de 12% Retenido en la malla No.180

Fuente: Fernández Loaiza Carlos, mejoramiento y estabilización de suelos.

2.1 REACCIONES DE LA CAL Y EL SUELO.

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo. La primera es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo, lo que deprime su doble capa, a causa del incremento en la concentración de cationes en el agua; a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto PH de la cal.

La segunda reacción tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propiamente cementante; aunque no es completamente bien conocida, se atribuye a una interrelación entre los iones de calcio de la cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; de hecho, esta última reacción puede reforzarse añadiendo al suelo cenizas ricas en sílice. La reacción cementante tiene lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto la estabilización con cal difiere mucho de la estabilización con cemento.

En el cuadro 7 se presenta una información interesante con relación al efecto que tiene sobre la resistencia del suelo-cal obtenido, la inclusión de diversas cantidades de varios silicatos de sodio, las pruebas se hicieron con base en un material limoso.

Cuadro 7. Efecto de la inclusión de silicatos de sodio, como aditivo, en la resistencia de suelos estabilizados con cal, después de siete días de curado y un día de inmersión. Suelos limosos

Cal	Tipo de silicato	Cantidad de silicato	Resistencia a la compresión simple de la mezcla
%	-----	%	Kg/cm ²
2	Na ₃ HSiO ₄ . 5H ₂ O	0	8.9
2	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	2	8.4
2	Na ₃ HSiO ₄ . 5H ₂ O	4	7.0
4	Na ₃ HSiO ₄ . 5H ₂ O	0	9.0
4	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	2	14.4
4	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	4	16.2
6	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	0	7.4
6	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	2	16.9
6	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	4	20.0
6	Na ₃ HsiO ₄ . 5H ₂ O	5.3	16.7
6	Na ₂ SiO ₃ . 9H ₂ O	8	16.1
6	Na ₂ SiO ₃	3.4	15.7
6	Na ₂ SiO ₃ 5H ₂ O	6	16.8
6	Na ₄ SiO ₄	3.8	11.7

Fuente: Fernández Loaiza Carlos, mejoramiento y estabilización de suelos.

Puede observarse que para muy bajos contenidos de cal, la influencia del aditivo no es notable, pero con contenidos más altos de cal hidratada, sí pueden obtenerse ventajas significativas del uso de pequeñas cantidades de un aditivo que, por otra parte es muy fácil de manejar e incorporar.

La cal tiene poco efecto en suelos muy orgánicos o en suelos sin arcillas. Tiene su máximo efecto en las gravas arcillosas, en las que puede producir mezclas inclusive más resistentes que las que se obtendrían con cemento. Ha obtenido su utilización más frecuente en arcillas plásticas, a las que hace, adicionalmente, más trabajables y fáciles de compactar, razón por la que se usa frecuentemente como pretratamiento, anterior a una estabilización con cemento, además de los muchos casos en que se usa como estabilizante definitivo. El efecto de la cal en las arcillas es más rápido en las montmoriloníticas que en la caoliníticas y en las primeras, la cal logra resultados mucho más espectaculares en el aumento de resistencia y, sobre todo, en la disminución de plasticidad. En las arcillas, la cal tiene también un importante efecto en la consecución de estabilidad volumétrica ante el agua.

En la estabilización con cal debe evitarse el uso de aguas ácidas. El agua de mar se ha usado para compactar suelo-cal con frecuencia, pero debe evitarse allí donde se vaya a colocar un riego de sello asfáltico sobre la capa tratada, pues la cristalización de las sales desprenderá el sello. La cantidad de agua que se emplee está regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva pudiera requerirse cantidades adicionales de agua en suelos con menos de 50% de contenido natural de dicho elemento.

Las reacciones que ocurren entre el suelo y la cal en presencia de agua, pueden sintetizarse de la siguiente manera:

- Un intercambio iónico por medio del cual los iones de calcio son absorbidos por la arcilla, reduciéndose las fuerzas que mantienen la delgada película de agua absorbida alrededor de las partículas de arcilla. Como resultado de esto, se forman grumos, se reduce la plasticidad y el suelo se hace más manejable.
- Si la mezcla se compacta, se produce una reacción relativamente lenta entre el calcio y la sílice y la alúmina del suelo, formándose silicatos y aluminosilicatos monocálcicos. Esta acción, conocida como puzolánica, se ve favorecida por las altas temperaturas, lo que hace recomendable este tipo de estabilización sobre los suelos de las calurosas áreas tropicales.
- Una tercera reacción, mucho más lenta, consiste en la absorción del CO_2 atmosférico, el cual reacciona con la cal formando carbonatos de calcio y magnesio, los cuales son cementantes muy débiles. Esta es una reacción que debe evitarse y por lo tanto la cal y la mezcla deben protegerse del aire y de las lluvias cargadas de dióxido de carbono. La protección se consigue compactando y cubriendo la mezcla antes que comience la reacción.

2.2 MATERIALES USADOS EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO-CAL

2.2.1 Los suelos. Es muy amplia la variedad de suelos susceptibles de ser tratados con cal, en cuanto a materiales viales, todo tipo de suelo de Subrasante podrá estabilizarse con cal, si ésta desarrolla suficiente resistencia y estabilidad, y si el mejoramiento es factible lograrlo con una cantidad económica de cal.

La aptitud del tratamiento de un suelo se estudia en función de su granulometría, plasticidad, humedad, capacidad de compactación y contenido de materia orgánica. Tanto los suelos de granulometría fina (100% pasando tamiz No10)

como aquellos más gruesos con algún contenido de fino, puede mejorar sus características con incorporación de cal.

Suelos altamente granulares, con arcilla activa, cuyas variaciones volumétricas con el agua reducen la capacidad portante del mismo, han sido considerablemente mejorados mediante el tratamiento de cal.

Es más práctico utilizar la cal cuando el índice de plasticidad del suelo es mayor de 15 y el porcentaje del tamiz No 200 es mayor de 25. Sin embargo, la cal es poco efectiva en suelos altamente orgánicos o con pocas cantidades de arcilla capaz de reaccionar con la cal. Si el material estabilizante tiene un índice de plasticidad menor a 15 y ensayos de resistencia de laboratorio han demostrado que los valores de resistencia al corte no cumplen con las especificaciones de diseño, se puede en este caso usar una combinación de cal y cemento. La cal debe agregarse primero con el fin de reducir la plasticidad del suelo y al final del mezclado adicionar el cemento. El proceso de mezcla y de compactación usando estos dos materiales debe hacerse en un tiempo limitado de dos horas.

En general, los mejores resultados se han obtenido en las modificaciones de las características de la fracción arcillosa, traducida en las constantes físicas y capacidad portante.

2.2.2 La cal. Sabemos que la cal es un producto obtenido de la descomposición de rocas calizas por el calor, si éstas son puras y se calientan a temperaturas superiores a 900 °C, se obtiene la siguiente reacción:



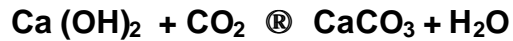
Es decir, el carbonato de calcio se descompone en óxido de calcio y anhídrido carbónico, que se elimina con los productos gaseosos de la combustión.

A este proceso sigue el de la apagada para producir el hidróxido de calcio mediante la reacción:



En este caso hay un proceso de pulverización con un considerablemente aumento de volumen. La avidez por agua de la cal viva es tan grande que absorbe vapor de agua de la atmósfera y de las sustancias orgánicas produciendo efectos caústicos.

La cal apagada en pasta tiene la propiedad de endurecer lentamente en el aire enlazando en los cuerpos sólidos, por lo cual se la emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado y se debe en principio a una desecación por evaporación del agua con la que forma la pasta y luego a una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire:



▪ **Cal viva.** La cal viva se utiliza con frecuencia en pretratamientos con suelos húmedos. El efecto básico de la cal es la constitución de silicatos de calcio que se forman por acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores. La cal se prepara generalmente calentando carbonatos de calcio, muchas veces bajo la forma de calizas naturales, hasta que pierde su bióxido de carbono y devienen en óxidos de calcio; el material resultante es la cal viva, muy inestable y ávida de agua, lo que hace difícil su manejo y almacenamiento, por lo que suele hidratarse de inmediato.

El óxido de calcio, llamado cal viva, es un producto sólido, de color blanco, amorfo aparentemente, con un peso específico entre 3.18 y 3.4. Es inestable, por tener gran avidez de agua, con la cual reacciona de la siguiente manera:

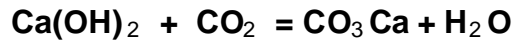


Produciéndose hidróxido de calcio Ca(OH)_2 o cal apagada, con desprendimiento de calor. En este caso hay un proceso de pulverización con aumento considerable de volumen. La avidez por el agua es tan grande que absorbe vapor de agua de la atmósfera y de las sustancias orgánicas produciendo efectos cáusticos. Tal circunstancia hace peligroso el manejo de cal viva, por cuanto puede producir quemaduras a los obreros si no se adoptan las precauciones necesarias, sin embargo, esta característica la hace ventajosa para el manejo de suelos arcillosos con alta humedad.

El hidróxido de calcio es un cuerpo sólido, blanco, amorfo, pulverulento, soluble parcialmente en el agua, a la que comunica un color blanco (agua de cal o lechada) y en mayor proporción forma una pasta fluida, untuosa al tacto que se llama cal apagada en pasta.

La cal apagada en pasta, tiene la propiedad de endurecer lentamente en el aire, enlazando fuertemente los cuerpos sólidos debido a lo cual se emplea como aglomerante.

Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado, y es debido primeramente a una desecación por evaporación del agua con la que forma la pasta y después a una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire:



Formándose carbonato cálcico y agua, reconstituyendo la caliza de que se partió.

Esta relación es muy lenta, verificándose en el aire seco, no así en el húmedo y menos dentro del agua, que la disuelve no sirviendo para obras hidráulicas.

- **Cal grasa.** La cal que se produce al calcinar piedras calizas con un contenido de arcilla inferior al 5% se llama cal grasa y al apagarse produce una pasta fina, blanca, untuosa, que aumenta mucho su volumen permaneciendo indefinidamente blanda en sitios húmedos, fuera del contacto con el aire.
- **Cal magra.** Son las que se obtienen de piedras calizas que aún con menos del 5% de arcilla, contienen magnesio en proporción superior al 10% (dolomitas), al añadirse agua se forma una pasta gris, poco trabada y desprende más calor que las cales grasas, al secarse en el aire se reducen a polvo y en el agua se deslíen y disuelven.
- **Cales hidráulicas.** Proceden de calcinación de rocas calizas con más del 5% de arcilla. Dan un producto que reúne las propiedades de las cales grasas y, además, la de fraguar en sitios húmedos y bajo el agua por formación de silicatos y aluminatos de calcio hidratados.

Se designa la cal aérea a la que se endurece al aire por proceso de desecación, cristalización y carbonatación.

Se denomina cal hidráulica a aquella cuyos compuestos hidraulizantes aseguran un endurecimiento bajo el agua.

En la estabilización de suelos con cal, el material más empleado es la cal hidráulica, cuya presentación en el comercio es en forma de polvo, envasada en bolsas de papel, facilita la manipulación y transporte. Ello no descarta la posibilidad de hacerlo a granel.

El uso de cal viva, que como hemos dicho también puede emplearse, está limitado en razón de los riesgos que presenta su manipulación.

En cuanto al empleo de piedra caliza en polvo, también intentado en algunos casos, ha demostrado que no es tan eficaz como la cal hidratada.

Cuadro 8. Clasificación de las cales IRAM 1516

Tipos	Clase	Presentación
Aérea	Cálcicas	Viva, en terrones Hidratada, en polvo Hidratada, en pasta
	Magnésicas	Viva, en terrones Hidratada, en polvo Hidratada, en pasta
Hidráulica		Viva, en terrones Hidratada, en polvo

Fuente: Fernández Loaiza Carlos, mejoramiento y estabilización de suelos.

2.3 CONTROL DE CALIDAD DE LA CAL

En defensa de ambas partes, productor y consumidor, es necesario controlar la calidad de la cal, al fin de evitar la compra y venta de material inerte.

La cal útil en la estabilización será aquella de origen o liberada que sea capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y propiedades, y provocando cementación al crearse productos cementantes hidráulicos; por lo cual toda cal en forma de carbonatos, sulfatos y otros compuestos deberá considerarse como inactiva, puesto que estos compuestos o los de adulteración son los que traen como consecuencia la pérdida de material útil para los fines propuestos.

Es entonces, de mucha importancia, el determinar qué porcentaje de una determinada cal comercial es útil desde el punto de vista vial, como único medio de controlar la variabilidad del producto, mas adelante se presenta un procedimiento rápido y sencillo para determinar la cal útil vial.

2.4 OBJETIVO DE LA ESTABILIZACIÓN CON CAL

El uso de la cal en la estabilización de suelos sigue el propósito general de esta clase de trabajo, es decir, mejorar las características naturales del suelo de modo

que aumente su capacidad para resistir los efectos inducidos por el tránsito (esfuerzo de corte) y los cambios volumétricos en diferentes condiciones de clima.

La cal se adapta perfectamente en la mayoría de los casos para lograr positivos resultados y su empleo puede ser conveniente por tratarse de un producto de costo moderado, de fácil manejo, así como de producción fácil y abundante.

La incorporación de cal mejora en muchos casos las características plásticas de los suelos, haciéndolos más friables y por sobre todo, aumentando considerablemente el valor de soporte, acción que se ha demostrado continua en función del tiempo.

Así mismo la cal elimina la susceptibilidad del agua de los suelos cohesivos reduciendo la tendencia al hinchamiento de los mismos.

Tales hechos han inducido el empleo de la cal en las construcciones viales hasta el extremo de constituir un material cuya aplicación va paulatinamente creciendo.

Uno de los campos donde la cal promete considerables beneficios es en la provisión de “superficies de trabajo” y subbases para caminos construidos sobre suelos arcillosos pesados. La lluvia y la acción del tránsito de obra actuando simultáneamente, pueden convertir un lugar en impasable, retardando considerablemente el trabajo. La arcilla húmeda puede ser eventualmente removida y reemplazada por material granular, pero a un costo elevado.

Un tratamiento con cal inmediatamente después de remover el suelo superficial puede resolver esta situación. La resistencia adicional conferida al suelo por la cal puede también aprovecharse para reducir el espesor de las bases superiores.

Así mismo, puede usarse cal en combinación con otros estabilizantes dando lugar a sistemas mixtos de estabilización. Por ejemplo, en la estabilización bituminosa, la cal influye en corregir las características plásticas de los suelos cohesivos con lo cual se mejora la acción posterior del betún. En otros casos de mezcla de suelo-betún la incorporación de cal facilita el secado o curado del suelo estabilizado.

La incorporación previa de cal puede ser ventajosa en el tratamiento de suelos plásticos (arcillas pesadas) con cemento. La cal reduce la plasticidad, facilita la posterior pulverización del suelo y, por consiguiente, el mezclado con el cemento Pórtland, así como reduce las cantidades de este material. El costo de la incorporación de cal está compensado por las ventajas señaladas.

2.5 INFLUENCIA DE LA CAL

2.5.1 Influencia de la cal en las características de los suelos. La cal generalmente produce una disminución en la densidad de los suelos, modifica la plasticidad, y aumenta la capacidad de soporte y resistencia al corte del material y reduce su hinchamiento.

La acción de la cal suele explicarse como efectuada por tres reacciones básicas:

La primera es la alteración de la película de agua que rodea los minerales de arcilla.

El segundo proceso es el de coagulación o floculación de las partículas del suelo, dado que la cantidad de cal ordinariamente empleada en las construcciones viales (del 4 al 10%) resulta en una concentración del ión de calcio mayor que la realmente necesaria.

El tercer proceso a través del cual la cal afecta el suelo, es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos. Los dos principales componentes que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice. Esta reacción es prolongada en la acción del tiempo y se manifiesta en una mayor resistencia si las mezclas de suelo-cal son curadas durante determinados lapsos de tiempo. Este hecho es conocido como “acción puzolánica”.

El grado al cual la cal reacciona con el suelo depende de ciertas variables tales como cantidad de cal, clase de suelo y período de tiempo del curado de la mezcla suelo-cal.

2.5.2 Influencia de la cal sobre las constantes físicas del suelo

- **Límite Plástico-Índice Plástico.** Una de las acciones fundamentales de la cal en un suelo arcilloso es la modificación de sus propiedades de plasticidad mediante la elevación del límite plástico que produce un aumento en la zona de estado sólido del suelo.

Para suelos con índices plásticos inferiores a 15, la cal incrementa el límite líquido en forma que el índice plástico experimenta un ligero incremento.

Para suelos más plásticos ($IP > 15$) la cal generalmente reduce el límite líquido y aumenta el límite plástico, traduciéndose en una disminución apreciable del índice plástico.

La cal disminuye mucho el índice de plasticidad de los suelos muy plásticos (montmorilonitas, bentonitas, etc.), tiene poca influencia en el índice plástico de los suelos de plasticidad media y puede aumentar el índice de plasticidad de los suelos finos menos plásticos.

- **Límite de Contracción.** Como se ha dicho, la adición de cal flocula las partículas arcillosas del suelo transformando su textura elemental, hecho que tiene una marcada influencia sobre el límite de contracción que experimenta el suelo tratado.

2.5.3 Influencia sobre la humedad. La cal, por regla general, y de acuerdo a su modo de acción se emplea para tratar suelos arcillosos y limo-arcillosos los cuales son difíciles de manejar y compactar debido a que a menudo se encuentran saturados.

La adición de cal al suelo produce una rápida disminución del agua existente, en especial cuando se emplea cal viva ya que por una parte el agua se combina químicamente, y por otra el calor de reacción liberado favorece la evaporación.

Además, durante el proceso de mezclado se produce una aireación que provoca extracción suplementaria de agua, de modo que es posible obtener sin dificultad la humedad y densidad de compactación óptimas.

2.5.4 Influencia sobre la textura elemental del suelo. Al flocular las partículas de arcillas por adición de cal, se produce una modificación de la textura elemental del suelo. Esto resulta evidente al efectuar un análisis mecánico por sedimentación, en el que se puede apreciar una reducción de la fracción arcilla, aumentando la proporción de partículas de limo y arena fina, esta última en menor medida.

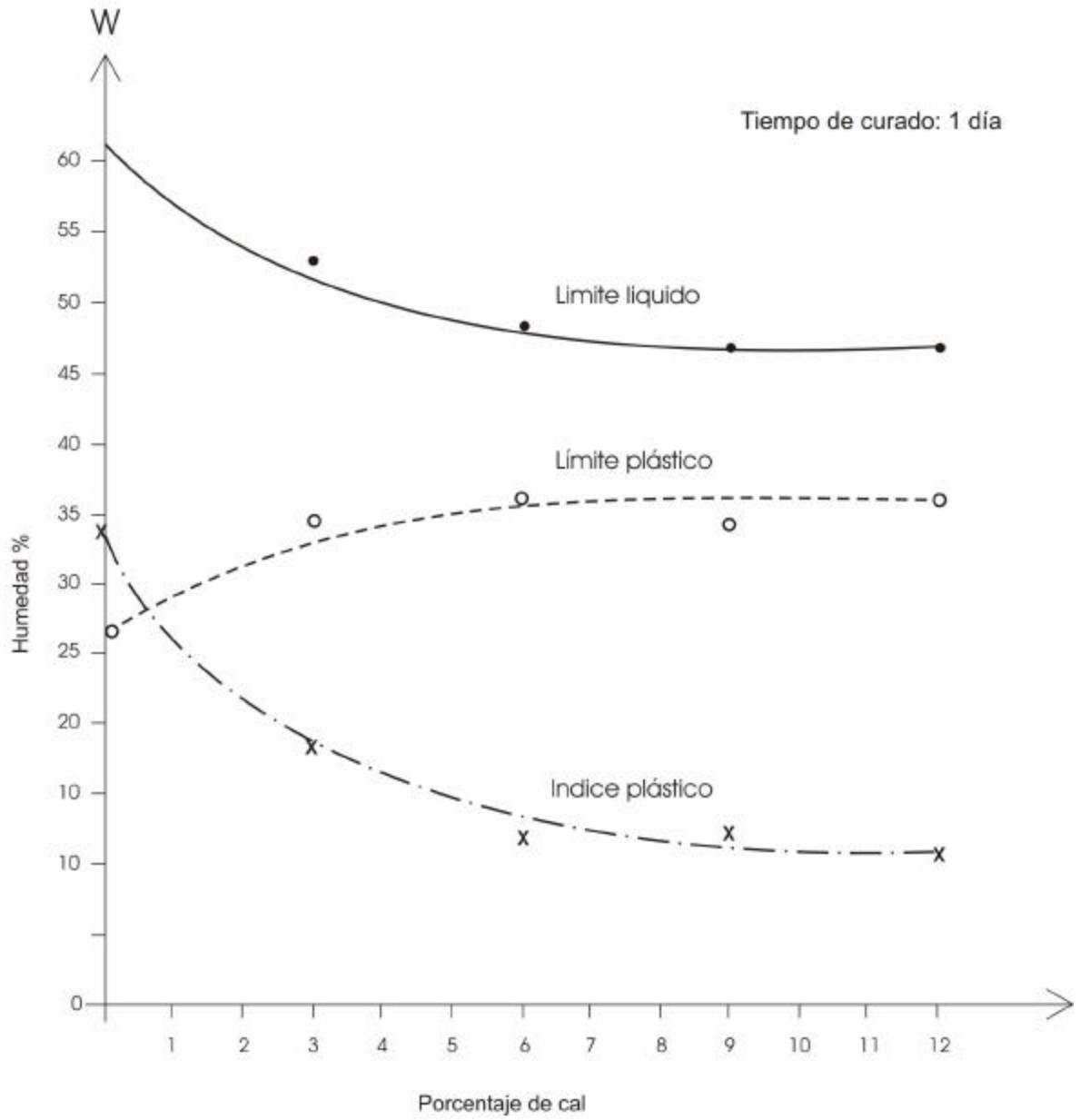
El cuadro 9 Indica los resultados obtenidos en un ensayo efectuado sobre un suelo de la provincia de Santa Fe, Argentina.

Cuadro 9. Fracciones según análisis mecánico

% Cal	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación
0	19.0	62.5	18.5	Limo
3	8.5	68.5	23.0	Limo

Fuente: Figueroa Sandoval Carlos, Estabilización con cal-Universidad del Cauca

Figura 2.1 Influencia de la cal sobre las constantes físicas de una arcilla de bayunca



Fuente: La Estabilización de Suelos con Cal en el Estado de Texas

El cuadro 10 indica el resultado de experiencia similares, efectuadas en Colombia con las arcillas de Galapa y Bayunca:

Cuadro 10. Fracciones según análisis mecánico

Procedencia	% Cal	Arcilla	Limo	Arena	Clasificación
Galapa	0	65.0	30.0	5.0	Arcilla
	8	7.0	88.0	5.0	Limo
Bayunca	0	30.0	60.0	10.0	Limo
	8	5.0	85.0	10.0	Limo

Fuente: Colombia ministerio de obras publicas, Investigación sobre las arcillas expansivas de Galapa y bayunca.

2.5.5 Influencia sobre los cambios volumétricos del suelo. El cambio que la adición de cal provoca en la estructura mineralógica de las arcillas, disminuye la plasticidad del suelo y modifica su textura, aumentando las fracciones limosa y arenosa, produciendo una evidente disminución de la capacidad del suelo para sufrir perjudicialmente cambios de volumen debido a la presencia del agua.

Los ensayos realizados sobre materiales de la carretera Barranquilla – Cartagena indicaron que la adición de un 8% de cal redujo el cambio volumétrico de la arcilla de Galapa de un 74% a un 5%, y el de la arcilla de Bayunca de 39% a 21%, para muestras compactadas a máxima densidad con la humedad óptima.

Los valores de la presión de expansión para los mismos casos se redujeron de 10 a 0.5 kg/cm² y de 4.1 a 0.3 kg/cm² respectivamente.

2.5.6 Influencia sobre la acidez del suelo. Cuando el agua circula a través de una masa de suelo, va produciéndose una solución que contiene vestigios de los elementos presentes en el suelo. Esta solución se encuentra muy dispersa, y al menos en parte, en estado de gran subdivisión, habiendo, además, una intensa adsorción de la solución al entrar en contacto con la gran superficie de los coloides del suelo.

Puesto que la arcilla tiene la propiedad de adsorber los cationes que se encuentran en la solución acuosa (es decir, los metales que forman las sales y el hidrógeno de los ácidos), el catión **Ca** que normalmente se encuentra en los suelos es desplazado fácilmente por el ión **H** que es más activo que el ión calcio.

La propiedad de las arcillas conocida como intercambio de bases, permite a su vez reemplazar el ión **H** por **Ca** debido a la acción de la masa. Por esto, al

incorporar la cal a un suelo, el ión hidrógeno es sustituido por el ión calcio, modificándose paulatinamente el carácter fisiológico del suelo que de ácido pasa a ser francamente alcalino.

La posibilidad de intercambio de bases en un suelo ya tratado, es menos probable que ocurra, pues se supone con todo fundamento, que las capas tratadas estarán a cubierto de las aguas pluviales y capilares.

El cuadro 11 muestra la modificación que en el PH del suelo produce la incorporación de cal en las arcillas de Galapa y Bayunca.

Cuadro 11. Influencia sobre el PH

Procedencia del suelo	% Cal	PH
Galapa	0	5.8
	8	10.1
Bayunca	0	5.9
	8	11.3

Fuente: Colombia ministerio de obras publicas, Investigación sobre las arcillas expansivas de Galapa y bayunca.

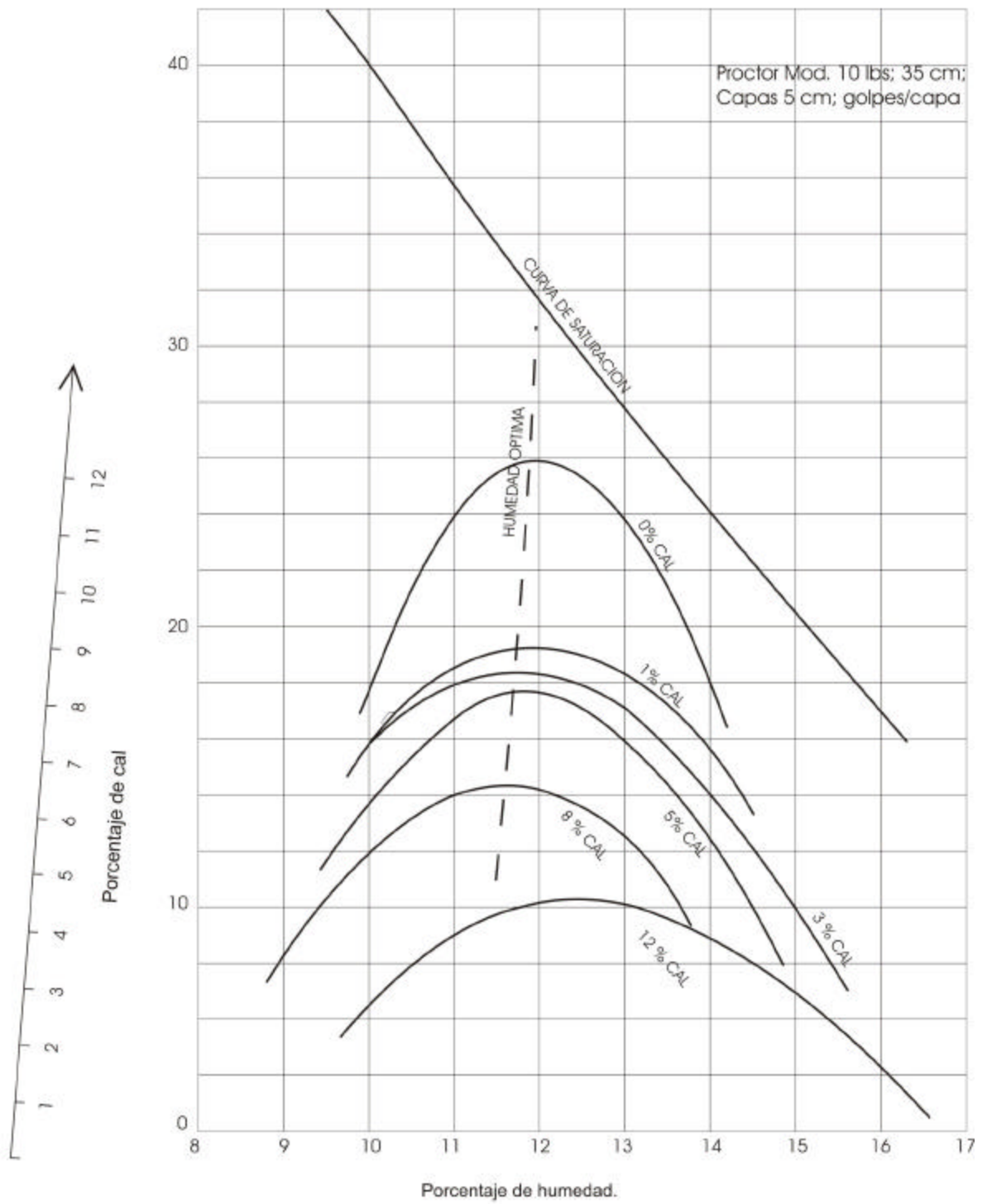
2.5.7 Influencia sobre la densidad. Al compactar una mezcla de suelo-cal se obtiene por lo general una densidad seca inferior a la correspondiente al suelo solo para las mismas condiciones de compactación, esta disminución puede alcanzar hasta un 5%.

La reducción de la densidad puede explicarse por el efecto de la cal sobre la textura del suelo.

En efecto, el hecho que la adición de cal incrementa la resistencia de un suelo mientras reduce su densidad es algo que no debe extrañar, puesto que en el caso de un material determinado, la resistencia generalmente aumenta con la densidad, pero cuando algún agente químico, tal como la cal, es agregado a un suelo natural, se forma un nuevo material el cual puede tener propiedades físicas y químicas totalmente diferentes que el original y por lo tanto, su propia densidad máxima puede tener mayor resistencia que el suelo no tratado, aunque éste se encuentre más densificado.

2.5.8 Influencia sobre la resistencia. Si bien la cal disminuye la densidad de compactación del suelo, no ocurre lo mismo con la capacidad resistente del

Figura 2.2 Curvas Humedad - Densidad Para una Grava Arcillosa Típica



Fuente: Universidad del Cauca

mismo, por lo contrario, la adición de cal produce un aumento de la resistencia del suelo, medida por cualquier tipo de ensayo.

El inmediato aumento de resistencia del suelo es causado por los cambios en las películas que rodean las partículas de arcilla también como una granulación de estas partículas.

El efecto debido a la acción cementante de la cal, no aparece inmediatamente después de la compactación, sino al cabo de cierto tiempo en que tiene lugar la iniciación del fraguado.

En la figura 4 se indica el efecto de la adición de cal sobre la resistencia a la compresión inconfiada de los suelos, se aprecia que para bajos contenidos de cal no logran desarrollarse resistencias significativas, puesto que no se logra la saturación de cal en el medio acuoso debido a que los suelos aún no han satisfecho su afinidad con la cal (punto de fijación de cal); Pero para porcentajes mayores, el suelo se satura de cal creando un medio alcalino, produciéndose así una marcada cementación, y, por consiguiente, un aumento de la resistencia.

Igualmente, el curado durante cierto período, produce un incremento de la resistencia de las probetas, el cual es particularmente importante a medida que se aumenta la temperatura

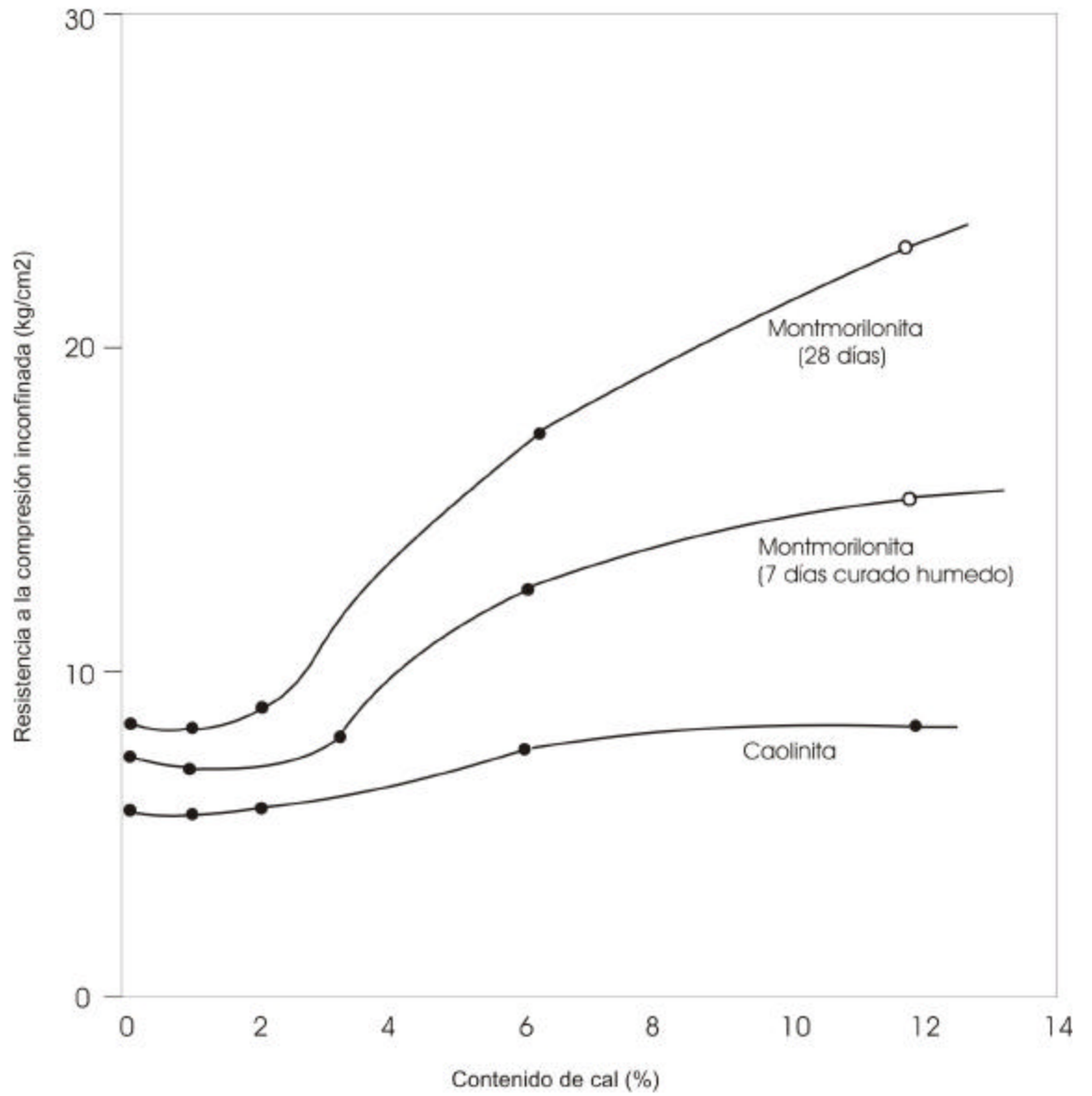
Los ensayos de capacidad de soporte de California (CBR) sobre suelos tratados con cal, muestran un pronunciado aumento de la estabilidad en relación con la del suelo sólo, en la mayoría de los casos.

La figura 6, resultado de ensayos realizados por el MOP sobre un suelo limoso de la carretera Puerto López - Puerto Gaitán, corrobora esta afirmación

El ensayo (CBR) se hace de acuerdo a la norma usual aplicada a los suelos, pudiendo introducir las siguientes variantes:

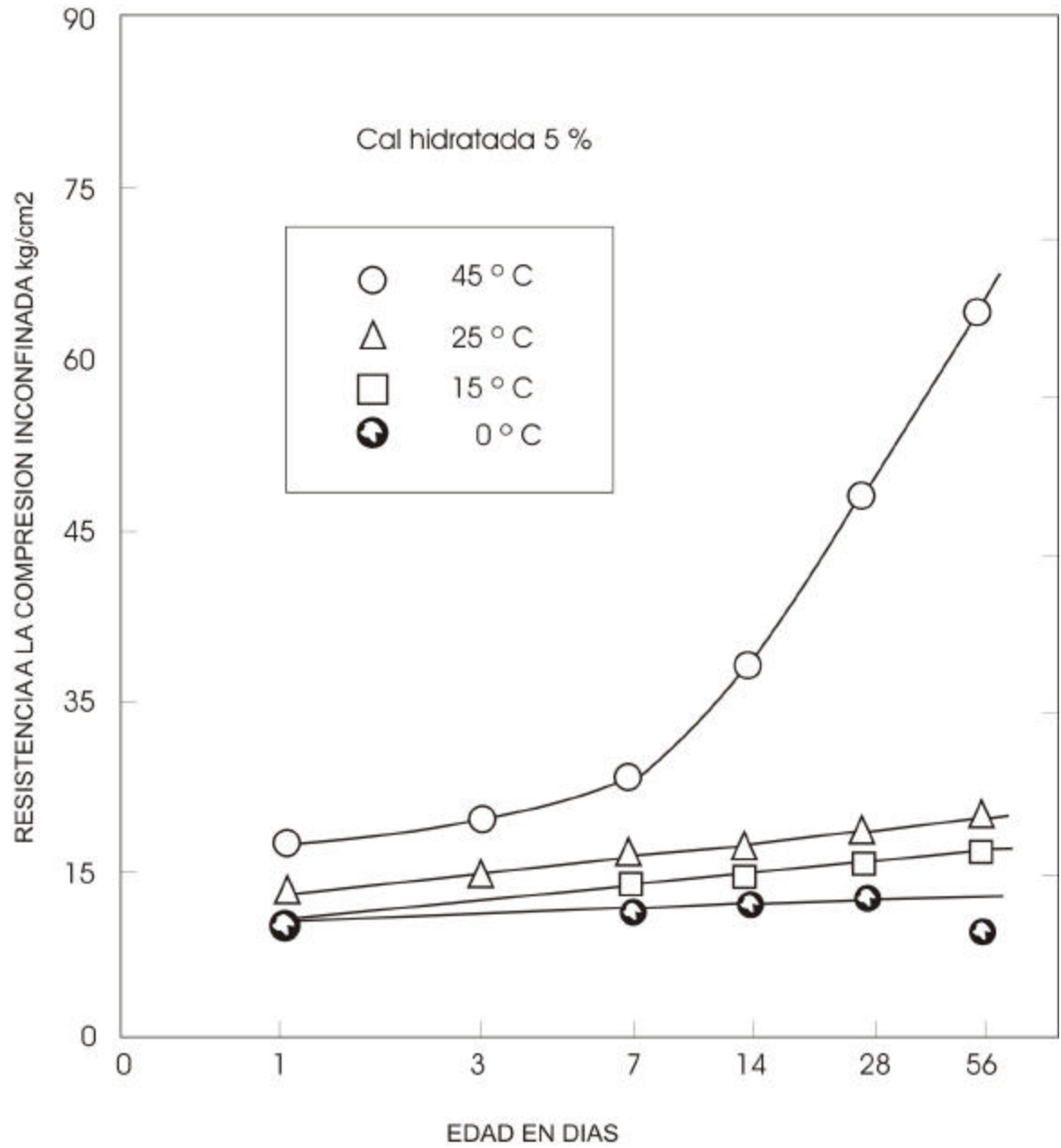
- Mezclar el suelo y la cal húmeda hasta el contenido óptimo y moldear la probeta enseguida.
- Después del mezclado y humedecido del suelo con cal, dejar la mezcla en reposo dos o cuatro horas, en cámara húmeda, después de lo cual se procede al moldeo de las probetas.
- Extender el período de reposo previo, a 24 horas procediendo después a moldear las probetas.

Figura 2.3 Efecto de la cal sobre la resistencia de los suelos



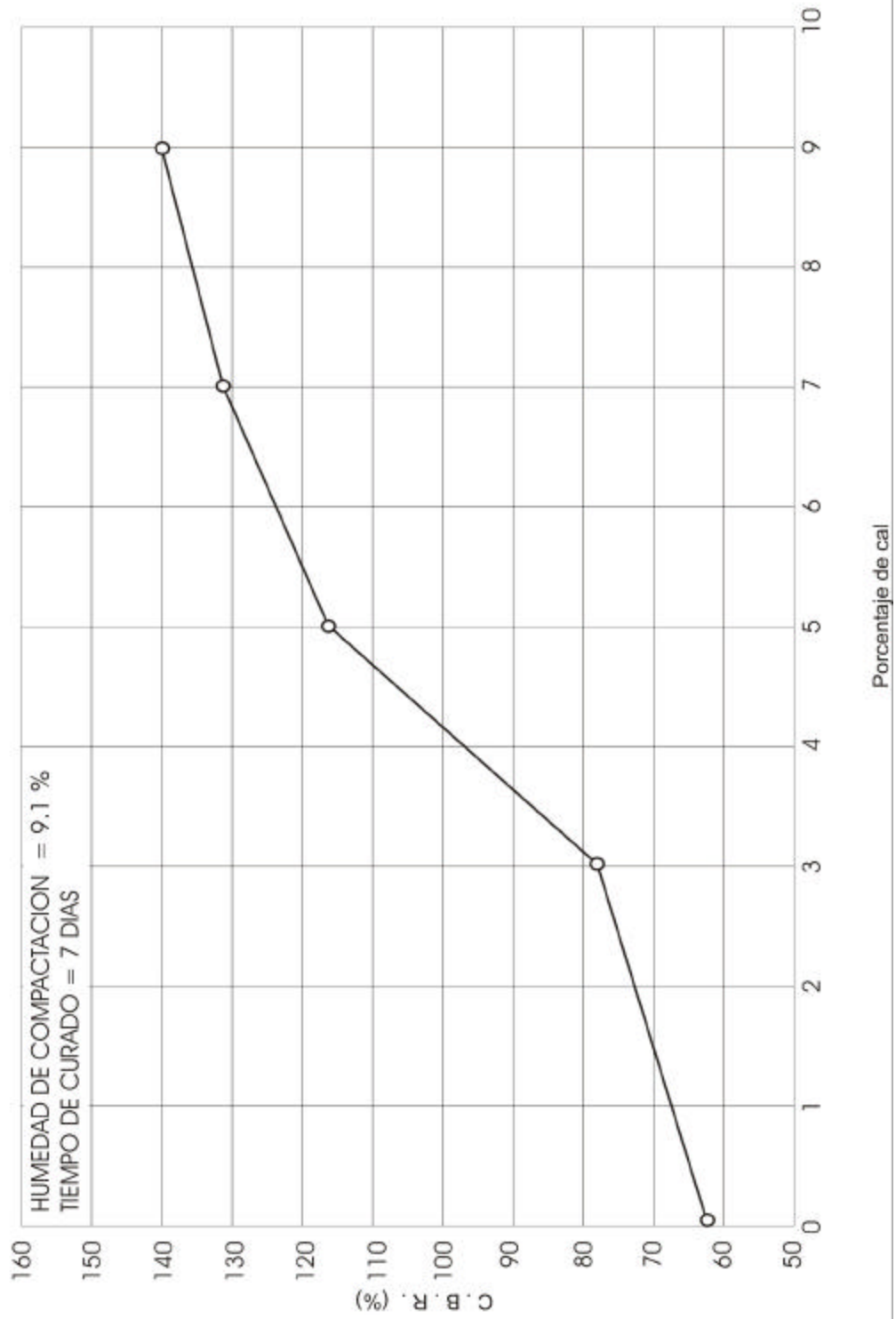
Fuente: Universidad del Cauca

Figura 2.4 Efectos del tiempo y la temperatura en la resistencia de una arcilla limosa estabilizada con cal



Fuente: Universidad del Cauca

Figura 2.5 Variación del C:B:R: con el porcentaje de cal para un suelo de la carretera Puerto López - Puerto Gaitán



Fuente: Universidad del Cauca

- Dejar la mezcla suelo-cal humedecida al óptimo, durante 7 días al aire. Pulverizar la masa, restablecer el contenido óptimo de agua y compactarlas.
- Dejar la mezcla suelo-cal en cámara húmeda durante 7 días, agregar el agua correspondiente al óptimo, compactar y ensayar según la norma.
- Con las probetas compactadas según lo dicho el numeral 2, dejarlas durante un período de curado de 7 días y luego moldearlas.

En estos casos el período de inmersión es el común de 4 días y luego se hace la penetración del pistón.

Las variantes resumidas en los puntos anteriores tratan de reproducir distintas situaciones que pueden ocurrir en la mezcla suelo-cal durante los trabajos en el terreno, desde el mezclado hasta la compactación.

Un ensayo de estabilidad interesante es el que se realiza sobre muestras de suelo-cal que después de haber sido penetradas se desmenuzan pasándolas por el tamiz No. 4, se dejan secar, se humedecen luego al óptimo de humedad y se remoldean nuevamente.

Al repetir el ensayo CBR sobre las muestras remoldeadas, se observan resultados inferiores en un 20% o más a los de las probetas originales. Esto es muy importante, pues al ensayar muestras provenientes de capas construidas, los resultados deben considerarse dentro de las reducciones señaladas, que dependerán del tiempo transcurrido desde la terminación de la capa.

2.6 DETERMINACIÓN DE LA CAL UTIL VIAL

El objeto de determinar la cal útil vial, es determinar la cal de origen o liberada que sea capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y propiedades, provocando cementación por crearse productos cementantes hidráulicos.

A continuación se explica un procedimiento rápido y sencillo para lograr determinar la cal útil vial:

Equipo

- Medidor de PH con electrodos de vidrio.
- Agitador magnético o varillas de vidrio
- Probetas de 100 ml.

- Soluciones de HCL y Na (OH) -1 onza
- Balanza de 5/100 gramos de precisión
- Vaso de precipitación.

Preparación de la Muestra

Tómese unos 2 kg. de cal de la bolsa a ensayar, y colóquese en un recipiente hermético donde se mezclan y homogenizan durante 2 minutos.

Las cantidades que luego se saquen de este recipiente para cada determinación posterior, se obtendrán cerrándolo cuidadosamente en cada oportunidad, para minimizar la contaminación atmosférica.

Procedimiento

1. Se pasan 3 gramos de cal de la porción separada como se indicó en el punto anterior; el material se coloca luego en un vaso de precipitados al que se agregan lentamente 150 cm³ de agua destilada con agitación simultánea.

Luego Se comienza la titulación con Hcl (1 onza) utilizando el medidor de PH, hasta alcanzar un PH de 9 aproximadamente, el ácido se proporciona mediante goteo rápido (unos 12 c.c. por minuto), y al llegar a él, esperar un minuto y continuar luego la titulación agregando solución a una velocidad de 0.1c.c esperando medio minuto y luego registrando la lectura, sucesivamente hasta llegar a un valor de PH = 7 que se mantenga por un minuto.

Este punto se toma como aquel en el que la adición de 1 o 2 gotas de solución producen un PH un poco menor a 7 luego de 1 minuto de su agregado. En este punto debe anotarse el consumo de ácido.

2. Luego se agrega el ácido por goteo rápido hasta llegar a PH = 2, se espera un minuto, y si el valor no se modifica, se anota el consumo acumulado.

Enseguida se comienza a titular la mezcla con solución, 1 onza de Na (OH) hasta obtener un PH= 7 , registrando el consumo de hidróxido.

Si : **n** es la cantidad de cm³ de solución hasta PH = 7
m es el total acumulado hasta PH = 2
L es la cantidad de solución alcalina para el retorno a PH=7

Para una muestra de 3 gramos se tiene:

$$\text{Ca (OH)}_2 \text{ \%} = \frac{0.037 \times n \times N_1 \times 100}{3} \quad \text{cal \u00fasil vial expresada como hidr\u00f3xido de calcio.}$$

$$\text{Ca CO}_3 \text{ \%} = \frac{0.050 \left((m-n) N_1 - LN_2 \right)}{3} \times 100 \quad \text{Materia inerte expresada como carbonatos.}$$

N_1 y N_2 son las normalidades de las soluciones \u00e1cida y b\u00e1sica respectivamente.

2.7 DISE\u00d1O DE LA MEZCLA SUELO-CAL

2.7.1 Selecci\u00f3n del porcentaje \u00f3ptimo. Desde el punto de vista t\u00e9cnico-econ\u00f3mico, la cantidad \u00f3ptima de cal para estabilizar un suelo es el menor porcentaje capaz de modificar las propiedades del suelo, hasta las condiciones requeridas por el proyecto.

Hablando en t\u00e9rminos generales, hay dos tipos de estabilizaci\u00f3n con cal que, pueden a su vez originar diversas combinaciones:

- La primera forma consiste en el tratamiento de materiales granulares, es decir, materiales de capacidad portante para bases, sobre los cuales va colocada la carpeta de desgaste. Dichos materiales, que generalmente contienen menos de 50% de material que pasa el tamiza 40, son tratados con porcentajes que var\u00edan de 2 a 4 % de cal \u00fasil vial, con relaci\u00f3n al peso del suelo seco.
- La otra forma general consiste en mejorar subrasantes de apoyo o materiales a servir como subbases. En general los suelos arcillosos se tratan con porcentajes de cal que var\u00edan entre 4 y 8%.

Debido principalmente a la acci\u00f3n de agentes clim\u00e1ticos, las mezclas de suelo-cal que son adecuadas para subbases, probablemente no sean igualmente satisfactoria si se usan como capa de base y si sobre ellas se colocan delgadas carpetas de desgaste.

Investigaciones realizadas en muchos lugares indican que la adici\u00f3n de un peque\u00f1o porcentaje de cal aumenta extraordinariamente la trabajabilidad en

suelos muy plásticos, aunque colabora muy poco en su resistencia. Cantidades adicionales por el contrario, aumentan su resistencia y su capacidad portante. Por lo tanto se comprueba que el suelo primero debe satisfacer su afinidad por la cal (fijación de cal), y que la relación cementante para producir el aumento de resistencia no comienza a producirse hasta que la afinidad es satisfecha.

En la compactación de probetas para curado y ensayo se aconseja llevar las mezclas a la humedad y densidad óptimas anticipadas durante la construcción.

Se sugiere, en general, modificar convenientemente los ensayos de densidad estándar, a fin de reproducir con exactitud la densidad que se espera obtener en la construcción.

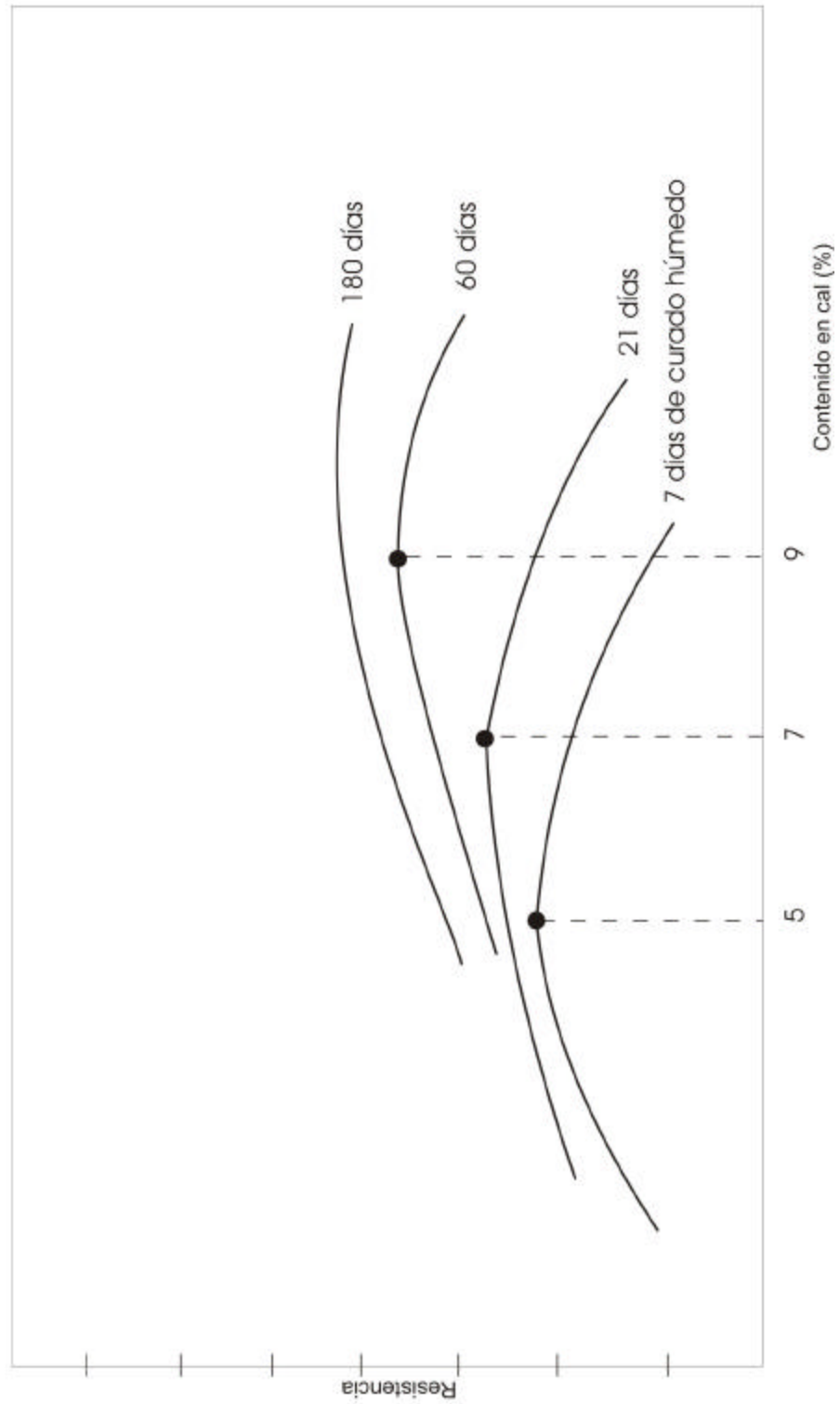
Cualquiera que sea el tipo de ensayo resistente empleado para dosificar, es posible graficar valores de resistencia en función del contenido de cal con diferentes condiciones de curado, tal se muestra en la figura 7, en la cual se puede observar que los contenidos óptimos varían de acuerdo a la edad. Sin embargo, si se analiza la resistencia a 180 días, se ve que de tal análisis no puede determinarse el porcentaje óptimo a emplear, de lo cual se concluye que si bien los ensayos de resistencia son necesarios para evaluar las condiciones de la mezcla, el criterio y la experiencia serán siempre los elementos esenciales para la selección de porcentajes de diseño.

Al elegir estos porcentajes hay que tener presente que durante la construcción se pierde siempre alguna cantidad por descarga, acción del viento o carbonatación, por lo se recomienda emplear en obra un pequeño porcentaje sobre el resultado de los ensayos (del orden del 0.5 1.0 %) lo cual se justifica aún más en el caso de que la mezcla deba ser remezclada y recompactada.

El aumento de resistencia con la temperatura debe estudiarse, ya que es posible obtener altas resistencias con el aumento de temperatura, pero para temperaturas normales el efecto es casi nulo.

2.7.2 Influencia de las condiciones de curado. Los resultados de muchas investigaciones han demostrado la enorme importancia de este aspecto del problema, en Texas por ejemplo, se hizo un experimento sobre suelos de diferentes características sometidos a diversos procesos de curado para probetas de 6 x 8 pulgadas moldeadas a humedad y densidad óptimas obtenidas con un esfuerzo equivalente a 2 veces el del Proctor Estándar, los resultados obtenidos se muestran en los cuadros 12 y 13.

Figura 2.6 Variación del tenor óptimo de cal de acuerdo a las condiciones de curado



Fuente: Universidad del Cauca

Cuadro 12. Influencia de las condiciones de curado

Probet No.	Constantes del suelo natural			% Cal	Densid. seca inicial	Curado (días)				Resist. comp. inconf.
	L.L	I.P	pasa 40			Atmósf. saturad.	Temp. de laborat.	Secado horno 60°c	Humedec capilar	
1	35	18	35	3	2.03	7	---	3	10	23.0
2	"	"	"	"	2.04	"	---	"	"	20.8
3	"	"	"	"	2.05	"	---	"	"	13.2
4	"	"	"	"	2.07	"	---	"	"	14.1
5	44	22	30	"	1.91	---	7	"	"	12.4
6	"	"	"	"	1.90	7	---	"	"	14.8
7	"	"	"	"	1.89	"	---	---	"	11.1
8	45	23	25	"	1.96	"	---	3	"	22.6
9	"	"	"	"	2.00	---	7	"	"	20.2
10	"	"	"	"	1.98	7	---	---	"	14.8
11	46	24	20	"	2.04	"	---	3	"	25.9
12	47	28	40	4	1.89	"	---	1	"	10.0
13	"	"	"	"	1.88	"	---	---	"	10.2
14	48	29	35	"	1.94	"	---	1	"	12.9
15	"	"	"	"	1.94	"	---	---	"	12.0
16	74	48	97	9	1.46	---	---	1/6	30	24.5
17	"	"	"	"	1.45	10	---	---	"	27.0
18	"	"	"	"	1.48	---	---	1/6	"	21.2
19	"	"	"	"	1.48	10	---	---	"	31.2
20	"	"	"	"	1.47	---	---	1/6	"	22.1
21	"	"	"	"	1.49	10	---	---	"	27.0
22	"	"	"	"	1.48	"	1/4	---	"	33.5

Fuente: Figueroa Sandoval Carlos, Estabilización con cal-Universidad del Cauca

Las probetas 1 y 2 fueron tomadas de la mezcla hecha en el camino antes de humedecida y compactada, mientras que las 3 y 4 se tomaron de la misma mezcla, pero de un caballete descartado al lado del camino, un día después de que la base había sido compactada y perfilada.

Los procedimientos de laboratorio fueron idénticos para ambos juegos de muestras, pero de los análisis de los resultados se deduce que la resistencia del material abandonado es definitivamente menor que la del material original, lo que trae como conclusión que tanto en el laboratorio como en el campo deben evitarse

prolongados intervalos de tiempo entre la mezcla y la compactación, a fin de evitar pérdidas de resistencia.

El resto del cuadro 12 muestra el efecto de los procedimientos de curado que siguen a la compactación. En todos los casos, el paso final fue el humedecimiento capilar que lleva el material a las condiciones más desfavorables a esperarse en el terreno.

Para gravas en las que la plasticidad de la fracción que pasa que pasa el tamiz No. 40 era menor a 30, se encontró que el mejor procedimiento era el curado húmedo, secado y luego la acción capilar colocando las probetas sobre piedras porosas con el nivel de agua media pulgada bajo la base. El peor procedimiento resultó ser el de curado húmedo sin ningún tipo de secado, tal como se aprecia en las probetas 7 y 10.

Para arcillas de alta plasticidad, aún un corto lapso de secado es perjudicial para la resistencia, como puede apreciarse en los resultados de las probetas 16, 18 y 20, si se inspeccionaran visualmente las probetas ensayadas podría deducirse que las mezclas suelo-cal que no desarrollan grietas de contracción se favorecen por el secado en el horno y viceversa.

Como resultado de todo lo anterior, el procedimiento de curado que resulta más recomendable es el siguiente:

- Mezclar la cal con el suelo seco al aire para preparar las probetas agregando luego la humedad de moldeo. No es conveniente un lapso superior a 2 horas entre el mezclado y el comienzo de compactación.
- Luego de compactadas, se someten a 7 días de curado húmedo, al cabo de los cuales los suelos que no desarrollen grietas se secan parcialmente a temperatura no mayor a 60°C.
- El curado se continúa finalmente con humedecimiento capilar en cámara húmeda durante un tiempo adecuado (generalmente 10 días si el IP de la mezcla es menor a 15 ó un número de días igual al IP, para índices plásticos mayores de 15).

El cuadro 13 muestra el efecto del tratamiento con cal, compactación y curado propuesto, sobre los resultados del ensayo de compresión inconfiada, y en él se ve que es evidente el efecto de la compactación, por lo cual hay que tener presente que una buena compactación ayudará en mucho a asegurar una adecuada resistencia, puesto que ésta se incrementa al aumentar la densidad.

Cuadro 13. Influencia de las condiciones de curado

Muestra No.	Constantes del suelo			% Cal	Resistencia a compresión inconfiada Kg/cm ²		
	L.L.	I.P.	Pasa 40		Compact. Equival. 1 Proctor	Compact. Equival. 1.5 Proctor	Compact. Equival. 2 Proctor
1	20	8	99	0	0.7		1.5
	17	NP	82	3	12.0	-----	20.7
2	29	10	100	0	0.8		3.6
	25	3	75	3	3.4	-----	5.8
3	35	18	30	0	1.1		1.4
	32	7	25	3	21.0	-----	24.8
4	44	23	40	0	1.2	1.3	1.9
	39	6	32	3	14.9	17.7	22.0
5	48	30	35	0	1.2	1.6	1.9
	38	11	16	4	8.0	10.6	12.3
	37	6	16	6	8.8	10.4	14.8
6	59	31	24	0	0.4		0.9
	46	12	21	3	6.4	-----	8.4
7	74	45	97	0	0.6	1.0	1.6
	52	10	81	6	14.8	23.1	32.6
	48	7	78	9	22.5	33.5	36.5

Fuente: Figueroa Sandoval Carlos, Estabilización con cal-Universidad del Cauca

2.7.3 Recomendaciones para la selección del porcentaje óptimo de cal.

Teniendo en cuenta que las condiciones ambientales dependen del lugar donde se esté construyendo determinada obra, y el equipo de ensayo que poseen la mayoría de nuestros laboratorios no son muy sofisticados, es necesario elaborar alguna especificación tentativa que se acomode a las condiciones del país.

En el caso de estabilización para bases y subbases, se recomienda compactar las mezclas con diferentes porcentajes de cal en el molde Proctor de $\varnothing = 6''$, con la humedad óptima y con una energía que oscile entre el doble de la del Proctor Estándar y una vez la del Proctor Modificado, de acuerdo a la densificación que se espera obtener en el terreno. Posteriormente las probetas compactadas se someterán al período de curado indicado anteriormente y por último se llevarán a rotura mediante compresión inconfiada.

Por ser de uso mucho más corriente, es factible pensar en el empleo del ensayo de C.B.R. como medio de dosificación, aprovechando las experiencias de que se dispone en otros países tropicales. Los resultados obtenidos indican que una

mezcla de suelo-cal aceptable para base es aquella que luego de compactada por el método normal y sometida a un curado de 3 días a temperatura constante y bajo saturación, presenta un C.B.R. superior a 180%.

Se considera así mismo que una mezcla con un C.B.R. mayor de 60% bajo las mismas condiciones de curado puede aceptarse como súbbase.

En el caso de mejoramiento de suelos de Subrasante, se recomienda emplear el método C.B.R., escogiendo como porcentaje óptimo de cal aquel que haga fácilmente trabajable al suelo y que, además, reduzca su expansión hasta límites tolerables, con el fin de evitar deformaciones en el pavimento a causa de cambios en el contenido de agua del suelo.

Un buen criterio para preparar mezclas para estudio en el laboratorio es dar al suelo 1% de cal por cada 10% de fracción fina, el cuadro 14 da los contenidos de cal que son usuales para diferentes tipos de suelos, sin embargo, debe manejarse esta información simplemente como norma de criterio, sin permitir que excluya en ningún caso las determinaciones del laboratorio correspondiente.

Cuadro 14. Efecto de la cal en la trabajabilidad de una arcilla

Malla	Porcentaje de grumos de suelo que pasan la malla	
	Arcilla sin tratar	Arcilla tratada con 5% de cal
2 "	80	83
1 "	40	50
1/2"	17	28
1/4"	7	19
1/8"	4	15

Fuente: Figueroa Sandoval Carlos, Estabilización con cal-Universidad del Cauca

2.7.4 Normas sobre los materiales. Todo material que desee estabilizarse para la construcción de una base deberá poseer antes de la estabilización, las siguientes características:

- Porcentaje que pasa el tamiz 40 = 40 % máximo
- Porcentaje que pasa el tamiz 200 = 25 % máximo
- Límite líquido = 35 máximo
- Índice plástico = 20 máximo
- C.B.R. del suelo solo = 50 % mínimo

Además, luego de 7 días de efectuada la mezcla el índice plástico deberá ser inferior a 6 y preferiblemente menor que 3.

No existen recomendaciones especiales sobre las características de los materiales de sùbase, pero es de esperarse que el buen juicio del ingeniero permita mayores tolerancias en las condiciones iniciales del suelo.

En lo que se refiere a los suelos de Subrasante que van a estabilizarse, deberán pulverizarse antes del mezclado y compactación definitivos de modo que cumplan el siguiente requisito de granulometrìa:

Cuadro 15. Requisitos granulométricos para suelos de subrasantes

Tamiz	% Pasa
½ "	100
No. 10	60

Fuente: Figueroa Sandoval Carlos, Estabilización con cal-Universidad del Cauca

2.8 PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

2.8.1 Generalidades. La calidad y el comportamiento de un suelo tratado con cal dependen fundamentalmente de la técnica empleada durante su construcción. De acuerdo con la forma de aplicar la cal, existen dos métodos constructivos:

- Aplicándola en polvo.
- Aplicándola en forma de lechada.

La escogencia de uno u otro método depende primordialmente de la humedad del suelo natural y de las molestias que la presencia de polvo pueda ocasionar en áreas habitadas.

La cal en polvo se aplica a granel con el empleo de distribuidores especiales o en bolsas, mientras que en forma de lechada se aplica con un tanque irrigador, preparando la lechada mediante la mezcla de una parte de cal con una y media partes de agua.

El proceso constructivo será diferente según se emplee la cal para mejorar subrasantes o para estabilizar capas de la estructura del pavimento.

2.8.2 Mejoramiento de subrasantes. El material a tratar debe escarificarse hasta la profundidad deseada, luego de lo cual se dispone en caballetes que más tarde se esparcirán sobre el terreno de fundación para la distribución de la cal.

La distribución del estabilizante sobre la capa suelta de suelo a estabilizar se hace generalmente a mano, vaciando las bolsas con estabilizantes que se han colocado a determinados intervalos en cierto número de filas de acuerdo al porcentaje a distribuir.

Los distribuidores mecánicos y a granel no son de uso muy popular en países en desarrollo, pues en dichos países la cal se suministra casi siempre en bolsas.

Se ha hablado ya de la mejora sustancial de las subrasantes altamente plásticas, pudiéndose usar éstas como parte de la estructura. Además, debido a la disminución de su plasticidad, las arcillas pueden pulverizarse fácilmente pese a que la acción de la cal es lenta, requiriéndose algunos días. Luego de incorporar la cal, el suelo debe desmenuzarse en un primer mezclado hasta un tamaño de terrones de unos 5 cm.

Para que la cal reaccione químicamente con el suelo es necesario que la humedad de mezclado sea la óptima o ligeramente superior.

Esta mezcla inicial puede hacerse con un sencillo equipo de mezclado, por ejemplo una rastra de discos, y deberá dejarse unos 2 o 3 días para que la cal ablande los terrones y facilite su pulverización. Si la capa estabilizada se conforma y perfila a su sección transversal típica compactándola suavemente con rodillo neumático, se obtendrá un sellado que protegerá la cal de su carbonatación por acción del aire, así como la entrada de agua que pueda alterar la capa de fundación. Durante este período la mezcla debe mantenerse en la humedad requerida mediante riegos periódicos.

Luego de cumplido este período de ablandamiento de los suelos plásticos, se procede al mezclado definitivo, el cual puede hacerse con Motoniveladora y arado agrícola de discos, con una máquina rotatoria de paso múltiple con una máquina rotatoria de paso sencillo.

Antes de la compactación, las mezcla de suelo-cal deben cumplir el requisito granulométrico indicado en el numeral 2.7.4

En el caso de suelos plásticos, el rendimiento de las máquinas rotativas es muy superior al del mezclado con Motoniveladora y equipo agrícola, pero de todas maneras las mezcladoras de eje longitudinal (pugmill) se prefieren a las Pulvimixer, pues estas últimas no distribuyen homogéneamente la cal en sentido transversal.

Por último, debe anotarse que visualmente es muy difícil apreciar la uniformidad de la mezcla por lo cual debe tenerse máximo cuidado en todas las operaciones constructivas desde la distribución de los materiales hasta el mezclado final.

El proceso siguiente al del mezclado es el de compactación, cuyo criterio es muy similar al de otros tipos de trabajos de compactación. La experiencia ha demostrado que la acción cementicia de la cal no comienza hasta que la capa estabilizada se ha compactado muy densamente, y, además, que la resistencia final es mayor si la compactación se efectúa poco tiempo después del mezclado uniforme. Para obtener resultados satisfactorios, es indispensable compactar a elevadas densidades en el tiempo adecuado y con un control estricto de la humedad.

La compactación de la mezcla se hace con los equipos normales de compactación que mejor se adapten a las características del suelo, los rodillos más empleados son la pata de cabra, el vibratorio y el neumático, empleándose este último de preferencia para la compactación final y cerrado de la capa. En general, si la capa del material suelto tiene espesor menor a 20 cm, la mezcla y la compactación se hacen en una sola operación; si el espesor es mayor, la operación se hace dividiendo en 2 capas iguales.

A continuación de la compactación se efectúa la nivelación, operación en la que la capa tratada debe quedar de acuerdo a los perfiles del proyecto.

Por último viene la etapa de curado que consiste en mantener las condiciones de humedad, mediante riegos periódicos durante una semana antes de colocar la capa siguiente, luego de la compactación, este curado impide la desecación superficial y evita la carbonatación de la cal que son causas que impiden que se desarrolle el endurecimiento de la mezcla.

Esta capa de suelo tratado, sirve adicionalmente como una sólida superficie de trabajo para la construcción de la capa superior del pavimento.

2.8.3 Estabilización de capas de pavimento. Si el material es proveniente de cantera, puede llevarse al camino y distribuirse sobre la subrasante preparada de modo que se obtenga un espesor uniforme, o bien puede formarse un gran caballete sobre el que se agrega la cal para el posterior mezclado con Pulvimixer o una mezcladora de eje longitudinal.

La compactación de estas capas debe ser inmediata y de modo que se obtenga elevados valores de densidad, aunque no conviene usar rodillos demasiados pesados, pues originan unas grietas peculiares que aumentan considerablemente de tamaño con el tiempo. Para la compactación de bases, los rodillos más aconsejables son el vibratorio y el neumático.

El proceso de curado húmedo de bases y subbases será de 7 días durante los cuales debe impedirse todo tipo de tránsito de vehículos o equipos de construcción. Si no es posible evitar el tránsito, se hace necesario construir la capa por carriles, caso en el que debe tenerse especial cuidado pues puede presentarse deficiencia de estabilizante en la vecindad de las juntas

El curado debe realizarse mediante periódicos riegos de agua o con una capa asfáltica de curado en cantidad inferior a la empleada para curar bases no tratadas, puesto que los materiales tratados con cal absorben muy poco asfalto. El curado asfáltico será obligatorio en las bases si la carpeta de desgaste no se coloca dentro de las 2 semanas siguientes, o si el tránsito va a circular antes de colocar la capa de desgaste.

2.8.4 Empleo de la cal en forma de lechada. Cuando se haga necesario aplicar la cal en forma de lechada, todo el proceso constructivo, excepto la distribución del estabilizante, es idéntico al ya mencionado.

La relación óptima entre el peso del agua y la cal para formar la lechada es de 1.5 a 1, esto, para evitar dificultades en la irrigación si la relación es menor, o evitar el asentamiento de la cal en el caso de relaciones mayores; así como disminuir el riesgo de humedecer el suelo en exceso, lo cual requeriría demasiada aireación para llegar al contenido óptimo de humedad para compactación.

Esta forma de distribución de la cal es particularmente aconsejable en zonas residenciales donde resulta un problema muy serio la presencia de polvo, así como zonas donde haya fuertes vientos que impidan la permanencia de la cal en polvo en la obra.

En los suelos en los que la humedad natural está cerca o por encima de la óptima es más aconsejable el empleo de cal en polvo porque así se requiere un menor proceso de ventilación.

Aún en suelos muy secos, la lechada se limita a un máximo de 4% de cal, puesto que a mayores porcentajes se requeriría más agua, lo que significa que el suelo contendrá humedad sobre la necesaria durante la mayor parte del tiempo.

2.8.5 Normas de seguridad. Con el fin de garantizar la seguridad del personal que intervenga en la construcción del estabilizado, es necesario cumplir algunos requisitos mínimos de prevención tanto cuando se emplee cal viva como cuando se emplee cal apagada.

Entre estas recomendaciones está el evitar que los obreros tengan vestiduras que favorezcan la transpiración, así como mantener cerradas las cabinas de los

vehículos para proteger a los conductores, y tener reservas de agua boricada para el lavado de los ojos.

2.9 OPERACIONES DE CONTROL Y ESPECIFICACIONES

2.9.1 Control. El interventor debe verificar que la capa estabilizada cumpla las condiciones del proyecto, comprobando ante todo el ancho y espesor de la capa construida mediante medidas cada 50 o 100 metros, promediando las medidas tomadas en una sección de 1.000 metros de longitud.

Otros controles necesarios son los del grado de compactación, precisión en la dosificación, variaciones en el contenido de agua y modificaciones en la capacidad de soporte del suelo original.

El control de compactación puede hacerse mediante diferentes ensayos, siendo el más conocido el del cono y la arena.

A fin de asegurar la correcta proporción de los materiales en la mezcla estabilizada deben tomarse ciertas precauciones en virtud de que por tratarse de un proceso irreversible, los errores que se cometan durante la construcción de una capa de suelo-cal son muy difíciles de corregir, llegando a veces a ser necesario rehacer todo el trabajo cuando las deficiencias son muy notables.

El método más sencillo de controlar la dosificación consiste en preparar una curva de calibración del suelo a tratar con diferentes porcentajes de cal útil y los valores correspondientes del PH que va variando al modificarse el porcentaje de cal. Las muestras tomadas del camino se tratan con un reactivo, midiéndose luego el PH con un medidor especial. El PH obtenido se lleva a la curva de calibración donde se determina el porcentaje de cal correspondiente. De este modo se comprueban las irregularidades y puede corregirse el proceso constructivo antes de adoptarlos definitivamente.

Al controlar las modificaciones de la capacidad de soporte del suelo original con el empleo de muestras obtenidas de las secciones construidas, debe recordarse lo mencionado anteriormente, con el fin de evitar interpretar erróneamente los resultados.

2.9.2 Especificaciones. Los diferentes organismos viales han publicado especificaciones generales para este tipo de trabajo, aunque la estabilización de suelos con cal no es muy popular en nuestro medio, el Ministerio de obras Públicas tiene la norma C 210 –63 en la que especifica los materiales, equipo, método constructivo, medición y forma de pago de capas estabilizadas con cal. En

el numeral 2.7.4 se mencionan algunas características que deben cumplir los suelos a estabilizar.

El tipo de cal a emplear debe cumplir con las normas establecidas por el organismo regulador de la calidad de dicho producto.

3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE LA ADICIÓN DE CEMENTO PORTLAND

3.1 GENERALIDADES

Recibe el nombre de suelo-cemento una mezcla íntima de suelo pulverizado, cemento Pórtland y agua, que compactada a una humedad óptima y una densidad máxima produce, luego de la hidratación del cemento, un material resistente y durable.

El primer tratamiento de suelo cemento que se realizó para una estructura de pavimento fue en el año de 1915 en Sarasota (Florida, U.S.A.) al utilizar una mezcla de arena, conchas y cemento.

En el año de 1917 Joseph Hay Amies, patenta el primer procedimiento de mezcla en suelo cemento llamándolo "Soloaimies" que consistió en mezclar proporciones variables de cemento tipo Pórtland, en 1920, se patentó el "Soil-crete", y desde entonces se fueron ensayando progresivamente mezclas con diferentes tipos de suelos.

El primer proyecto, técnicamente desarrollado de suelo cemento en vías se realizó en los Estados Unidos en la década de los 30. En Carolina del Sur se hicieron muchas investigaciones destacándose el tramo experimental de Johnsonville, construido en 1935, con una longitud de 2.4 km.

La Pórtland Cement Association (PCA) ha sido la principal entidad investigadora y promotora en el ámbito mundial de esta tecnología, como en las demás técnicas usadas en pavimentación, el desarrollo de los materiales tratados con cemento se hizo en su mayoría con base en la observación de obras existentes, mereciendo resaltarse el hecho de que han sido muy pocos los fracasos de vías construidas con este material.

El ensayo vial de la AASHO incluyó tramos de base tratados con cemento, y demostró que es un material que presenta un comportamiento mucho mejor que las bases granulares. Las bases ensayadas en el tramo se dosificaron con un 4% de cemento esperando una resistencia a la compresión a los 7 días de 45 kg/cm² y después de construidas obtuvieron 60 kg/cm².

El cemento es un material cohesionante natural que al reaccionar junto con el suelo pulverizado y agua, libera cal controlando así la plasticidad y trabajando como impermeabilizante.

Dentro de las estabilizaciones, el tratamiento con cemento es aplicable a casi todo tipo de suelo, su dosificación y el diseño de los espesores de las capas son sencillos, y se requieren equipos de construcción simples, además, se está usando en todo el mundo desde hace más de 55 años, con buenos resultados; por esto, se puede asegurar, que se trata de una tecnología madura, que proporciona materiales estables en el tiempo, cuyas propiedades no disminuyen con la edad sino que por el contrario aumentan, al progresar la reacción de hidratación del cemento.

3.2 ACCIÓN DEL CEMENTO EN LOS SUELOS

La acción estabilizadora del cemento consta de varias etapas, la primera de las cuales es la acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua. Debido a esto se forman masas de fibras minúsculas que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos. La solución formada por la mezcla cemento y agua reacciona con las partículas de suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrupar las partículas de suelo cargadas negativamente produciéndose su floculación por acción de la gravedad. Por último, si se compacta la mezcla, se produce una reacción de calcio con la sílice y alúmina de tamaños coloidales produciéndose complejos compuestos de silicatos y aluminatos que aumenta lentamente la resistencia de la mezcla con el tiempo, a esta acción se le llama puzolánica.

La reacción favorable suelo-cemento se ve muy impedida o nulificada cuando el suelo contiene materia orgánica, pues los ácidos orgánicos poseen gran afección por los iones de calcio que libera la reacción original del cemento y los captan, dificultando la acción aglutinante del propio cemento en los suelos gruesos o la estabilización de las partículas laminares en las arcillas. Por esta razón las especificaciones de casi todos los países exigen que el contenido de materia orgánica en suelo no sobrepase 1 a 2%, en peso, si ha de ser considerado apropiado para ser estabilizado con cemento. Es también nocivo la presencia de sulfatos u otras materias ávidas de agua por cuanto privan al cemento de la humedad necesaria para el cumplimiento de sus funciones, pero salvo estos dos inconvenientes, los demás suelos pueden ser tratados con cemento para mejorar su comportamiento mecánico, siendo la principal limitación la dificultad que puede presentarse para obtener un buen mezclado con las arcillas, motivo por el cual, en este caso, algunos recomiendan añadir al suelo previamente una pequeña cantidad de cal que facilite su manejo y pulverización y permita la posterior incorporación del cemento sin dificultad.

3.3 DIFERENTES MATERIALES PRODUCIDOS CON CEMENTO

Se suelen comparar los diferentes métodos de estabilización de suelos (mecánica, bituminosa, con aditivos, con cal, con cemento, etc), pero no se diferencian totalmente los materiales producidos ya que éstos se fundamentan en tecnologías diferentes; esto debe tenerse en cuenta al esperar resultados; cuando se refiere a cemento, se debe hablar de tratamiento que es un término mucho más amplio que una simple estabilización.

A continuación se da una breve descripción de los diferentes materiales que se pueden obtener mediante un tratamiento con cemento:

- **Suelo modificado con cemento.** Generalmente se utiliza para adaptar los materiales disponibles en el sitio para su uso en las capas inferiores. Requiere de adiciones bajas de cemento, menos del necesario para endurecer y sólo se mejoran algunas propiedades físicas o químicas del suelo como son: bajar el índice de plasticidad, disminuir los cambios de volumen, y aumentar la capacidad de soporte.
- **Suelo-cemento.** Es una mezcla fuertemente compactada de suelo pulverizado, cemento y agua, que con la hidratación del cemento gana resistencia y forma un material durable. Con este nombre se identifican muchos tratamientos, algunos de los cuales presentan mejores comportamientos que el mismo suelo cemento; por esto, en muchas ocasiones se desechan las soluciones con materiales tratados con cemento, perdiéndose así la posibilidad de emplear alternativas competitivas técnica y económicamente.
- **Suelo – cemento plástico.** Es una mezcla de suelo granular, cemento y agua suficiente para darle una consistencia fluida posibilitando su aplicación con llana. Se usa como capa de apoyo de tuberías y como revestimiento de cunetas.
- **Grava cemento o concreto pobre.** Tiene un contenido de cemento entre 130 y 180 kg/m³ y alcanza resistencias hasta de 70 kg/cm². Utiliza agregados de muy buena calidad, como si fueran para concreto, y se suele mezclar en planta. La relación agregado/ cemento es del orden de 18/1

3.3.1 Naturaleza de los materiales tratados con cemento. Los materiales tratados con cemento tienen características únicas, pero su comportamiento se basa en la mezcla de la tecnología del concreto y de la mecánica de suelos; dependiendo más de la primera en la medida en que se aumente el contenido de cemento y más de la segunda cuando éste se reduzca.

Durante los trabajos de construcción, como el contenido de cemento pocas veces supera el 14%, el material obtenido al realizar la mezcla, y mientras no se hidrate, tiene características similares a las de los suelos.

La diferencia básica de los materiales tratados con cemento con el concreto es que en éste, debido al alto contenido de cemento, la pasta llena los vacíos entre los agregados y los recubre totalmente, en los materiales tratados con cemento, la pasta de cemento rodea las partículas, y éstas forman cadenas que constituyen el mecanismo de transferencia de carga pero ésta no alcanza a llenar todos los vacíos.

Como en todos los materiales en que está involucrado el cemento, la resistencia aumenta con el tiempo, a medida que la reacción de hidratación del cemento se va produciendo. No hay correlaciones directas entre el PH, la densidad, la gradación, el área superficial y los Límites de Atterberg del suelo, con el comportamiento mecánico del material tratado. La relación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión de los materiales tratados con cemento está entre 1 a 2 y 1 a 4.

El suelo cemento, que fue el primer material utilizado, se desarrolló inicialmente con la idea de usarse en suelos malos y realizando la mezcla en el sitio; estos conceptos han cambiado y actualmente, con la utilización de materiales triturados y mezclamiento en planta, se obtienen materiales de excelentes propiedades Ingenieriles.

3.4 MATERIALES PARA SUELO CEMENTO

3.4.1 Suelos. Los suelos más fáciles de tratar son los granulares, pues requieren menor cantidad de cemento para alcanzar las resistencias requeridas. Dentro de éstos el material ideal es la arena, agregar material grueso a una arena hace aumentar el contenido de cemento.

Las condiciones ideales para tratar un suelo con éxito, son las siguientes:

- Tamaño máximo: 75 mm
- Contenido mínimo que pasa la malla No. 4, 55%
- Contenido máximo que pasa la malla de 0,002mm, 35%
- Límite líquido menor de 40
- Índice plástico menor de 10

Suelos con dificultades para el tratamiento con cemento. Existen algunos suelos que no se pueden tratar con cemento, o que requieren un tratamiento especial para obtener resultados positivos, como los que citamos a continuación:

- **Suelos con materia orgánica.** La materia orgánica es perjudicial para la estabilización con cemento debido a que contiene sustancias ávidas de agua, que impiden que el cemento se hidrate adecuadamente, al consumir el agua destinada inicialmente para este fin. La materia orgánica, además, capta los iones de calcio que se forman durante la reacción del cemento y perjudica su acción aglutinante.

En general el contenido de materia orgánica se limita al 2% como máximo. Cuando se tiene presencia de materia orgánica y un PH mayor que 5 se deben hacer estudios especiales para determinar la posibilidad de tratar el material con cemento. Para determinar el contenido de materia orgánica, aclarando que su presencia es fácil de advertir por su color y olor característicos, se utiliza el ensayo colorimétrico, la pérdida por ignición o la combustión húmeda.

- **Suelos con alto contenido de arcilla.** Tampoco permiten un tratamiento adecuado las arcillas demasiado plásticas, ya que su pulverización es muy difícil. Esto se ha solucionado en muchos casos (no siempre) mediante la adición de cal, con lo cual se hace más friable y por lo tanto se facilita su mezclado.

En Colombia se descarta la estabilización cuando el Índice de Plasticidad es mayor que 15. También se ha encontrado que se puede estabilizar económicamente si el Índice de Plasticidad es menor que 10. El Bureau of Reclamation (EEUU) exige retirar las bolas de arcilla mayores de 25,4 mm, y limita el contenido total de bolas que pasen esa malla al 10%. Según el bureau of Public Roads, se pueden estabilizar con cemento todos los suelos que tengan un Índice de Plasticidad menor que 18.

- **Suelos con sulfatos.** Los sulfatos presentes en los suelos afectan más el comportamiento en los suelos finos que en los gruesos, porque es más perjudicial la reacción sulfato-arcilla que la reacción sulfato-cemento. En los casos que se presenten problemas con sulfatos es preferible usar mayor cantidad de cemento que usar cemento Tipo V (resistente a los sulfatos). Los sulfatos disminuyen la cantidad de agua disponible para la hidratación del cemento, por lo cual esta reacción se retrasa.

- **Suelos arenosos.** Los suelos arenosos no reactivos han sido identificados en los últimos años como materiales que no permiten un tratamiento con cantidades normales de cemento.

Hay suelos que requieren trabajos previos para que el tratamiento con cemento sea económico, entre estos están:

- Los suelos con gradación uniforme por la gran cantidad de vacíos que presentan, pues el cemento debe actuar como llenante. Siempre es conveniente estudiar económicamente la posibilidad de mezclar con otros materiales, comparando con la disminución en el costo del cemento a utilizar.
- Las arcillas limo/arenosas se pueden tratar previamente con cal, agregando entre 2 y 3% del peso de la arcilla mínimo 24 horas antes de la estabilización con cemento, para lograr mayor eficiencia.

3.4.2 Cemento pórtland. El cemento es una de las materias primas de la construcción más popular y hoy en día más indispensable, es por excelencia el pegante más económico y versátil, además, sus propiedades físicas y mecánicas son aprovechadas en muchos usos.

La palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas.

En el medio de la construcción es reconocido que al mencionar la palabra cemento, implícitamente ésta se refiere al cemento Pórtland, o cemento a base de Pórtland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química, este proceso se llama hidratación, por lo cual también es llamado cemento hidráulico.

Este el producto que se obtiene de la pulverización del Clinker Pórtland con la adición de una o más formas de sulfato de Calcio; el cemento Pórtland esta compuesto principalmente por materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que se encuentran como arcilla o pizarra, también se utiliza marga, que es un material calcáreo-arcilloso; por yeso y en los últimos años la adición de material puzolánico que puede ser en estado natural (tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas), o material calcinado o de material artificial (Oxido de Silicio precipitado y cenizas volantes).

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1300 a 1400 °C, a la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como **Clinker**. El Clinker se enfría y a continuación, se adiciona un poco de yeso y en los últimos tiempos material puzolánico, se tritura hasta obtener un polvo fino, el producto comercial resultante es el **Cemento Pórtland**.

- **Clasificación del cemento Pórtland**

Cemento Pórtland tipo 1. Es el destinado a obras de hormigón en general, al que no se le exigen propiedades especiales.

Cemento Pórtland tipo 1 M. Es el destinado a obras de hormigón en general al que no se le exigen propiedades especiales pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.

Cemento Pórtland tipo 2. Es el destinado a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación.

Cemento Pórtland tipo 3. Es el que desarrolla altas resistencias iniciales.

Cemento Pórtland tipo 4. Es el que desarrolla bajo calor de hidratación.

Cemento Pórtland tipo 5. Es el que ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Cemento Pórtland blanco. Es el que se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca.

Cemento Pórtland con incorporadores de aire. Son aquellos a los que se les adiciona un material incorporador de aire durante la pulverización.

Cemento Pórtland tipo 1-A. Es el cemento Pórtland tipo 1, al cual se le adiciona un material incorporador de aire.

Cemento Pórtland tipo 1-M-A. Es el cemento Pórtland tipo 1-M, al cual se le adiciona un material incorporador de aire.

Cemento Pórtland tipo 2-A. Es el cemento Pórtland tipo 2, de moderado calor de hidratación al cual se le adiciona un material incorporador de aire.

Cemento Pórtland tipo 3-A. Es el cemento Pórtland tipo 3, de alta resistencia inicial, al cual se le adiciona un material incorporador de aire.

- **Propiedades del cemento Pórtland**

Peso específico. Varía ligeramente entre 2.90 y 3.2 gr/cm³ dependiendo básicamente de la cantidad y densidad del material puzolánico que se adicione, su uso principal radica en dosificación o control de mezclas.

Finura. La importancia de la finura radica en que a mayor finura, el cemento desarrolla mayor resistencia ya que entre más fino sea el cemento, mayor será la cantidad que se hidrata, pues la superficie total en contacto con el agua es mucho mayor.

Fraguado. Se refiere al paso de la mezcla del estado fluido o plástico al estado sólido, aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al aumento de resistencia de una pasta de cemento fraguado.

Resistencia del cemento. La resistencia del cemento depende de su adhesión a las partículas de los agregados y de la resistencia de los agregados.

3.5 VENTAJAS EN LA UTILIZACIÓN DE LA MEZCLA DE SUELO-CEMENTO

- **Ventaja para los pavimentos rígidos.** Al ser un material rígido y estable (durable) no se presenta el fenómeno del bombeo que tanto perjudica los pavimentos rígidos; proporciona un apoyo uniforme y fuerte, lo cual mejora la transferencia de cargas en las juntas. También brinda una plataforma de trabajo estable durante la construcción, estas ventajas tienen gran importancia sobre la durabilidad de los pavimentos rígidos.

- **Ventajas para los pavimentos flexibles.** En el mundo hay gran reconocimiento de las ventajas de las capas tratadas con cemento debajo de capas bituminosas, ya que por tener mayor rigidez que las capas granulares aumentan su vida útil.

El uso de materiales tratados con cemento en un pavimento flexible también puede eliminar el agrietamiento por fatiga, debido a que sus deflexiones bajo cargas son pequeñas. También disminuye la presión sobre la subrasante.

Por otra parte, se pueden reciclar los pavimentos flexibles que estén degradados mezclándolos con cemento, formando bases de suelo-cemento, la única condición para esto es que el asfalto haya perdido su flexibilidad hasta el punto de permitir la pulverización.

3.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO-CEMENTO

3.6.1 El tipo de suelo. Tiene Influencia principalmente por su composición química y su granulometría. Aunque la mayoría de los suelos pueden ser tratados con cemento con fines viales, la estabilización más económica se obtiene cuando el suelo no contiene partículas mayores de 7.5 cm o de un tercio del espesor de la capa tratada, menos del 50% de él pasa el tamiz de 0.074 mm, el límite líquido es inferior a 40 y el índice plástico menor a 18, además, en lo posible el suelo debe encontrarse libre de materia orgánica y de sulfatos.

Algunas arcillas muy plásticas, que se salen de los límites anteriores, han sido exitosamente tratadas con cemento después de un tratamiento previo con 2 o 3% del mismo cemento o de cal hidratada, con el que se logra dar al suelo mayor trabajabilidad y abatir la plasticidad. El tiempo de curado para este tratamiento previo no suele exceder de 2 o 3 días.

3.6.2 La cantidad de cemento. La dosificación de la mezcla de suelo-cemento es un aspecto realmente fundamental, por cuanto el cemento es el ingrediente más costoso y fijar su proporción determina la factibilidad técnica y económica de la estabilización, aparte de que las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee.

El diseño de la mezcla se hace en el laboratorio, siendo los ensayos que más se utilizan para ello, el de durabilidad, llamado también de humedecimiento y secado, y el de compresión simple sobre probetas compactadas bajo condiciones especificadas. Con relación al primero, las especificaciones fijan los valores aceptables en función del tipo de suelo que se estabilice, mientras con respecto al segundo, fueron los ingleses quienes establecieron el ensayo de compresión para el diseño, luego de encontrar que para su medio ambiente, una resistencia a la compresión de 17.5 kg/cm^2 sobre probetas curadas a 15°C durante 7 días, equivalía a los resultados del ensayo de humedecimiento y secado.

En Colombia no se ha encontrado una relación consistente entre los resultados de los dos ensayos y se fija un valor mínimo de 21 kg/cm^2 cuando se diseña de acuerdo con la compresión.

Por otra parte no debe olvidarse que la resistencia de una mezcla de suelo-cemento se ve favorecida por el aumento de temperatura, lo que es benéfico en áreas tropicales, donde las temperaturas de curado suelen ser mayores a las recomendadas por las normas utilizadas por países ubicados en zonas templadas.

Teniendo en cuenta que al fabricar mezclas de suelo-cemento, se llegan a obtener altas resistencias a la compresión (70 kg/cm^2 o más), las cuales no son convenientes por su susceptibilidad al agrietamiento, pues, finalmente se reflejan en la capa de rodadura; en la actualidad se fija un límite superior de 56 kg/cm^2 , valor hasta el cual se considera que el suelo-cemento presenta un comportamiento acorde con las exigencias de un pavimento flexible.

Si la mezcla de suelo-cemento se diseña mediante el ensayo de humedecimiento secado (norma de ensayo INVE-807), el contenido de cemento debe ser tal, que la pérdida de peso de la mezcla compactada, al ser sometida al ensayo de durabilidad (humedecimiento-secado), no supere los siguientes límites de acuerdo con la clasificación que presente el suelo a estabilizar.

Cuadro 16. Pérdidas admisibles en el ensayo de durabilidad

Suelo por estabilizar	Pérdida máxima (%)
A-1; A-2-4; A-2-5; A3	14
A-2-6; A-2-7; A-4; A5	10
A6; A-7	7

Fuente: Instituto colombiano de productores de cemento, dosificación de mezclas de suelo-cemento

3.6.3 La cantidad de agua que se agrega a la mezcla. La incidencia de la humedad en la calidad de la mezcla tiene su mayor importancia durante la compactación. Una buena compactación, debe obtenerse para una alta densidad seca y ella sólo se obtiene cuando el suelo tiene una humedad óptima. En los diseños del suelo cemento se usa generalmente como ensayo de control el Proctor normal en lugar del modificado, por cuanto aquel tiene una humedad óptima mayor, que proporciona la cantidad de agua adecuada para la correcta hidratación del cemento. Además, como la densidad máxima del ensayo normal es menor, se evita el riesgo de obtener compactaciones muy elevadas y resistencias demasiadas altas que pueden resultar inconvenientes.

3.6.4 La compactación de la mezcla. Una mezcla satisfactoria de suelo-cemento sólo puede obtenerse si se compacta adecuadamente. Experimentos han demostrado que una disminución de 1.5 kg/m^3 en la densidad, producirá una disminución de 1.5 a 3 kg/cm^2 en la resistencia a la compresión.

Las demoras entre las mezclas y la compactación producen también una disminución de la densidad que puede alcanzarse al compactar la mezcla y por lo tanto de su resistencia, por este motivo es conveniente no dejar pasar mas de 2 horas entre la mezcla y la compactación.

Debe tenerse presente que las mezclas de laboratorio presentan una resistencia mucho mayor que las que se elaboran en la obra. Experimentos han demostrado valores de resistencia a la compresión del orden de 40 a 60% para mezclas elaboradas con equipo agrícola y de 60 a 80 % al emplear un mezclador de tipo rotativo.

3.6.5 Curado de la mezcla compactada. La resistencia a la compresión de la mezcla de suelo-cemento, también se ve influenciada por el tiempo de curado tal como ocurre en el concreto. Experiencias de laboratorio indican que ésta aumenta cuando crece el tiempo de curado a que se somete la mezcla después de ser compactada.

3.7 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

Los métodos de dosificación aquí descritos han sido desarrollados en los Estados Unidos, pero su aplicabilidad en condiciones tropicales se han probado, extensa y exitosamente en países como Brasil y Venezuela. En Colombia existe ya alguna experiencia al respecto, tanto en carreteras como en vías urbanas, aeropuertos y pisos industriales.

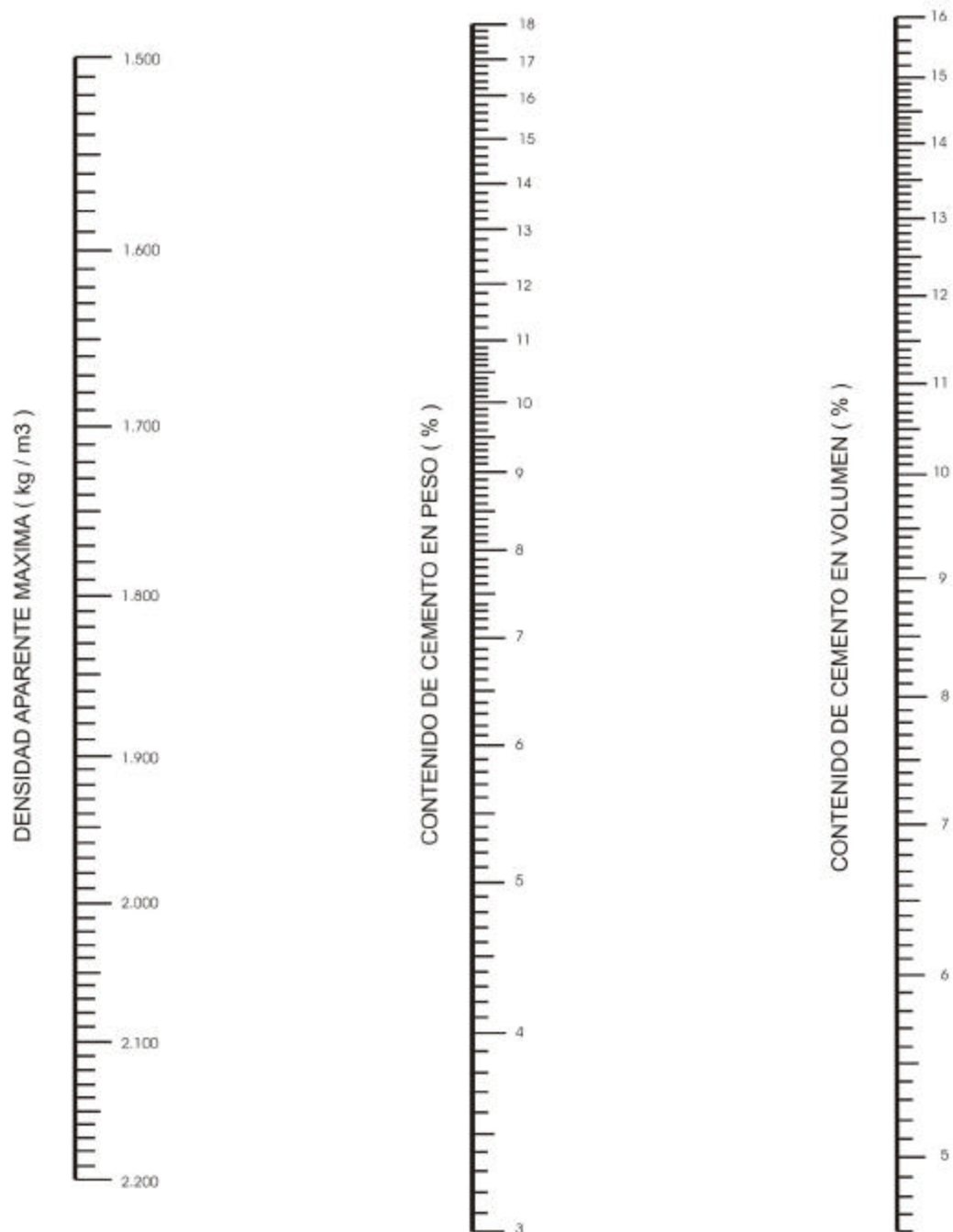
El proceso de diseño de mezclas de suelo-cemento consiste en una serie de ensayos de laboratorio con miras a determinar:

- La cantidad de cemento que debe agregarse al suelo para que la mezcla endurezca en forma adecuada.
- La cantidad de agua que se debe agregar a la mezcla.
- La densidad a la cual se debe compactar.

La principal característica que debe tener una mezcla de suelo-cemento es su capacidad de soportar la exposición a los elementos, o sea, su **durabilidad**; la resistencia mecánica también puede considerarse como un requisito importante, sin embargo, como la mayoría de las mezclas de suelo-cemento que poseen una resistencia adecuada al intemperismo también poseen adecuada resistencia mecánica, este requisito es secundario.

Los métodos de diseño que se presentan a continuación coinciden básicamente con los indicados por la Portland Cement Association de Estados Unidos, las cuales se basan en amplias investigaciones de laboratorio y en la evaluación de más de 800 millones de m² de base de suelo-cemento construidas en dicho país desde 1.935; además, la aplicabilidad de dichos métodos ha sido ampliamente

Figura 3.1 NOMOGRAMA PARA TRANSFORMAR CONTENIDO DE CEMENTO EN PESO A CONTENIDO DE CEMENTO EN VOLUMEN



Fuente: Instituto Colombiano de Productores de Cemento

comprobada en países de condiciones muy similares a las nuestras, como son Brasil y Venezuela.

3.7.1 Norma general para dosificación. Este sistema es aplicable a cualquier tipo de suelo, en tanto que la Norma Simplificada que se presenta mas adelante sólo es aplicable a suelos arenosos de determinada granulometría.

A continuación se explican los pasos que deben seguirse en el laboratorio:

- **Ensayos Preliminares**

Sobre una mezcla en estudio deben realizarse los siguientes ensayos:

- a. Análisis granulométrico por tamizado y por sedimentación
- b. Determinación del Límite Líquido
- c. Determinación del Límite Plástico
- d. Determinación de la absorción y el Peso Específico aparente de la fracción de cascajo

Para un mayor entendimiento denominaremos las fracciones de suelo de acuerdo con su tamaño en la siguiente forma:

Cascajo grueso	:	de 4,8 a 76 mm
Cascajo fino	:	de 2,0 a 4,8 mm
Arena gruesa	:	de 0,42 a 2,0 mm
Arena fina	:	de 0,05 a 0,42 mm
Limo	:	de 0,005 a 0,05 mm
Arcilla	:	menor de 0,005 mm

Ensayos con la mezcla de suelo y cemento

- Determinación de la densidad máxima aparente y la humedad óptima de la mezcla de suelo y cemento por medio del ensayo de Proctor Normal (especificaciones AASHTO T134-70).

Este ensayo se debe efectuar con el contenido de cemento más probable para el suelo en estudio, fijado por experiencia con materiales similares o el indicado por el cuadro 17 de acuerdo con la clasificación AASTHO del suelo (el contenido de cemento en peso se define como la relación entre el peso de cemento agregado y el peso del suelo seco en estudio).

Cuadro 17. Contenido de cemento para el ensayo de compactación

Clasificación AASHTO del suelo	Contenido de Cemento en peso (%)
A 1 – a	5
A 1 – a	6
A 2	7
A 3	9
A 4	10
A 5	10
A 6	12
A 7	13

Fuente: Instituto colombiano de productores de cemento, dosificación de mezclas de suelo-cemento

- Ensayo de durabilidad por mojado y secado ejecutado con tres contenidos de cemento: el más probable para el suelo en estudio, 2% por encima y 2% por debajo de él.

El contenido más probable será el indicado por la experiencia con suelos análogos o el obtenido del cuadro 18 en función de las características física del suelo y la densidad máxima aparente obtenida del ensayo de compactación. Para cada contenido de cemento se moldea un cilindro, compactado con la energía del ensayo Proctor Normal y con la humedad óptima ya obtenida.

Cuadro 18. Contenido de cemento probable para suelos arenosos no orgánicos A-1. 1-3. 1-2-4. 1-2-5

Cascajo Grueso	Limo-Arcilla	Densidad aparente máxima (kg/m ³)					
		1680 a 1760	1760 a 1840	1840 a 1920	1920 a 2000	2000 a 2080	2080 o más
0 – 14	0 - 19	10	9	8	7	6	5
	20 - 39	9	8	7	7	5	5
	40 - 50	11	10	9	8	6	5
15 - 29	0 - 19	10	9	8	6	5	5
	20 - 39	9	8	7	6	6	5
	40 - 50	12	10	9	8	7	6
30 - 45	0 - 19	10	8	7	6	5	5
	20 - 39	11	9	8	7	6	5
	40 - 50	12	11	10	9	8	6

Fuente: Instituto colombiano de productores de cemento, dosificación de mezclas de suelo-cemento

El contenido más probable será el indicado por la experiencia con suelos análogos o el obtenido de los cuadros 17 o 18 en función de las características físicas del

suelo y la densidad máxima aparente obtenida del ensayo de compactación. Para cada contenido de cemento se moldea un cilindro, compactado con la energía del ensayo Proctor Normal y con la humedad óptima ya obtenida.

Los cilindro moldeados en esta forma son sometidos a 12 repeticiones del siguiente ciclo: inmersión en agua, secado al horno y cepillado con un cepillo de acero para desprender el material que se haya aflojado. Al final de los doce ciclos se calcula la pérdida de peso del cilindro.

Interpretación de los resultados. Debe adoptarse como contenido de cemento aquel que garantice el cumplimiento de los requisitos de pérdida por peso en el ensayo de durabilidad contenidos en el cuadro 16.

En esta forma queda resuelto el problema de diseño de la mezcla, ya que por el sistema indicado se determinan el contenido de cemento, la humedad óptima y la densidad aparente máxima.

Si se desea obtener el contenido de cemento por volumen, puede emplearse la siguiente fórmula:

$$C_v = \frac{100C_p}{100 + C_p} \times \frac{D_{sc}}{D_c}$$

Donde

C_v = Contenido de cemento en volumen (volumen de cemento suelto con relación al volumen de suelo-cemento compactado).

C_p = Contenido de cemento en peso (peso de cemento con relación al peso del suelo seco en estufa).

D_{sc} = Densidad aparente máxima del suelo cemento compactado, en kg/cm^3 .

D_c = Densidad del cemento suelto. Se puede suponer igual a 1430 kg/cm^3

Para resolver esta fórmula puede usarse el monograma de la figura 8.

3.7.2 Norma simplificada para dosificación. Siguiendo el procedimiento general de dosificación anteriormente descrito, se requieren alrededor de 45 días para encontrar las proporciones buscadas. En vista de lo poco práctico que muchas veces resulta un proceso de tantos días, la Portland Cement Association

(PCA) desarrolló un sistema de diseño para suelos arenosos que requiere en total 10 o 12 días para obtener la dosificación adecuada.

Para establecer este método simplificado, en 1.952 la PCA estudió 2.438 suelos arenosos y estableció una correlación entre la durabilidad y la resistencia a la compresión. Para determinar entonces el contenido de cemento basta moldear cuerpos de prueba, someterlos a ensayos de compresión después de 7 días de curado y comparar las resistencias obtenidas con los mínimos recomendados por la PCA.

Aplicabilidad del método simplificado. El método es aplicable únicamente para suelos con granulometría tal que:

- a. El contenido de limo mas arcilla sea inferior al 50%
- b. El contenido de arcilla sea inferior al 20%
- c. El retenido en el tamiz No 4 sea inferior al 45%

No siempre se obtiene por este método el contenido de cemento mínimo que puede usarse con un tipo dado de suelo arenoso, sin embargo, casi siempre se obtiene un contenido seguro, generalmente muy próximo al obtenido por la norma general con ensayos de durabilidad.

Debido al posible contenido de materia orgánica, el método simplificado no es aplicable a suelos superficiales.

Descripción del Método. En resumen, el método simplificado consta de:

- a. Ensayos preliminares de suelos: granulometría y peso específico.
- b. Ensayo de compactación de suelo–cemento, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el método general ya descrito (Especificación AASHTO T134-70), el contenido de cemento para este ensayo se determina por medio de ábacos especiales.
- c. Con los resultados del ensayo anterior, y mediante el empleo de ábacos se selecciona el contenido de cemento para elaborar las probetas para ensayo de compresión.
- d. Verificación del contenido apropiado de cemento por medio del ensayo de compresión.

El método está subdividido en dos, que llamaremos Método A y Método B, aplicable el primero a suelos que carecen de retenido en el tamiz de 4.8 mm, y el segundo a suelos que sí tienen una fracción retenida en dicho tamiz.

▪ **Descripción del método A.**

1. Se determina la densidad aparente máxima y la humedad óptima del suelo-cemento por medio del ensayo Proctor Normal (AASHTO T 134 –70). El contenido de cemento para este ensayo se calcula así:

- De la figura 9 (A y B), en función de los porcentajes de limo + arcilla y de cascajo fino + arena gruesa, se estima la densidad aparente máxima de la mezcla.
 - De la figura 9 (C), en función de la densidad máxima obtenida en el paso anterior y el porcentaje de limo + arcilla se determina el contenido de cemento para el ensayo de compactación.
2. Con la densidad aparente máxima obtenida del ensayo de compactación y el porcentaje de limo + arcilla se determina en la figura 9 (C) el contenido de cemento para el ensayo de compactación.
3. Con el contenido de cemento obtenido en el paso 2, se moldean tres probetas con la compactación del Proctor normal. La humedad para este ensayo debe ser la óptima determinada en el ensayo de compactación (paso 1).
4. Se determina la resistencia a compresión de los cuerpos de prueba después de siete días de curado en cámara húmeda, previa inmersión de 4 horas.
5. Se verifica en la figura 9 (D), en función del porcentaje de limo + arcilla del suelo, la resistencia mínima a compresión que se debe obtener de la mezcla. Si el promedio obtenido del ensayo de compresión es mayor que este mínimo, se adoptará el contenido usado en el ensayo (aunque la resistencia obtenida sea apreciablemente mayor que el mínimo indicado por el gráfico, no debe disminuirse el contenido de cemento ya que se corre el riesgo de no obtener una durabilidad adecuada). Si la resistencia obtenida es menor que la indicada por la figura, es probable que el contenido de cemento sea muy bajo, en este caso se deben moldear dos cuerpos de prueba, uno con el contenido de cemento usado en el ensayo a compresión y otro con n 2% más, los cuales se someterán al ensayo de durabilidad y se evaluarán de acuerdo con lo indicado en la norma general de dosificación.

- **Ejemplo de la norma simplificada método A.**

Granulometría del suelo:

Cascajo Grueso		
Cascajo fino	:	3 %
Arena Gruesa	:	12 %
Arena fina	:	60 %
Limo	:	7 %
Arcilla	:	18 %

Como tiene menos de 20% de arcilla y menos de 50% de limo más arcilla puede ensayarse por la norma simplificada. Además, como la totalidad pasa por el tamiz de 4,8 mm se usa el método A.

- De la figura 9 (B), con 25 % de limo + arcilla y 15 % de cascajo fino + arena gruesa, se estima una densidad máxima aparente de 1870 kg/m^3 .
- En la figura 9 (C), para una densidad de 1870 kg/m^3 y un 25% de limo + arcilla, se obtiene un contenido de cemento del 7% en peso, con el cual se realiza el ensayo de compactación, supongamos que se obtiene una densidad aparente máxima de 1930 kg/m^3 y una humedad óptima de 11.2 %.
- En la figura 9 (C), para una densidad máxima aparente de 1930 kg/m^3 se obtiene un contenido de cemento de 6%.
- Se moldean tres probetas con el 6% de cemento en peso y una humedad de compactación de 11.2%.
- Se determina la resistencia a compresión de los tres cuerpos de prueba a los siete días de curado, supongamos que se obtiene un promedio de 24 kg/m^2
- En la figura 9 (D), con 25 % de limo + arcilla, se encuentra que la resistencia debe ser superior a $21,3 \text{ kg/m}^2$. Por tanto, el contenido de cemento de 6% en peso es el adecuado.

- **Descripción del método B.**

1. Se determina la densidad aparente máxima y la humedad óptima del suelo-cemento por medio del ensayo Proctor Normal (AASHTO T 134-70). El contenido de cemento para este ensayo se calcula así:

- De la figura 10 (A), en función de los porcentajes de limo + arcilla y de cascajo fino y grueso, se estima la densidad aparente máxima de la mezcla.
 - De la figura 10 (B), en función de los porcentajes de cascajo grueso y de limo + arcilla y de la densidad máxima aparente obtenida en el paso anterior, se determina el contenido de cemento para el ensayo de compactación.
2. Con la densidad máxima aparente obtenida del ensayo de compactación y los porcentajes de cascajo grueso y de limo + arcilla, se determina en la figura 10 (B) el contenido de cemento para el ensayo de compresión.
 3. Con el contenido de cemento indicado en el paso 2 se moldean tres cuerpos de prueba con la compactación del Proctor normal. La humedad para este ensayo debe ser la óptima determinada en el ensayo de compactación (paso 1).
 4. se determina la resistencia a compresión de los cuerpos de prueba después de siete días de curado en cámara húmeda, previa inmersión de 4 horas.
 5. Se verifica en la figura 10 (C), en función de los porcentajes de cascajo grueso y de limo + arcilla, la resistencia mínima a compresión que se debe obtener de la mezcla. La evaluación de los resultados es igual que en el caso de suelos sin retenido en el tamiz 4,8 mm indicado en el punto 5 del método A.

▪ **Ejemplo de la norma simplificada método B.**

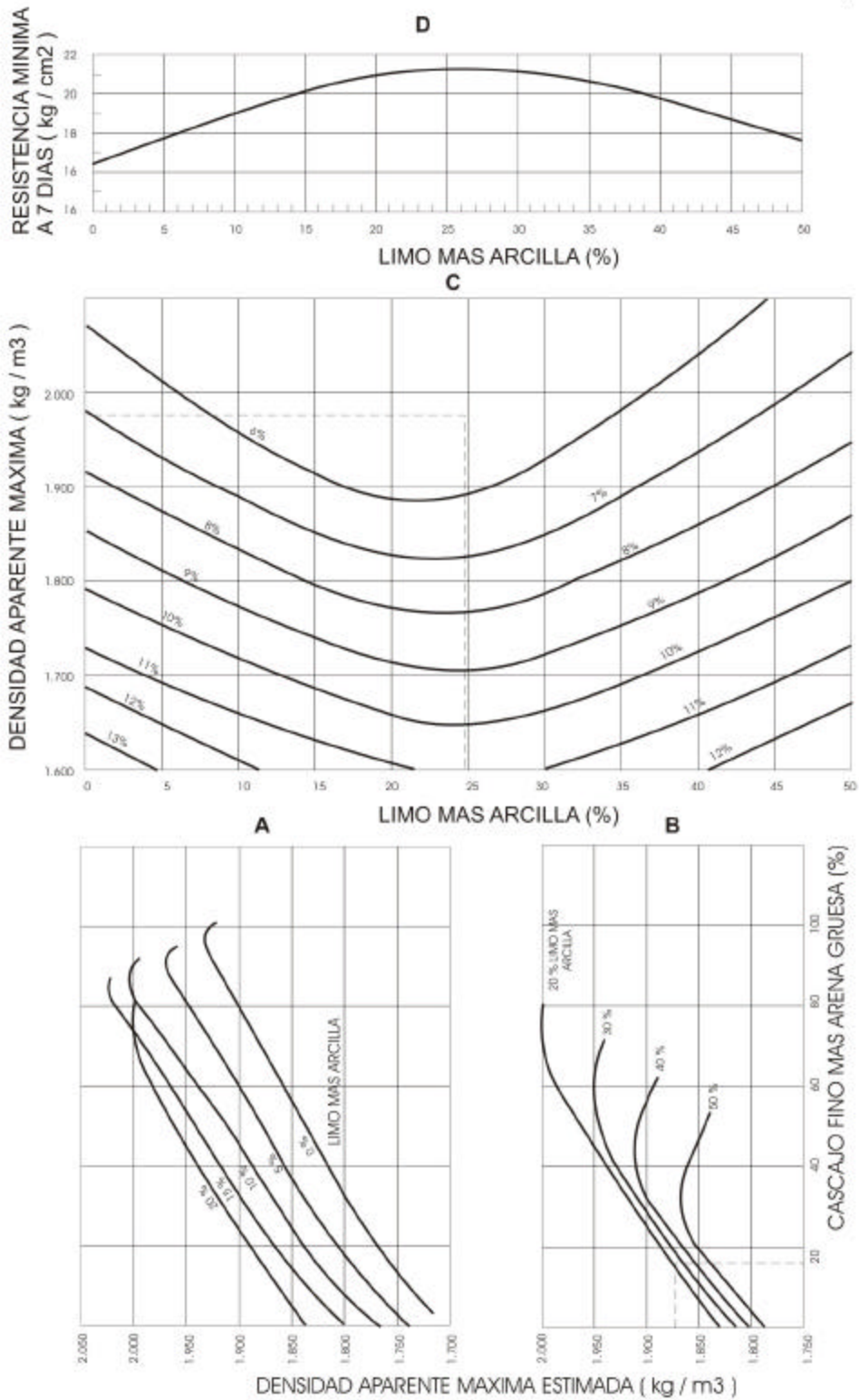
Granulometría del suelo:

Cascajo Grueso	:	20 %
Cascajo fino	:	3 %
Arena Gruesa	:	19 %
Arena fina	:	31 %
Limo	:	12 %
Arcilla	:	15 %

Como el suelo tiene menos del 20% de arcilla y menos de 45 % de cascajo grueso (material retenido en el tamiz No.4) se puede utilizar la norma simplificada; además, como tiene fracción mayor que el tamiz No. 4, se emplea el método B.

- En la figura 10 (A), con 27 % de limo + arcilla y 23 % de cascajo fino + grueso, la densidad máxima aparente se estima en 1975 kg/m^3 .

Figura 3.2 DOSIFICACION DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO. NORMA SIMPLIFICADA, METODO A. SUELO SIN MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ DE 4,8 mm.



Fuente: Instituto Colombiano de Productores de Cemento

- En la figura 10 (B), con 27% de limo + arcilla y 20 % de cascajo grueso, y con una densidad de 1975 kg/m^3 , se obtiene un contenido de cemento del 5% en peso, para el ensayo de compactación. Una vez realizado éste, suponemos que se obtiene una densidad aparente máxima de 2000 kg/m^3 y una humedad óptima de 8.7 %.
- En la figura 10 (B), con una densidad máxima aparente de 2000 kg/m^3 se obtiene un contenido de cemento de 5%.
- Se moldean tres cuerpos de prueba con el 5% de cemento en peso.
- Se determina la resistencia a compresión de los tres cuerpos de prueba a los siete días de curado, suponemos que se obtiene un promedio de 19 kg/cm^2
- En la figura 10 (C), con 27 % de limo + arcilla y 20% de cascajo grueso, se verifica que la resistencia debe ser superior a $20,2 \text{ kg/cm}^2$, y, por tanto, se deben hacer ensayos adicionales.

Se moldean entonces dos cuerpos de prueba, uno con 5 y otro con 7% de contenido de cemento en peso, los cuales se someten al ensayo de durabilidad por mojado-secado. Para continuar el ejemplo, supongamos que en dicho ensayo se obtiene una pérdida de peso de 11 y 7% respectivamente. Como se trata de un suelo 2-4, de acuerdo con el criterio expuesto en la norma general de diseño un contenido de 5% de cemento en peso es aceptable, aunque con dicho contenido no se haya obtenido una resistencia a compresión superior a lo indicado por el método simplificado.

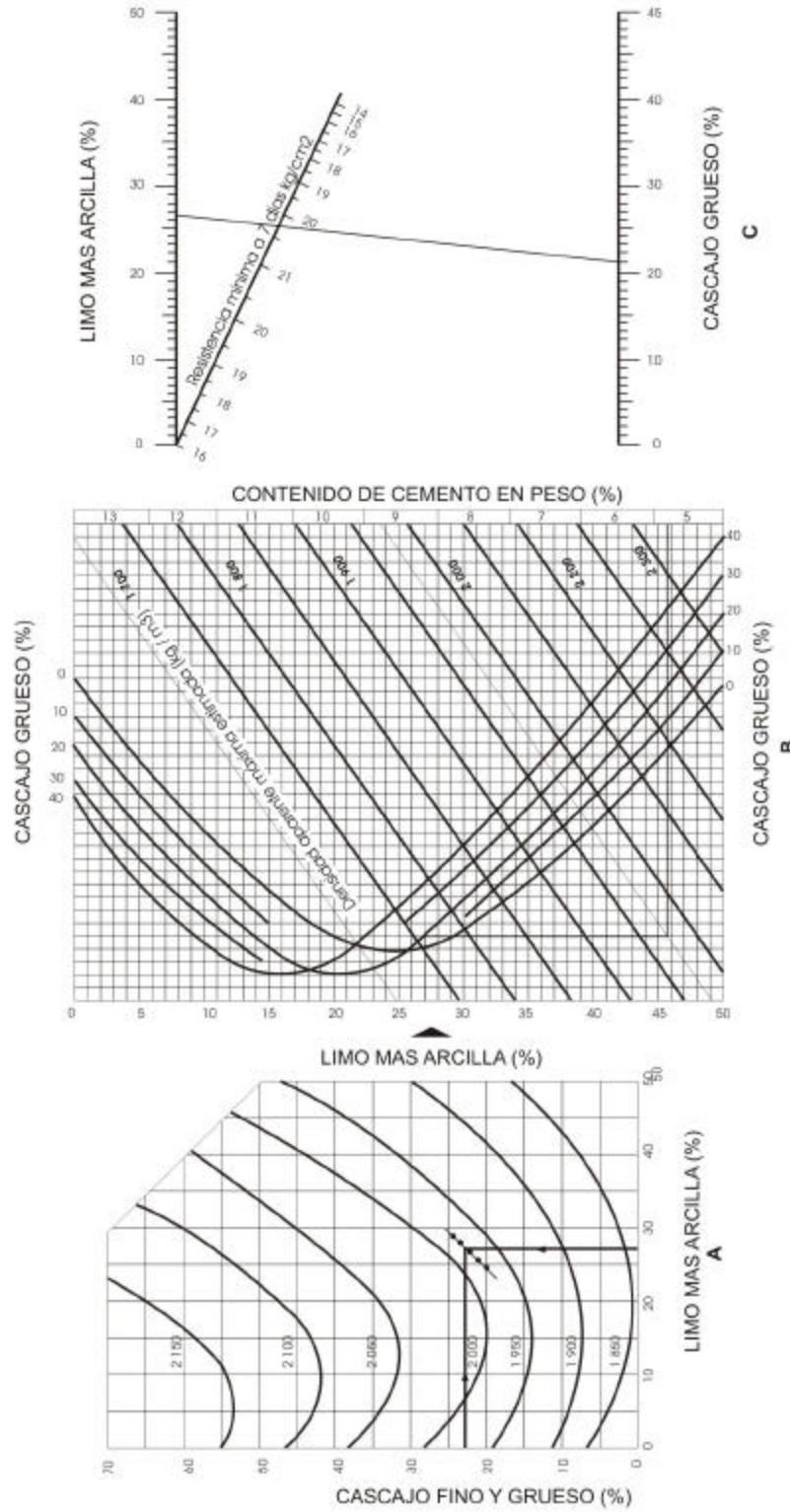
3.7 SUELOS MODIFICADOS CON CEMENTO

La estabilización con cemento tiene diversas aplicaciones en el campo vial, en el mejoramiento de sub-rasantes y sub-bases para pavimento, modificando las características perjudiciales e indeseables en los suelos arcillosos, reduciendo las plasticidades, convirtiéndolos en más flexibles y trabajables, eliminando prácticamente los cambios volumétricos; gracias al efecto cementante obtenemos mayores resistencias y mayores durabilidades ante las cargas y los agentes climáticos.

Los suelos estabilizados con cemento presentan un buen comportamiento frente a resistencia y estabilidad entre otras, pero su uso se ve restringido por la dificultad de manejo de este tipo de mezcla, sumándose a ello la imposibilidad de trabajar con la mezcla una vez ha fraguado.

Figura 3.3

DOSIFICACION DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO NORMA SIMPLIFICADA.
 METODO B: SUELO CON MATERIAL RETENIDO EN EL TAMIZ DE 4,8 mm



Fuente: Instituto Colombiano de Productores de Cemento

La estabilización con cemento busca en si mejorar la plasticidad de un suelo e impermeabilizarlo, además de mejorar el CBR del suelo debidamente escogido, es decir, que no contenga un alto contenido de materia orgánica o suelo con alta plasticidad, puesto que la pulverización de un suelo con estas propiedades es muy difícil.

3.8 PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN:

El suelo-cemento es un material adecuado para ser utilizado en diferentes tipos de vías y, en muchos casos, puede ser la mejor alternativa técnica y económica disponible, pero para que se logren los mejores resultados se deben utilizar los procesos constructivos adecuados, en este texto se describen los diferentes sistemas constructivos que pueden ser utilizados si el material se va a colocar como sub-base, base o carpeta de rodadura provisional.

La construcción de una capa de suelo-cemento para carreteras comprende dos operaciones generales: La preparación de la subrasante y el proceso de construcción. Independientemente de los equipos y métodos utilizados, el objetivo final es el de obtener una mezcla compactada, lo más perfecta posible, del suelo pulverizado con las cantidades convenientes de cemento y agua.

Las prácticas más usuales para la construcción de capas de suelo-cemento se pueden agrupar en dos tipos, las que realizan la mezcla del suelo y el cemento en la vía y las que lo hacen en plantas centrales similares a las utilizadas para la fabricación de concreto.

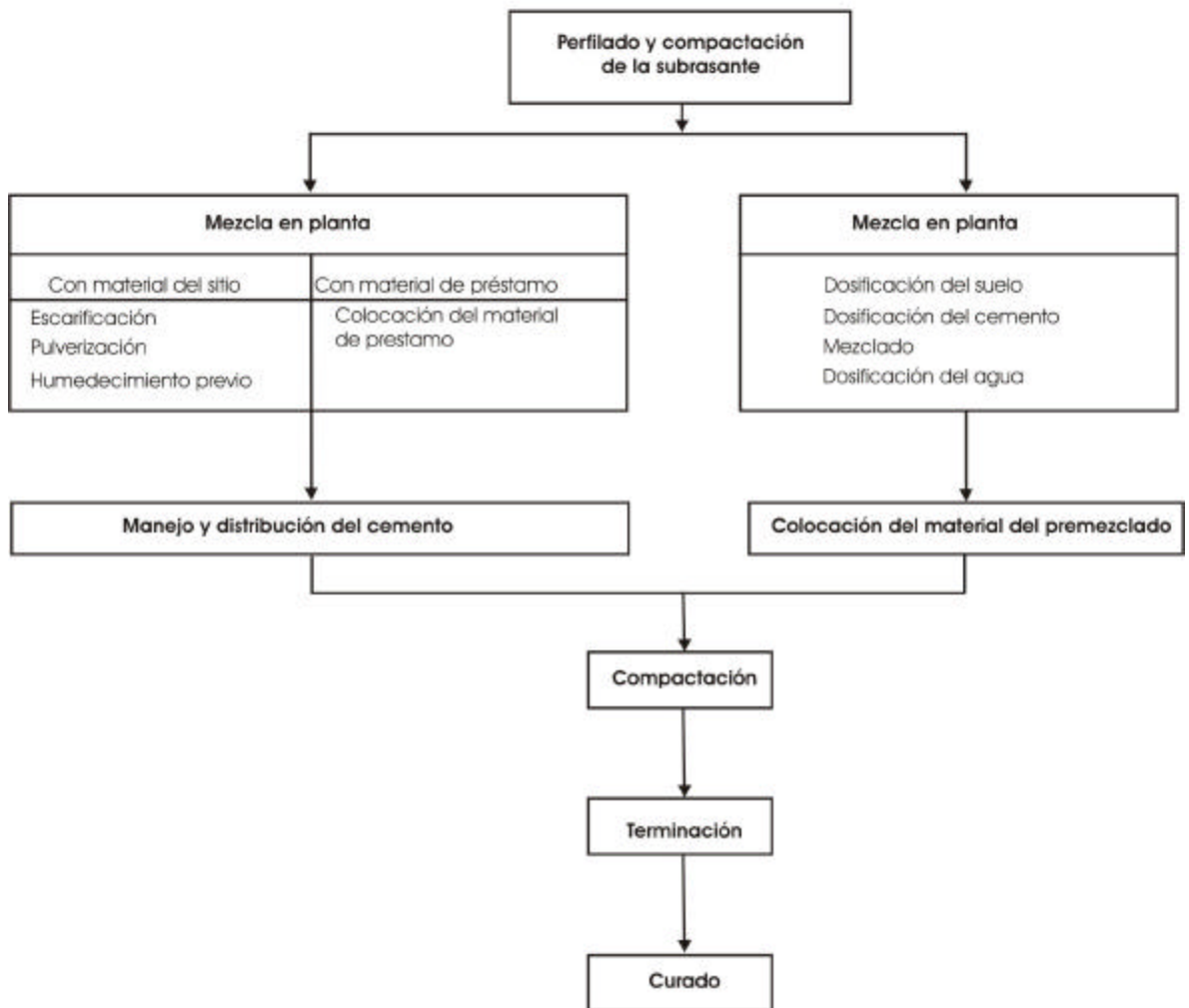
La figura 11 permite aclarar los pasos asociados en cada proceso.

3.9.1 Preparación. Antes de dar comienzo a la construcción propiamente dicha se debe determinar, la cantidad de cemento requerida para el caso específico teniendo en cuenta las características del suelo con el que se va a trabajar, utilizando un procedimiento de diseño adecuado.

Como punto de partida del proceso constructivo se deben controlar el perfil transversal y la rasante de la vía. Este proceso tiene una importancia especial ya que la rasante que presenta la vía al iniciar la construcción de la capa se mantiene una vez terminada ésta, pues durante este proceso constructivo las variaciones en el lineamiento longitudinal son insignificantes.

3.9.2 Procesos específicos de la mezcla en vía. El proceso de mezcla en vía es la forma más rápida y económica de fabricar suelo-cemento con materiales

Figura 3.4 Esquema del proceso constructivo de una capa de suelo-cemento (SC).



fino-granulares. Cuando se está considerando la posibilidad de utilizar este sistema constructivo se debe tener en cuenta la maquinaria disponible. El mezclado se puede ejecutar utilizando tres tipos diferentes de equipos: Mezcladoras rotativas, equipos agrícolas o motoniveladoras.

La utilización de mezcladoras rotativas permite mejorar el rendimiento durante la construcción, lo que facilita la recuperación de la inversión realizada. Los equipos agrícolas y las motoniveladoras pueden ser utilizados para el proceso de mezclado cuando la calidad del suelo-cemento no es un asunto crítico, ya que es difícil lograr una mezcla homogénea y alcanzar la resistencia especificada para la mezcla.

Dentro del proceso de mezclado en vía se pueden incluir las plantas mezcladoras móviles que, aunque realizan el mezclado a medida que se desplazan por la vía, cuentan con un mecanismo similar al de una planta mezcladora para producir el suelo-cemento. Este tipo de maquinaria es adecuada para grandes obras debido a su alto nivel de productividad.

Al margen del tipo de equipo utilizado, los procesos en el campo son los mismos: Escarificación, pulverización y humedecimiento previo; manejo y distribución del cemento, a continuación se explica como se realizan cada uno de estos procesos.

▪ **Escarificación, pulverización y humedecimiento previo.** Las primeras operaciones constructivas dentro del proceso de mezcla en vía son escarificación, pulverización y humedecimiento del suelo. Según las condiciones específicas del material, tales como granulometría y humedad, se pueden obviar algunos de estos pasos.

La escarificación busca desprender la capa de suelo con la cual se va a trabajar y reducir un poco el tamaño de las partículas. En algunos casos puede prescindirse de este proceso dependiendo del tipo de suelo y del equipo de mezclado. Cuando el suelo es deleznable se requieren poca o ninguna escarificación y pulverización, mientras que algunos suelos limosos y arcillosos pueden necesitar un proceso enérgico, especialmente si están muy secos o muy húmedos.

Con la pulverización se busca que todas las partículas sean menores de 25.4 mm (1"). Los elementos que facilitan la pulverización son: La humedad y el equipo adecuado. Los suelos difíciles de pulverizar en estado seco facilitan este proceso cuando se humedecen; de manera inversa los suelos que presentan dificultad en estado húmedo se pulverizan fácilmente cuando pierden una pequeña parte de su humedad.

El empleo de un equipo adecuado contribuye a facilitar el trabajo de pulverización; se usan comúnmente pulverizadoras rotativas, arados de discos y rodillos.

Una práctica corriente es la de humedecer los suelos fino- granulares durante los procesos de escarificación y pulverización. La aplicación de agua en esta etapa de la construcción ahorra tiempo durante la elaboración del suelo-cemento, ya que gran parte del agua ha sido incorporada al suelo antes de la adición del cemento. En suelos muy granulares, el humedecimiento previo facilita la adhesión del cemento a las partículas de arena y grava, además, evita su acumulación en la parte inferior de la capa.

Las especificaciones exigen que el suelo sea pulverizado en forma tal que en el momento de iniciar la compactación, el 100% de la mezcla de suelo-cemento pase por el tamiz 25.4mm (1”), y más del 80% pase por el tamiz 4,76mm (No.4), exceptuando las partículas de grava o piedra, las cuales tendrán un tamaño máximo de 50,8 mm (2”). El ensayo final de pulverización se realiza al concluir las operaciones de mezclado.

- **Espesor del suelo a procesar.** El espesor de suelo que debe ser procesado se determina con ayuda del espesor compactado y de las características de los materiales como se sugiere en la siguiente ecuación:

$$h_e = h_c (D_{sc} - V_t D_c) / D_s$$

- En donde:
- he :Espesor a escarificar
 - hc :Espesor compactado
 - D_{sc} :Densidad máxima del suelo cemento
 - V_t : volumen teórico de cemento
 - D_c : Densidad del cemento
 - D_s : Densidad del suelo suelto

En la práctica, antes de iniciar el trabajo se debe hacer un pequeño tramo de ensayo de 10 a 15 mts. de longitud para calcular el espesor a escarificar.

- **Colocación de material de préstamo.** La mayoría de las bases de suelo-cemento se construyen utilizando exclusivamente el suelo de la vía; sin embargo, cuando se especifiquen suelos de préstamo el material se debe distribuir uniformemente sobre una subrasante bien perfilada y compactada. La distribución se puede hacer por peso o por volumen, de acuerdo con las especificaciones del diseño, aunque es preferible que sea por peso.

- **Manejo y Distribución del Cemento.** La distribución del cemento es uno de los pasos críticos de la construcción ya que al contacto con el agua el cemento reaccione rápidamente. Con el propósito de mejorar la eficiencia y cumplir con los límites de tiempo que fijan las especificaciones, el trabajo del día debe dividirse en

varias etapas, en lugar de tener uno o dos secciones largas. Este procedimiento se refleja en una producción diaria máxima y se evita que la lluvia afecte una gran longitud de vía.

El cemento se puede esparcir en las cantidades necesarias mediante distribuidores mecánicos, cuando se provee a granel, o por medios manuales, cuando se utiliza sacos. El cemento a granel se emplea en la mayoría de los trabajos de gran tamaño, mientras que el cemento ensacado se utiliza en obras pequeñas.

Los distribuidores de cemento a granel son de dos tipos: Los que distribuyen el cemento sobre una franja amplia (generalmente con un ancho de 1.8 a 3 mts.) y los que depositan el cemento en una franja angosta. Los de franja ancha se utilizan para el trabajo con pulvimezcladoras y permiten una mejor distribución del cemento; los de franja angosta se utilizan principalmente cuando el mezclado se hace con Motoniveladora que utiliza como forma de trabajo el caballete.

Cuando la distribución del cemento es manual es necesario determinar, con método simple, pero exactos la ubicación de los sacos de cemento y el área en que se deben esparcir antes de vaciarlo. Cuando se vacía el cemento, se forman pequeños caballetes transversales sobre la superficie a tratar. El cemento no debe distribuirse sobre charcos de lluvias o sobre suelos extremadamente húmedos.

Para distribuir el cemento pueden usarse rastras de dientes o clavos, un trozo de cadena cuyos extremos vayan unidos a la parte trasera de una mezcladora rotativa, o rastrillos manuales. La capa de cemento debe ser lo más uniforme posible para facilitar el mezclado.

Un buen proceso de mezclado está directamente relacionado con el grado de humedad que tenga el suelo en el momento en el que se le adiciona el cemento.

El suelo humedecido se compacta con el paso del equipo para distribuir cemento. En estos casos, el mezclado puede acelerarse aflojando el suelo nuevamente con el escarificador de una motoniveladora. El bastidor del escarificador debe disponerse de tal modo que el cemento fluya por los dientes del mismo sin arrastrarlo hacia delante o desplazarlo. También puede utilizarse un arado de discos.

- **Mezclado del suelo y el cemento.** Para la operación de mezclado del suelo y el cemento se pueden utilizar básicamente dos tipos de equipos: Mezcladoras rotativas o pulvimezcladoras y motoniveladoras.

La operación de mezclado del suelo con cemento es más fácil si el contenido de humedad está dos o tres por ciento por debajo del porcentaje óptimo. No

Figura 3.5 Preparación de la vía

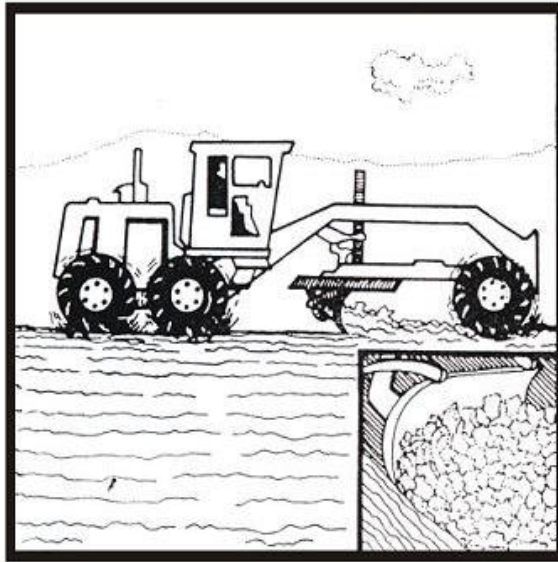


Figura 3.6 Prehumedecimiento del terreno

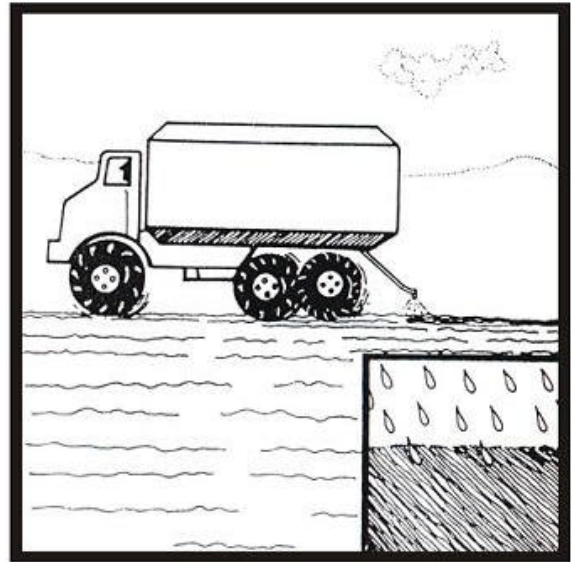


Figura 3.7 Pulverización utilizando equipo agrícola

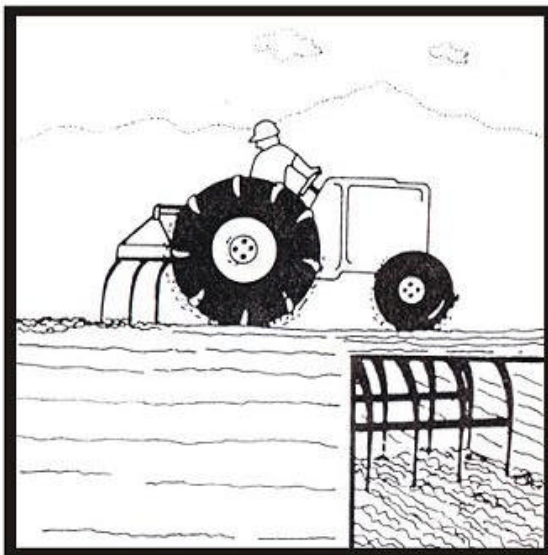
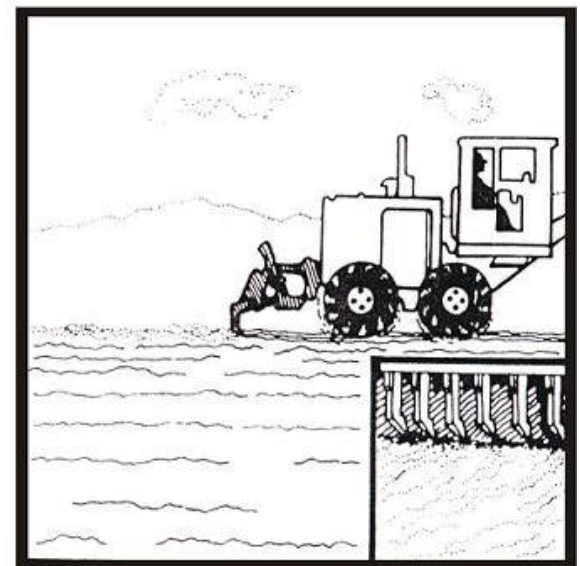


Figura 3.8 Pulverización utilizando motoniveladora



obstante, los suelos muy arenosos pueden mezclarse aunque su contenido de humedad esté por encima del óptimo. El agua debe agregarse uniformemente durante el humedecimiento previo. Al mezclar el agua con el suelo se reducen las pérdidas por evaporación.

Una vez se ha distribuido el cemento se procede con el mezclado. El objetivo de esta etapa es repartir el cemento en la masa del suelo. Sólo se requiere un mezclado suficiente para prevenir la formación de grumos. En este momento de la construcción no es necesario mezclar en forma total e íntima.

A continuación se incrementa la humedad con nuevos riegos, hasta llegar a la humedad óptima de compactación. El agua se mezcla después de cada riego, que se efectúa mediante un camión de distribución a presión o por medio de una barra distribuidora montada al frente del equipo de mezclado.

Después del último riego se continúa el mezclado hasta que el suelo, el cemento y el agua queden íntimamente mezclado en la totalidad del espesor y ancho de la calzada. El material queda en condiciones de ser compactado para realizar posteriormente las operaciones de terminación.

3.9.3 Procesos específicos para la mezcla en planta. La utilización de plantas mezcladoras de concreto para producir suelo cemento es factible desde el punto de vista técnico. Este tipo de mezclado permite vigilar más de cerca la calidad de material e independiza la mezcla de las condiciones climáticas ya que ésta se realiza en un lugar protegido. La adquisición de una planta debe ser justificada desde el punto de vista económico, debido a los costos que se incurre por el transporte del material hasta la planta y después hasta el lugar de colocación. Este factor hace que su utilización se limite, en la mayoría de los casos, a obras donde se va a utilizar material de préstamo.

- **Mezcla en planta central.** Cuando se decide hacer la mezcla en planta se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:
 - El tambor debe ser preferiblemente de eje vertical.
 - La mezcla de suelos arcillosos deja mucho que desear, ya que se adhieren fácilmente a las paredes y a las paletas del equipo. El material ideal para la mezcla en planta es el arenoso.

La principal ventaja de la mezcla en planta es que se puede dosificar el material de manera exacta, asegurando así su calidad.

Figura 3.9 Distribución manual del cemento

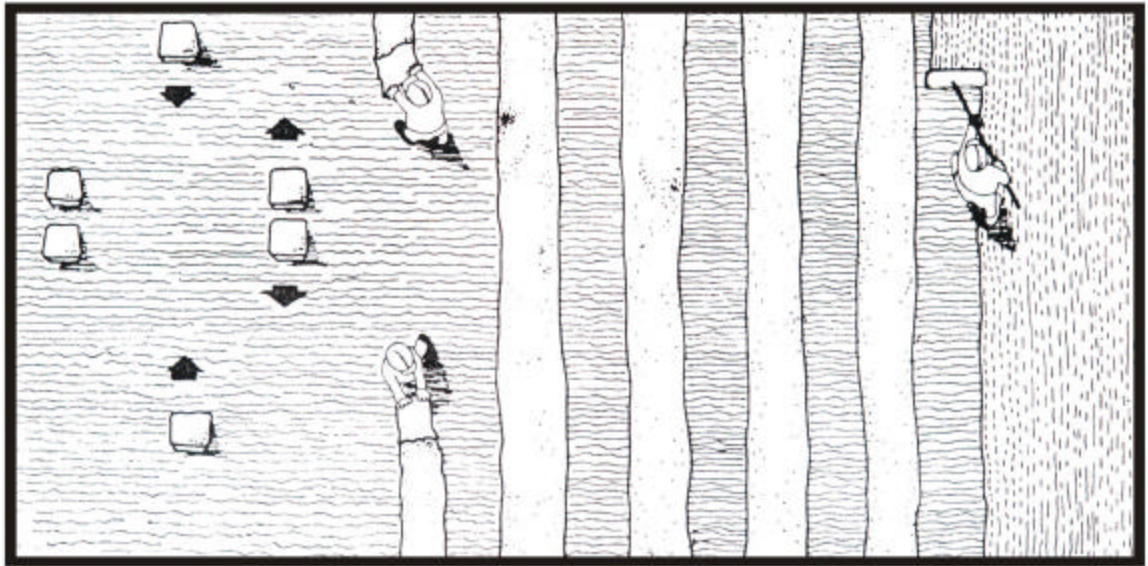


Figura 3.10 Operación de la mezcladora rotativa en seco

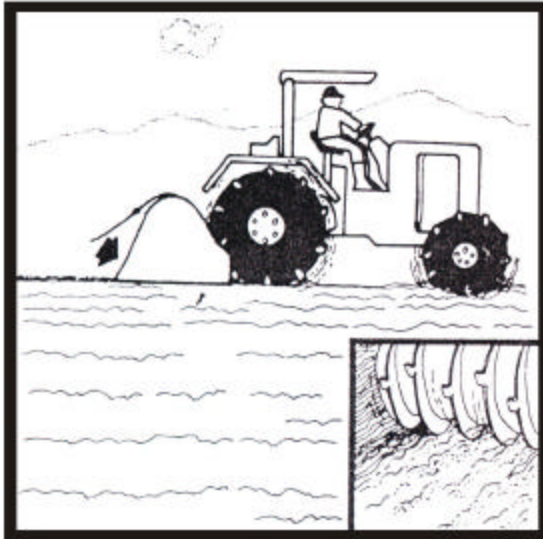
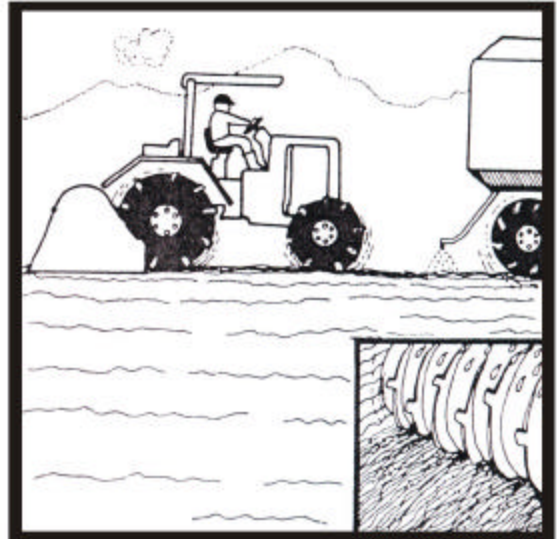


Figura 3.11 Operación de la mezcladora rotativa con adición de agua.



Una vez que el material ha sido mezclado debe ser transportado al lugar de construcción. Para el transporte se pueden utilizar volquetas, teniendo el cuidado de cubrir la caja de la volqueta con plástico para evitar al máximo la evaporación. El tiempo transcurrido entre el comienzo de la mezcla y la compactación no debe ser mayor a dos horas.

- **Extendido.** Una vez colocado el material se cuenta con dos alternativa para su extendido: Con máquina acabadora de asfalto, aunque estas limitan el espesor de la capa a colocar, o con motoniveladoras, en cuyo caso se debe tener en cuenta que la densidad de la capa extendida debe ser lo más uniforme posible. La compactación se debe llevar a cabo inmediatamente.

3.9.4 Compactación. Una vez que el suelo-cemento ha alcanzado la humedad óptima y ha sido total e íntimamente mezclado, debe compactarse de inmediato. La humedad optima y la máxima densidad se determinaran por el método Proctor (AASHTO–T 134–76). Algunas veces es necesario reponer el agua perdida por evaporación durante la compactación.

Existen numerosos tipos de equipos de compactación. Los más usados para el suelo cemento son los rodillos pata de cabra, los neumáticos y los cilindros lisos.

Los rodillos pata de cabra utilizados para compactar las mezclas de suelo-cemento tienen sobrepesos para aumentar la presión unitaria transmitida, sin llegar a sobretensionar el suelo-cemento. Con estos equipos se compacta de manera satisfactoria capas de 20 cm de espesor.

Cuando se emplea este tipo de rodillo para la compactación inicial, el material mezclado deberá estar suelto para que las patas lleguen hasta el fondo de la capa e ir compactando gradualmente. Cuando las patas no pueden penetrar lo suficiente se afloja la mezcla. Este procedimiento también se utiliza para obtener una mayor densidad.

Para compactar suelos muy arenosos con poco o ningún ligante, como las arenas limpias o las gravas con poca o ninguna plasticidad, se emplean rodillos neumáticos. Estos rodillos se usan con cargas altas. Las arenas cohesivas pueden compactarse con grandes tractores equipados con orugas planas; la compactación se obtiene por el peso y vibración del tractor.

Para compactar suelos granulares que contienen poco o ningún material ligante, se usa comúnmente compactadores de cilindros lisos; este sistema es muy adecuado para suelos de grava que contienen hasta un 20 % de material que pasa el tamiz No. 200 y que tienen baja plasticidad.

Figura 3.12 Compactación utilizando cilindro liso

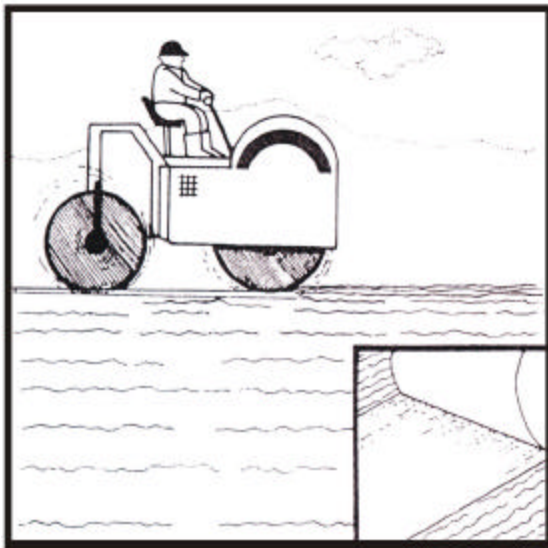


Figura 3.13 Compactación utilizando cilindro pata de cabra

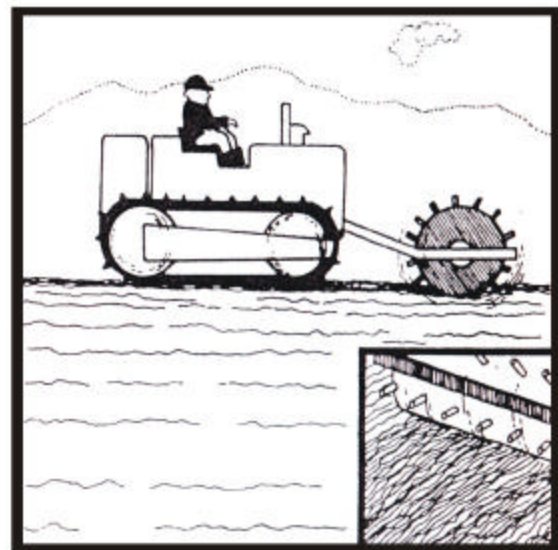
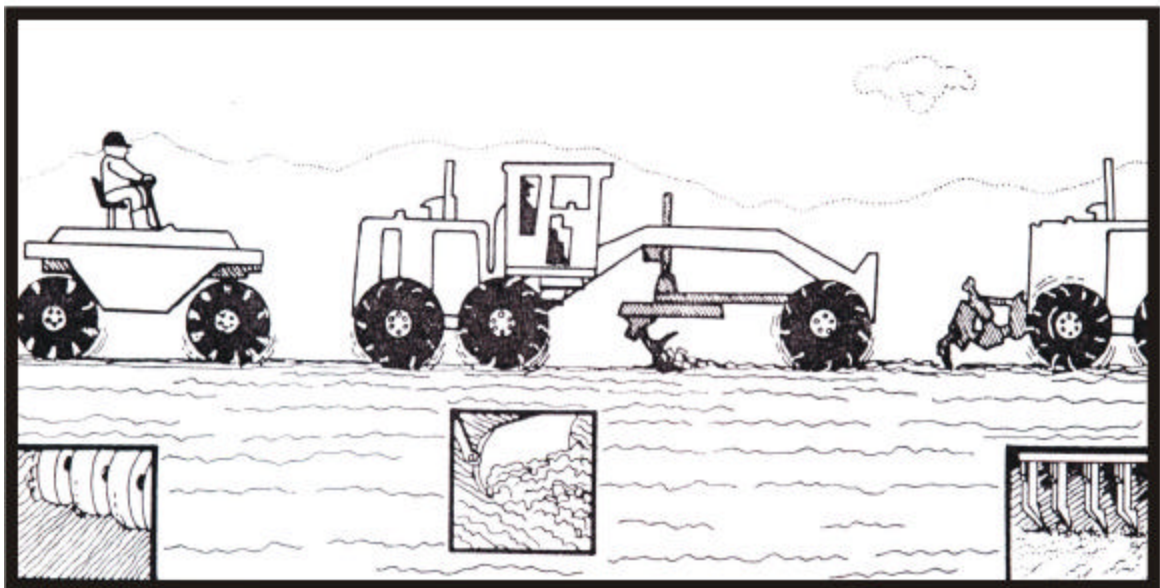


Figura 3.14 Proceso de terminación



La compactación del suelo-cemento se termina con un segundo rodillo neumático liviano con el fin de sellar las fisuras.

Algunas veces durante las operaciones de compactación y acabado aparecen zonas flojas puestas en evidencia por el equipo de construcción. Esto se debe a una o varias de las siguientes causas:

El suelo-cemento contiene humedad muy superior a la óptima; la subrasante está húmeda e inestable o el rodillo es muy pesado para el suelo. Si el suelo-cemento está demasiado húmedo se debe airear con un arado, una mezcladora rotativa o una motoniveladora, después de que se ha secado hasta aproximadamente el contenido óptimo de humedad, se puede compactar. Algunos suelos limosos pueden sobrecompactarse; aunque esto no es lo corriente, el rodillo puede ser muy pesado y transmitir presiones demasiado altas al suelo.

Para obtener los mejores resultados con la compactación ésta debe empezarse inmediatamente después de la elaboración de la mezcla de suelo, cemento y agua. En esta forma se obtienen rápidamente las densidades necesarias, hay menos evaporación de agua y el rendimiento aumenta; las especificaciones exigen que los suelos-cemento se compacte hasta densidades equivalentes al 95% de la densidad máxima determinada sobre una muestra de la mezcla humedad tomada en el campo y de acuerdo con la especificación AASHTO T 134-76.

3.9.5 Acabado. Existen varios métodos aceptables para la terminación del suelo-cemento. El procedimiento adecuado depende del equipo, condiciones de obra y las características del suelo. Para producir una superficie de alta calidad, independientemente del método empleado, se deben cumplir las exigencias fundamentales de compactación, humedad cercana a la óptima y remoción de cualquier plano superficial de compactación.

Los planos superficiales de compactación son aquellos marcados por las ruedas del equipo, la cuchilla de la motoniveladora o las patas del rodillo de pata de cabra, sobre las cuales no se adhieren adecuadamente las capas posteriores y, por lo tanto pueden desprenderse, aflojarse y fracturarse. Los planos superficiales se deben escarificar y humedecer para obtener una buena adherencia.

Las huellas superficiales y las marcas de la cuchilla que deja la motoniveladora en el perfilado final deben escarificarse con rastras de dientes o clavos. La superficie de trabajo se debe mantener bien húmeda durante las operaciones de acabado (humedad óptima o mayor).

El cilindro se pasa para borrar las marcas o estrías que deja el rodillo neumático inicial; además, este equipo presenta ventajas especiales cuando quedan partículas pétreas en la superficie. A continuación del cilindro es conveniente

pasar una rastra de cepillos para rellenar con material ligante los intersticios dejados por las partículas de grava insertadas en la superficie por la acción del cilindro.

En reemplazo del cilindro es muy común perfilar la superficie con la cuchilla de la motoniveladora y sellarla volviendo a pasar el rodillo neumático. En la operación de perfilado se corta una pequeña profundidad, aproximadamente de 3 mm, y todo el material removido se lleva a las bermas con la cuchilla de la motoniveladora y se desecha. La operación final consiste generalmente en un riego ligero de agua y una pasada con rodillo neumático para sellar la superficie. Luego se procede al curado.

La superficie deberá estar lisa, densa y libre de estrías y grietas. Más adelante se describen varios métodos de acabado usados actualmente. Si se siguen las indicaciones que se dan, se tendrá como resultado una compactación y acabado superficial satisfactorio.

A continuación se resumen los procedimientos de acabados teniendo en cuenta los diferentes equipos de compactación y las características de los materiales.

- **Procedimiento de acabado para la mayoría de las mezclas de suelo-cemento compactada con rodillos pata de cabra.** Al iniciar el acabado se procede a remover los planos de compactación que se encuentran en la superficie utilizando rastras de dientes o clavos, mientras se perfila con una motoniveladora; algunas veces es necesario humedecer el material para humedecer los planos completamente. La compactación final se logra mediante un equipo neumático, aunque también se puede combinar con un rollo liso.

- **Procedimiento de acabado para mezclas de apreciables cantidades de grava y con poca o ninguna plasticidad y compactada con rodillo pata de cabra.** La operación de acabado comienza con la definición del perfil utilizando motoniveladora. La densidad final se logra compactando con un cilindro liso, teniendo en cuenta la eliminación de los planos de compactación. En la última pasada se utiliza un rodillo neumático y puede ser necesario un riego ligero para lograr la calidad adecuada.

- **Procedimiento de terminación para mezclas muy arenosas que contengan poco material fino compactado con rodillos neumáticos.** Este caso se aplica a arenas limpias, sin cohesión y en las cuales menos del 10% pasa el tamiz No. 200. La operación comienza con la remoción de los planos de compactación utilizando rastras de dientes o clavos mientras se perfila con la motoniveladora. Algunas veces es necesario adicionar agua. La compactación

definitiva se efectúa con un rodillo neumático repitiendo la operación de raspado hasta obtener una superficie de buena calidad.

- **Procedimiento de acabado para mezclas granulares gruesas, compactadas con un compactador de cilindros.** El material se debe conformar en el sentido transversal y longitudinal antes de la compactación. Para mezclas granulares gruesas (no se trata arenas limpias) que contengan hasta el 20% de material que pasa el tamiz No. 200 y con bajo índice plástico se raspan las zonas altas con la motoniveladora y humedeciendo ligeramente si fuera necesario.

3.9.6 Curado. El suelo cemento compactado y terminado contiene suficiente humedad para la hidratación adecuada del cemento. Con el fin de retener esa humedad, inmediatamente después del acabado se coloca sobre el suelo-cemento una cubierta que permita la hidratación del cemento.

En los últimos años se están utilizando productos bituminosos para el curado del suelo-cemento. Los más usados son los “asfalto rebajados” y las emulsiones asfálticas, pero existen otros materiales tales como las películas plásticas, el papel impermeable, la paja o la tierra humedecida, cuyo desempeño es enteramente satisfactorio.

El rango de aplicación de los compuestos bituminosos varía desde 0.7 a 1.4 l/m². En el momento de aplicarlos la superficie del suelo-cemento debe estar muy húmeda y libre de todo material extraño, inclusive conviene agregarle más agua, cuando la obra debe mantenerse abierta al tránsito se coloca arena sobre el material bituminoso para prevenir su desprendimiento.

Una característica de todos los materiales producidos con cemento es la de fisurarse como resultado de su contracción y el suelo-cemento no es ajeno a este problema. Por lo tanto, las fisuras que aparecen superficialmente son un indicio de que la hidratación del cemento ya se ha presentado. Las fisuras aparecen a los pocos días de finalizada la construcción aunque pueden producirse algunas otras en el transcurso de los primeros meses.

3.9.7 Juntas de construcción.

- **Juntas transversales.** Al finalizar el tramo construido durante el día se debe elaborar una junta de construcción vertical cortando el extremo suelo-cemento terminado. La última porción de material se coloca formando una rampa y una vez compactada se procede a cortar verticalmente y a retirar el material sobrante. Este procedimiento permite asegurar la compactación en la zona de la junta.

Figura 3.15 Curado utilizando compuesto bituminosos

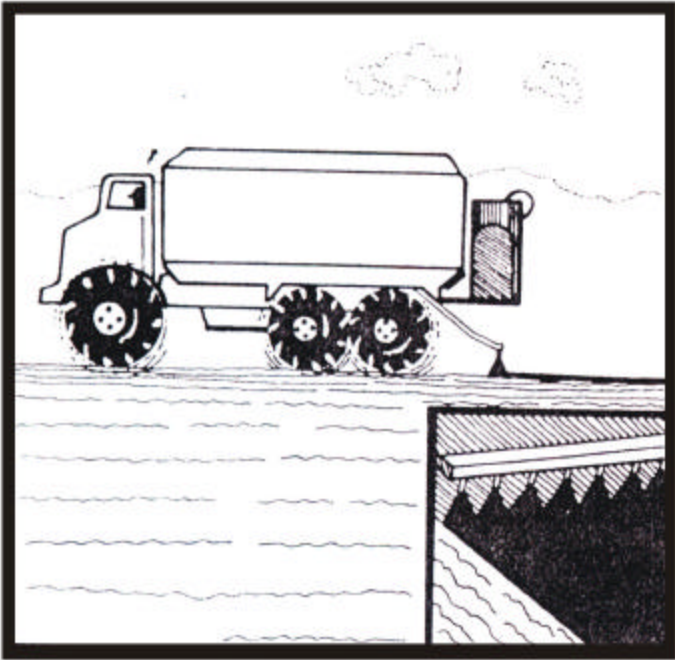
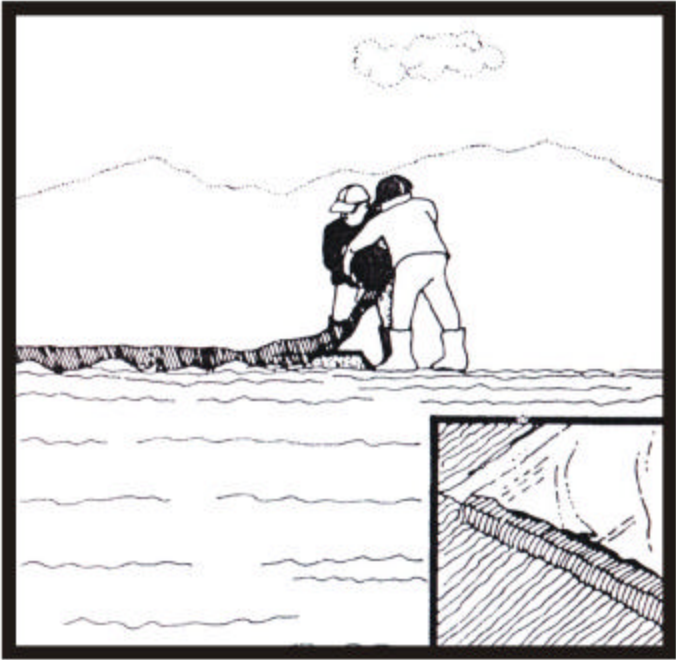


Figura 3.14 Curado utilizando membrana plástica



Fuente: Instituto Colombiano de Productores de Cemento

Al día siguiente, el material adyacente se prepara para ser utilizado durante el día de trabajo. Una vez mezclado el material se limpia la zona de unión extrayendo la mezcla seca o defectuosa. El material mezclado y humedecido se lleva con la motoniveladora hasta la zona de la junta y se compacta totalmente. En esta etapa de la construcción la mezcla se deja ligeramente alta; durante la compactación final se enraza con la motoniveladora y se vuelve a compactar.

Cuando el curado se efectúa empleando un material bituminoso, este se aplica exactamente hasta la junta y se distribuye arena en su cercanía para evitar que se levante.

- **Juntas longitudinales.** Se debe evitar la presencia de juntas longitudinales ya que, debido a la falta de mecanismos de transmisión de cargas, estas se constituyen en zonas débiles dentro de la capa. En lo posible el trabajo del día debe ser planeado para construir el ancho total de la sección.

Una práctica más común es la de construir juntas en caliente, o sea, aquella que se forman entre dos tramos adyacentes que han sido compactadas con no más de una hora de diferencia. Este tipo de juntas ocasionan las mismas dificultades que cuando se realizan con un día o más de diferencia debido a que el contacto entre los tramos se realiza por medio de una cara vertical.

3.9.8 Construcción en varias capas. Cuando el espesor fijado para la base excede el que puede ser mezclado, humedecido y compactado en una sola operación, con el equipo disponible y de manera correcta, el suelo-cemento se debe construir en varias capas. En ningún caso el espesor de las capas debe ser inferior a 0.10 mts.

No es necesario que las operaciones de acabado de las capas inferiores sean muy cuidadosas; no se requieren remover los planos de compactación dado que están demasiados alejados de la superficie final para considerarlo peligrosos.

Las capas inferiores pueden curarse cubriéndolas con el suelo por emplear en la construcción de las capas inmediatamente superiores. La construcción de una capa puede efectuarse al día siguiente de la inferior o postergarse por algún tiempo.

3.9.9 Apertura al tránsito. Al igual que otros materiales que contienen cemento, el suelo-cemento requiere un período de 7 días para desarrollar una resistencia capaz de absorber el esfuerzo inducido por la carga de los vehículos. Debido al sistema de construcción utilizado, el material estará en capacidad de soportar tránsito con un peso menor que el del equipo de construcción, inmediatamente

éste se retire pero dicha posibilidad sólo debe ser aprovechada en casos extremos.

Si es necesario dar vía al servicio inmediatamente, se debe esperar a que el suelo-cemento haya endurecido lo suficiente para evitar desconchamiento o daños a la superficie y se haya colocado el compuesto de curado. Si éste no ha secado completamente se puede colocar encima una capa de material arenoso para que no se adhiera a las llantas de los vehículos.

Carpeta de rodadura. Aunque el suelo-cemento tiene buena resistencia a la compresión, su resistencia a la abrasión es muy baja; por esta razón se recomienda la colocación de una carpeta de rodadura mas resistente, antes de darlo al servicio.

Existe una relación estrecha entre el momento en que se coloca la carpeta y la aparición posterior de fisuras, a este respecto existen dos opiniones encontradas: La Escuela Americana sostiene que la carpeta debe colocarse tan pronto como sea posible para impedir la aparición de fisuras. La Escuela Inglesa afirma que se debe permitir que todas las fisuras aparezcan antes de continuar la carpeta definitiva, efecto que se logra colocando algún tratamiento superficial que soporte el tráfico durante un período aproximado de dos años y luego se coloca la carpeta definitiva.

4. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON MATERIALES BITUMINOSOS

4.1 GENERALIDADES

Los primeros trabajos de estabilización utilizando material bituminoso se realizaron en los Estados Unidos a comienzos del presente siglo, siendo los estados de La Florida, Carolina del Norte, Georgia, Nuevo México entre otros en donde ha recibido el mayor impulso por la ausencia de materiales granulares. Se han tenido muy buenas experiencias en aquellas regiones con suelos finos medianamente plásticos y arenas, desprovistas de materiales granulares a razonables distancias de transporte y con condiciones climáticas apropiadas.

En Argentina, en la década de los 60, la Provincia de Mendoza construyó 600 km. de rutas vecinales, provinciales y municipales utilizando mezclas asfálticas en frío elaboradas en el sitio, del tipo gravas-asfalto. Estas mezclas cumplían la función de carpeta de rodadura y estaban constituidas por grava seleccionada y asfalto líquido de curado rápido, el comportamiento de estas capas ha sido satisfactorio a pesar de las severas solicitaciones a que se han sometido.

Las condiciones climáticas contribuyen a que este tipo de mezclas constituyan una solución técnica y económica para determinadas condiciones de tránsito y materiales disponibles.

Igualmente se tienen experiencias utilizando como ligantes “aceites pesados” en mezclas in situ, en las provincias de Santacruz, Río Negro y Chabot, entre los años 1.965 y 1.970.

En Colombia se han ejecutado algunos trabajos de estabilización utilizando como ligante crudos de petróleo, entre ellos se tienen los trabajos ejecutados en las zonas de Apiay y Castilla (Meta), Ortega y Guamo (Tolima) y en Palagua (Puerto Boyacá), estabilización de zonas de carga, parqueaderos y vías en el campo petrolero de Toldado (Tolima), vías en el complejo industrial de Barrancabermeja, en todos estos casos utilizando el crudo local disponible.

Para la construcción y conservación de pavimentos y estabilización de agregados se utilizan asfaltos líquidos de curado medio y rápido, los cuales están compuestos por una mezcla de cemento asfáltico y solventes (Gasolina, Kerosene, Nafta, etc.) los cuales se evaporan durante el proceso de curado.

La gran variabilidad de los materiales bituminosos, hacen de éstos los materiales más utilizados para la construcción y mantenimiento de las estructuras de pavimento flexible, los principales tipos de ligantes bituminosos son: cemento asfáltico, asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas, asfaltos naturales, y los crudos pétreos, siendo el más común en Colombia el Crudo de Castilla.

El crudo de Castilla ha sido utilizado mezclado en vía para todos los accesos a pozos en la zona de Apiay, carretera de acceso al campo petrolífero de Castilla la Nueva (aproximadamente 15 Km.), parqueaderos y zona de cargue en la planta de asfalto en Apiay, pista aérea La Colina al servicio de ECOPETROL en Apiay (Meta) en los cuales el comportamiento ha sido calificado como aceptable. En los dos últimos años otros departamentos han iniciado el uso del crudo de Castilla tanto en riegos de imprimación como en frío, tales son los casos del Valle del Cauca, Cauca, Santander, Arauca, Guaviare, entre otros.

Teniendo en cuenta los altos costos en la producción de estos solventes en Colombia y que en muchos casos se deben importar a altos costos y subsidiarse, debilitando el presupuesto nacional, aumentando con ello la deuda externa, no se justifica que se utilicen teniendo a la mano productos de características similares que permiten realizar los mismos trabajos y a menores costos.

4.2 TIPOS DE ESTABILIZACIONES BITUMINOSAS

Según el efecto que se produzca en el suelo se pueden distinguir diferentes tipos de estabilizaciones:

- **Estabilización arena-asfalto.** Cuando el ligante bituminoso aporta resistencia cohesiva a suelos sin ninguna cohesión propia, al mismo tiempo que actúa como agente ligante de partículas.
- **Estabilización suelo-asfalto.** El ligante bituminoso estabiliza el contenido de humedad de los suelos finos cohesivos.
- **Estabilización grava-arena-asfalto.** Con el ligante se da resistencia cohesiva e impermeabilidad en los suelos granulares que poseen altos valores de resistencia friccional.

Muchas veces estos materiales bituminosos son utilizados en caminos de tierra o afirmado a efectos de lograr una superficie libre de polvo, impermeable al agua y resistente a la abrasión del tránsito. Este tratamiento se utiliza para suelos gruesos o finos con plasticidad donde sólo se desea una disminución de los costos de conservación.

El Highway Research Board establece cuatro tipos de estabilización bituminosa de uso cotidiano, teniendo en cuenta la compactación del suelo disponible y la función del ligante incorporado, estas son:

- **Suelo-asfalto.** Suelo cohesivo a prueba de agua (impermeabilizado).
- **Arena-asfalto.** Las arenas de playa, médanos y yacimientos o de ríos, cumpliendo condiciones mínimas de estabilidad, son cementadas con material bituminoso.
- **Estabilización granular impermeabilizada.** El suelo grueso natural o de mezcla natural, que teniendo una buena graduación de partículas gruesas a finas, es impermeabilizado mediante la distribución uniforme de pequeñas cantidades de ligante.
- **Suelo aceitado (o emulsionado).** Consisten en solo una delgada capa superficial de camino de tierra o grava resistente al agua y a la abrasión del tránsito mediante la aplicación de "road-oils", asfaltos diluidos de curado lento y medio o emulsiones asfálticas de rotura lenta.

4.3 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE ESTABILIZACIÓN BITUMINOSA

La estabilización bituminosa puede ser una solución convenientemente económica siempre y cuando se disponga de la suficiente experiencia en todos los aspectos que ella involucra, tales como proyecto, construcción, análisis de laboratorio etc.

Por ello la adopción de un determinado tipo de estabilización con materiales bituminosos para un proyecto dado, depende de cuatro aspectos básicos:

- Características de los materiales disponibles y aptos para su estabilización.
- La calidad requerida.
- Condiciones climáticas en la zona del proyecto.
- Procesos constructivos a utilizar.

4.3.1 Características de los materiales disponibles y aptos para su estabilización. Existe una amplia gama de suelos granulares y finos que comprenden desde las gravas y arenas hasta las arcillas limosas y arenosas, entre otros, aptos para su estabilización con materiales bituminosos (cementos

asfálticos, asfaltos líquidos o Cutback, emulsiones asfálticas y crudos de petróleo con características similares a los asfaltos líquidos).

El factor más importante para seleccionar el tipo de estabilización es la disponibilidad y calidad del suelo a estabilizar; si se dispone en la zona del proyecto de dos o más tipos de suelos aptos para estabilizar, deberá seleccionarse el más granular de ellos, ya que la densidad y estabilidad de los suelos estabilizados con material bituminoso tiende a incrementarse con el aumento del tamaño máximo de las partículas.

Existen básicamente tres posibilidades en cuanto a la procedencia del suelo a estabilizar:

- Utilizar solamente el suelo existente en la vía.
- Mejorar dicho suelo mediante la mezcla con otro proveniente de un yacimiento con el fin de que la mezcla reúna los requisitos necesarios para la estabilización.
- Emplear materiales transportados de yacimientos o depósitos. Es de anotar que estos son de calidad más uniforme y por lo tanto el contenido de asfalto y las características de la mezcla serán razonablemente constantes.

4.3.2 Calidad requerida. La calidad dependerá de los materiales, métodos constructivos y de los controles de obra utilizados.

Las calidades más elevadas se pueden lograr elaborando mezclas en caliente de grava-arena-asfalto y de arena-asfalto. Las mezclas de arena-asfalto elaboradas con asfalto líquido no son de la calidad de las mezclas preparadas y distribuidas en caliente, razón por la cual se emplean en bases de pavimentos sometidos a la acción de tránsito mediano.

Cuando las mezclas de grava-arena son empeladas tal y como son extraídas de los yacimientos y carecen de una aceptable uniformidad, pueden ser económicamente convenientes en vías con tránsito liviano.

Sin embargo, la calidad de estas mezclas estabilizadas con asfaltos líquidos puede ser más alta si, además, se especifican requisitos de granulometría y otras características de los agregados y si se efectúan estrictos controles constructivos.

4.3.3 Condiciones climáticas en la zona del proyecto. Las condiciones climáticas influyen significativamente en la elección del tipo y características del material bituminoso a emplear en las mezclas.

Al respecto es necesario contemplar las siguientes consideraciones:

- En zonas donde existen frecuentes precipitaciones la estabilización suelo-asfalto líquido no puede ser utilizada; ya que el contenido de humedad de estos suelos es por lo general elevado y al adicionar el ligante, resulta una mezcla con un mayor tenor de agua y solvente, lo cual incrementa el tiempo de curado para lograr estabilidades aceptables. Las mezclas areno-asfalto líquido son menos afectadas que las anteriores.
- En climas secos son apropiadas las estabilizaciones con asfalto líquido por la facilidad de evaporación de los solventes que contiene la mezcla asfáltica.
- En ningún caso debe intentarse estabilizar suelos con asfalto líquido en climas muy fríos por las grandes dificultades que presentan los procesos de mezclado y curado del producto elaborado. En estos casos es necesario realizar estos procesos en planta.

4.3.4 Procesos constructivos. El equipo y proceso de mezclado disponible tiene una relación directa con la calidad y uniformidad de la mezcla.

Existen básicamente tres tipos de procesos constructivos de acuerdo a la forma de elaborar la mezcla, a saber:

- Mezcla en vía con equipo convencional; donde se emplea para realizar la mezcla la motoniveladora o el mezclador rotativo (Pulvimixer). En estos casos debe utilizarse asfaltos líquidos que permitan un buen mezclado sin una rápida volatilización de los solventes.
- Mezcla en vía con plantas móviles o ambulo-operantes (tipo Peh, Baber Green, etc.) En estos casos es posible utilizar asfaltos líquidos más viscosos debido a que el proceso de mezclado es más eficiente.
- Mezcla con planta asfáltica fija.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la decisión de adoptar un determinado tipo de estabilización con material bituminoso dependerá de una completa evaluación técnico-económica, en la que deben considerarse todos los aspectos analizados.

Probablemente la limitación más seria que exista en el proyecto y construcción de los materiales estabilizados con material bituminoso es la carencia de suficientes conocimientos técnicos y experiencia práctica en los métodos de diseños y control de obra de estas mezclas.

En la práctica corriente existen diversos métodos de laboratorio para dosificar las mezclas, dependiendo de los diferentes tipos de material bituminoso a utilizar; de igual manera estos métodos presentan criterios diferentes para el proyecto, lo cual hace que el ingeniero proyectista tenga dificultad para decidir cual de los métodos es el más apropiado para la estabilización que tiene previsto emplear.

Una vez que ha evaluado los distintos métodos de ensayos disponibles y adecuados para la mezcla tiene que decidir que criterios de calidad va a utilizar para el proyecto de la misma.

Esta dificultad es mayor debido a que hasta el presente no se ha efectuado suficiente investigación, tanto al nivel de laboratorio como de obra con el objeto de establecer correlaciones válidas que permitan fijar criterios más precisos para el proyecto de las mezclas estabilizadas con ligantes bituminosos.

4.4 FUNDAMENTOS DE LA ESTABILIZACIÓN BITUMINOSA

Cuando se tratan suelos con o sin cohesión propia con algún ligante bituminoso, en donde el propósito más importante es lograr su estabilización, existe una marcada diferencia en la conformación y comportamiento de la estructura inerte-ligante según utilice uno u otro material como árido. Existen básicamente dos estructuraciones:

- Sistema suelo-ligante
- Sistema arena-ligante

4.4.1 Sistema suelo-ligante. En este sistema la estabilidad de la estructura depende de la fricción interna del árido y de la cohesión arcilla-agua del mismo. El ligante actúa como agente impermeabilizante impidiendo el acceso del agua al suelo y su acción perjudicial sobre el ligante arcilla-agua. En este sistema la función primordial del ligante no es producir cohesión sino proteger la cohesión del ligante arcilla-agua.

El ligante asfáltico obtura los conductos capilares del suelo impidiendo el acceso de agua una vez que la humedad de la mezcla se vaya parcialmente evaporando,

permitiendo de esta manera que adquiera la estabilidad necesaria para soportar las sollicitaciones a que estará sometida.

4.4.2 Sistema Arena-Ligante. En este caso el árido carece de cohesión propia, la que debe ser aportada por el ligante. La cantidad de asfalto que interviene en estas estabilizaciones es superior a las del sistema anterior. En este sistema, se debe incorporar ligante hasta cierto límite, logrando recubrir las partículas y producir el efecto ligante entre ellas. Un exceso de ligantes puede afectar la estabilidad del sistema por una reducción de la resistencia friccional de la arena e incrementar las deformaciones y la afloración del ligante.

Es de anotar que en materiales granulares con finos de nula o poca plasticidad el ligante puede cumplir ambas funciones; aporta cohesión faltante e impermeabiliza el sistema.

4.5 MATERIALES RECOMENDADOS PARA ESTABILIZAR

4.5.1 Las arenas. Las arenas pueden ser de río, playa o de yacimientos, libres de terrones de arcilla, vegetales y otra materia orgánica. La granulometría es amplia, el índice de plasticidad debe ser inferior a 10 y si es posible menor a 6. La textura rugosa y angular de la arena le confiere alta estabilidad. Las arenas en partículas lisas y redondeadas poseen baja estabilidades pudiéndose incrementar estas últimas mediante la incorporación de un material fino (llenante mineral o Filler).

4.5.2 Los Suelos. Las arenas limosas o arcillosas, las arcillas arenosas o limosas constituyen los suelos más adecuados para este sistema. El suelo debe estar húmedo para facilitar la distribución del material bituminoso durante el mezclado y desmenuzamiento de los terrones del suelo que pudieran existir.

Debe tratarse que los suelos sean bien graduados y con cierta plasticidad sin superar el límite indicado, y no contener materia orgánica. Por lo general, los suelos que tienen un límite líquidos menor de 30 y un índice de plasticidad menor de 12 pueden ser pulverizados adecuadamente y por lo tanto mezclarse uniformemente con el asfalto.

4.5.3 Grava – Arena. Pueden ser una mezcla natural de yacimiento y de ríos o mezcla artificial de ambos materiales. El material preferiblemente debe ser bien graduado. En general las mezclas bien gradadas se compactan a al tas

densidades y tienen elevadas estabilidades. El índice plástico debe ser menor de 6%.

En el siguiente cuadro, se muestran las principales características que deben cumplir los materiales recomendados para ser estabilizados con productos bituminosos.

Cuadro 19. Propiedades de los materiales que pueden ser estabilizados con productos bituminosos

% pasa tamiz	Arena	Suelo	Grava-Arena
1 ½"			100
1 "	100		
¾ "			60-100
# 4	50-100	50-100	35-100
# 10	40-100		
# 40		35-100	13-50
# 100			8-35
# 200	5-12	Bueno :3-20 Regular : 0-3,20-30 Malo : > 30	0-12
Límite Líquido		Bueno : < 20 Regular : 20-30 Malo : 30-40	
Índice Plástico	10	Bueno : < 5 Regular : 5-9 Malo : 9-15	10

Fuente: Rico Rodríguez Alfonso y del Castillo Herminio, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas .

4.6 LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON ASFALTO

4.6.1 Los Agregados Pétreos. **El comportamiento de las mezclas estabilizadas con asfalto está altamente influenciado por las características de los agregados pétreos. Estos conforman alrededor de un 90% al 95% del peso total de la mezcla o de un 75% al 85% respecto a su volumen total. Las exigencias que deben especificarse a los agregados pétreos dependerán en gran parte de las propiedades que se deseen obtener de la mezcla asfáltica, del equipo disponible para su colocación y compactación, al igual que de la disponibilidad en la obra de un determinado material.**

Las mezclas en caliente tienen la ventaja de que se elaboran y extienden con equipos costosos y mecánicos en donde es fácilmente controlable la dosificación y la calidad de los componentes. Por su parte los equipos y métodos utilizados para la elaboración y colocación de las mezclas en frío son los más elementales.

Por lo general y de manera equívoca, las especificaciones de los agregados para elaborar mezclas en frío suelen ser más tolerables, que para los utilizados en la elaboración de las mezclas en caliente. La experiencia mundial indica que para uno u otro tipo de mezclas se debe exigir las mismas calidades en los agregados pétreos.

La factibilidad técnica de utilizar un determinado agregado pétreo para la elaboración de una mezcla asfáltica, dependerá de la evaluación de las siguientes propiedades:

- El tamaño y la gradación
- La textura superficial
- El grado de absorción
- La resistencia al desgaste
- La actividad de los finos
- El grado de afinidad con los ligantes bituminosos
- Durabilidad.

4.6.2 Los Ligantes Bituminosos. La gran versatilidad de los materiales bituminosos hace de éstos los materiales más utilizados para la construcción y mantenimiento de estructuras de pavimento flexibles.

Los principales tipos de ligantes bituminosos que se utilizan actualmente para la elaboración de las mezclas asfálticas son las siguientes:

- Los cementos asfálticos o asfaltos de penetración
 - Los asfaltos líquidos o asfaltos rebajados
 - Las emulsiones asfálticas
 - Los asfalto naturales
 - Los crudos del petróleo
-
- **Los cementos asfálticos o asfaltos de penetración:** Se designan por lo general con las letras AC y provienen de la refinación del petróleo o de la mezcla de un asfalto refinado y un aceite fluidificante (gasoleo). Es considerado como un material ideal para los trabajos de pavimentación, pues además de sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, poseen características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de ácidos, sales y alcoholes. Son utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, ya que se necesitan altas temperaturas para disminuir su consistencia de tal manera que permita una buena envoltura de las partículas.

- **Los Asfaltos Líquidos o Asfaltos Rebajados:** También se conocen con el nombre de Cut Back, se componen de un cemento asfáltico y un fluidificante volátil que puede ser bencina, Kerosene o aceite pesado. El fluidificante se adiciona al cemento asfáltico con el propósito de proporcionarle la manejabilidad necesaria para poderlo mezclar y trabajar con los agregados a bajas temperaturas, una vez elaborada la mezcla los solventes o fluidificantes inician el proceso de volatización (proceso de curado), quedando un residuo denominado “asfalto residual” que envuelve y proporciona cohesión a las partículas de agregado.

Según el tipo de solvente adicionado, se obtienen tres tipos de asfaltos líquidos:

- Asfalto de curado rápido (RC) cuando el solvente adicionado es gasolina.
- Asfalto de curado medio (MC) si el solvente es Kerosén
- Asfalto de curado lento (SC) si el solvente es un aceite ligero.

Se designan con las letras correspondientes a la velocidad de curado seguida de un número que indica su viscosidad cinemática.

En los siguientes cuadros se señalan algunos requerimientos frecuentemente exigidos a los asfaltos rebajados:

Cuadro 20. Rebajados de Fraguado Medio

Propiedad	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	Min.	Máx.	Min.	May.	Min.	May.
Viscosidad en Stokes a 50°C	0.36	0.71	1.10	2.20	3.60	7.10
Punto de ignición, °C	38	-----	38	-----	49	-----
Penetración en el residuo a 25°C	100	250	100	250	100	250
Partes de kerosena, en volumen, por cien partes de cemento de penetración 90	78	78	51	51	37	37

Fuente: Rico Rodríguez Alfonso y del Castillo Herminio, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas .

Cuadro 21. Rebajados de Fraguado Lento

Propiedad	Grado 0		Grado 1		Grado 2	
	Min.	May.	Min.	May.	Min.	May.
Viscosidad en stokes a 50°C	0.36	0.71	0.70	1.40	1.10	2.20
Proporción de cemento con penetración 90	100	----	100	-----	100	-----
Proporción de aceite Diesel	60	----	45	-----	30	-----
Proporción de Kerosena	50	----	38	-----	25	-----

Fuente: Rico Rodríguez Alfonso y del Castillo Herminio, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas .

- **Las Emulsiones Asfálticas:** Es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como son el asfalto (60% - 70%) y el agua, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente activador de superficie (0.2%-1%), tensoactivo o emulsificante, de base jabonosa o solución alcalina, el cual mantiene en dispersión el sistema, siendo la fase continua el agua y la discontinua los glóbulos de asfalto de tamaño entre 1 y 10 micrones.

Cuando la emulsión se coloca en contacto con los agregados se produce un desequilibrio eléctrico que lo rompe (coagulación), llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie del agregado; el agua fluye o se evapora separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto, en el momento en que tal coagulación ocurra determina la efectividad de la liga asfalto-suelo; si el rompimiento ocurre muy pronto se tendrá una penetración escasa e inadecuada y esta es la razón por la que se evitan las emulsiones de rompimiento rápido. De acuerdo con la velocidad de rotura, las emulsiones asfálticas pueden ser: de rompimiento rápido RS, de rompimiento medio MS y de rompimiento lento SS.

Las emulsiones asfálticas deben ser afines a la polaridad de los agregados con el propósito de tener una buena adherencia. Esta cualidad se la confiere el emulsificante, el cual puede darles polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de aniónicas las primeras, afines a los agregados de origen caliza, y catiónicas, las segundas, afines a los agregados de origen silíceo o cuarzo.

Las emulsiones aniónicas deben tener por lo menos 55% de contenido de asfalto; el emulsificante y los agentes estabilizantes deben dejar cuando mucho un residuo de 02%, en peso, de toda la emulsión que sea retenida en la malla No. 100, tras una dilución en un volumen igual de agua destilada y un período de reposo de 10 minutos. La viscosidad de estas suspensiones debe estar comprendida entre 4 y

25 grados Engler. La temperatura para uso en el campo debe ser 49°C como máximo.

Las emulsiones catiónicas tienen especificaciones menos familiares y en torno a ellas hay una experiencia mucho menor, suele exigirse un contenido de asfalto mínimo de 58% y una viscosidad comprendida entre 3 y 24 grados Engler.

- **Los Asfaltos Naturales.** Son producto de la destilación natural del petróleo y como resultado de factores de tipo geológico. Es común hallarlos frecuentemente en asociación íntima con algún tipo de agregado pétreo. Se encuentran por lo general en pequeños depósitos y filtraciones, rocas impregnadas de asfalto y arenas bituminosas.
- **Los Crudos del Petróleo.** Son una mezcla de sustancias químicas orgánicas, derivadas principalmente de la transformación de los restos de plantas y animales microscópicos que vivían en el mar hace millones de años. Fue necesario que se dieran condiciones específicas y pasara muchísimo tiempo para que esos restos sufrieran complejos cambios químicos y se transformaran en petróleo y gas.

En la tecnología del asfalto, se pueden clasificar según la gravedad A.P.I. (Instituto Americano del Petróleo) y su composición química.

De acuerdo con la gravedad A.P.I., los crudos se dividen en:

Crudos Pesados	:	A.P.I. < 20
Crudos Medianos	:	20 < A.P.I. < 31
Crudos Livianos	:	A.P.I. > 31

Según su composición química se pueden dividir en:

- **Crudos de base parafínica (P).** Son por lo general crudos livianos compuestos por elevados contenidos de compuestos parafínicos y de ceras de alto peso molecular.
- **Crudos de base nafténica (N).** Tienen altos contenidos de betún y algunas trazas de parafina, en su composición predominan los hidrocarburos Aromáticos y Nafténicos.
- **Crudos de base intermedia (I).** Presentan características de los dos grupos anteriores, con A.P.I. entre 20 y 31.

4.7 AFINIDAD DE LOS AGREGADOS PÉTREOS Y LIGANTES BITUMINOSOS

La misión de los ligantes bituminosos en la tecnología de los pavimentos flexibles, consiste en unir los agregados entre sí y formar una masa compacta y aglomerada, es decir, un nuevo material de construcción denominado mezcla asfáltica.

La fuerza adhesiva del ligante se basa en la presencia de grupos polares y en las fuerzas de adsorción que de ellos resultan entre el ligante y la superficie de las partículas pétreas. La adhesividad debe ser considerada como una propiedad en donde intervienen ambos componentes y que se pierde cuando uno de los dos reúne las condiciones precisas. Este puede ser el caso cuando el ligante empleado no contiene la cantidad necesaria de compuestos polares, o el agregado no posee la suficiente capacidad adhesiva.

El verdadero problema de adherencia está en el comportamiento frente al agua o a los efectos de ella, ya que precisamente en estos casos, es cuando se puede producir una verdadera falta de adherencia. En mezclas con altos contenidos de vacíos, el agua penetra fácilmente y si los áridos poseen poca capacidad adhesiva se pueden presentar fallas por adherencia. La película de ligante desprendida, puede sufrir daños por efecto del tránsito y quedar destruida.

4.7.1 Definición de Adherencia. La adherencia se define como la capacidad que tiene un ligante bituminoso para permanecer fijo en una partícula de agregado pétreo, sin que se presente su posterior desplazamiento aún en presencia de agua y la acción del tránsito.

Se conocen dos tipos de adherencia, a saber:

- **Adherencia activa.** La cual es la propiedad que tiene el ligante de cubrir o mojar la partícula de agregado durante el proceso de mezclado.
- **Adherencia pasiva.** Medida por la resistencia que opone el ligante a ser desplazado de la partícula de agregado, por la acción del agua y/o el tránsito.

4.7.2 Factores que Influyen en el Fenómeno de la Adherencia. Las mezclas asfálticas son mezclas de agregado pétreo y un ligante bituminoso. Al conformar un nuevo material, se hace necesario que sus componentes sean estables y cumplan cada uno con unas funciones muy específicas. Por lo tanto es necesario garantizar que tanto el ligante como el agregado no formen dos componentes

aisladas, sino que estén unidos entre si, es decir, que halla afinidad o adherencia entre ellos. Dicha adherencia se presenta en la superficie de las dos fases, por lo que el fenómeno real se trata de un fenómeno de interfases.

Entre los factores más importantes que inciden en este problema interfacial, se encuentran los siguientes:

- Los relacionados con el agregado pétreo:
 - La granulometría.
 - La composición mineralógica.
 - La textura superficial.
 - La porosidad y absorción.
 - La forma de la partícula.
 - La limpieza de la superficie de la partícula.
 - La resistencia al desgaste de las partículas.
 - La durabilidad de las partículas
 - La humedad.

- Los que tienen relación con el ligante bituminoso:
 - La tensión superficial.
 - Al ángulo de contacto
 - La consistencia.
 - El origen del asfalto.
 - El proceso de refinación.
 - La durabilidad de sus propiedades.
 - La susceptibilidad térmica.

- Los factores relacionados con las características de la mezcla, la acción del tránsito y condiciones climáticas:
 - Las condiciones de drenaje.
 - El contenido de asfalto.
 - El porcentaje de vacíos.
 - La temperatura.

4.7.3 Ensayos de laboratorio para determinar la afinidad ligante agregado pétreo. El fenómeno interfacial de la adherencia es muy complejo, por lo que hasta el momento no ha sido desarrollado un método de laboratorio que tenga en cuenta los factores antes mencionados, por lo cual solo se han desarrollado ensayos arbitrarios que permiten hacer comparaciones entre el grado de afinidad de un ligante con diversos tipos de agregados.

Estos ensayos se pueden agrupar en distintos grupos a saber:

- **Los ensayos de inmersión estática:** La mezcla asfáltica se sumerge en agua, estimándose visualmente el grado de denudación que presentan las partículas.

La gravilla utilizada es de tamaño uniforme la cual es envuelta por una cantidad de ligante constante. Dentro de este grupo se encuentra el ensayo convencional de adherencia o stripping y el ensayo de inmersión total en agua TWIT. El problema de estos ensayos es su alto grado de subjetividad los que lleva a una mala reproducibilidad.

- **Los ensayos de inmersión dinámica.** Son similares a los de inmersión estática, pero la muestra se agita mecánicamente por sacudidas o amasado. Se puede determinar el grado de afinidad mediante una inspección visual cuantificando el porcentaje de partículas que permanecen envueltas por el ligante bituminoso. El ensayo Argentino, Placa Vialit y el ensayo de lavado de Nicholson, son algunos de los métodos que permanecen a este grupo de ensayos.
- **Los ensayos de inmersión química.** La mezcla se coloca en contacto con una sal de diferente concentración, cuantificando el grado de afinidad por el grado de concentración que hizo desprender el ligante del agregado. El ensayo Rieldel Weber, el Brasileiro I y Brasileiro II son ejemplos de este grupo de ensayos.
- **Los ensayos de inmersión mecánica.** En estos, el grado de afinidad se mide indirectamente mediante el cambio de una propiedad mecánica determinada después de colocar en inmersión una serie de probetas durante un tiempo definido. Entre los mas conocidos se tiene el ensayo de inmersión-compresión y el de estabilidad residual.
- **Ensayos de tránsito con inmersión.** En este grupo se cuantifica la acción del tránsito. Los distintos ensayos simulan la acción del tránsito mediante ruedas con movimiento de vaivén que pasan sobre una probeta sumergida

en agua. Ejemplo de este tipo de ensayo es el desarrollado por el Road Research Laboratory y conocido como tránsito por inmersión.

- **Los ensayos de envuelta.** Se trata de medir la adherencia entre los agregados pétreos y el ligante bituminoso en presencia de agua. Como ejemplos de este tipo de ensayos se encuentran el de inmersión en bandeja y el Inglés.

- **El ensayo stripping o denudación (MOP E 31-60).** El ensayo trata de elaborar empíricamente el efecto de la acción del agua sobre la película de ligante bituminoso que recubre la partícula del agregado. El ensayo consiste en mezclar 100 gr de agregado pétreo lavado, con una cantidad dada de ligante bituminoso. La mezcla se coloca en un recipiente que se recubre con agua a la temperatura ambiente durante un período de tiempo de 16 a 18 horas, al cabo de las cuales, se determina la adherencia estimando el porcentaje de agregado pétreo que permanece recubierto por asfalto, esta estimación se califica como mayor o menor del 95%.

- **El Ensayo Inglés.** En la prueba se utiliza una bandeja de 20 cm por 20 cm, en la cual se aplica una película asfáltica de 1,5 a 2,5 mm de espesor sobre la cual se colocan 50 partículas de agregado pétreo. luego el conjunto se lleva al horno a 60° C durante 24 horas, se deja enfriar y se recubre con agua dejándola a temperatura ambiente durante 4 días, al cabo de los cuales se retira el agua y se extraen las partículas de agregado pétreo con ayuda de una pinza, determinándose la adherencia subjetivamente según el esfuerzo requerido para extraer las partículas y en la evaluación visual del porcentaje de asfalto retenido sobre cada partícula de agregado. Se considera aceptable un porcentaje de recubrimiento mayor del 80%.

- **Ensayo Brasileiro I.** En el ensayo se utilizan 500 gr. de agregado pétreo lavado y seco al horno a 120°C durante dos (2) horas. El ligante utilizado puede ser un cemento asfáltico, una emulsión asfáltica o un asfalto rebajado, para lo cual es necesario tener en cuenta el proceso de curado o rompimiento mediante unas temperaturas predeterminadas para los materiales mostradas en el siguiente cuadro:

Cuadro 22. Temperaturas de Mezclado Exigidas a los Materiales

TIPO DE LIGANTE	TEMPERATURA	TEMPERATURA AGREGADO
Cemento Asfáltico	120 °C	100°C
Asfalto Líquido	100°C	60°C
Emulsión Asfáltica	Mezcla a temperatura ambiente	

Fuente: Rico Rodríguez Alfonso y del Castillo Herminio, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas .

La mezcla se lleva a un frasco de vidrio recubriéndose con agua destilada, posteriormente se lleva a un horno a una temperatura de 40°C durante 72 horas, al cabo de las cuales se determina visualmente el desprendimiento de la película asfáltica que recubre el agregado pétreo. El resultado es considerado satisfactorio cuando no existe ningún tipo de desprendimiento de la película asfáltica.

▪ **Método Riedel Weber.** Es similar al método Brasileiro II; en este método se utiliza el denominado Índice de Adhesividad, para medir la afinidad ligante y agregado pétreo, y corresponde a la menor concentración de ensayo en la que se produce un desprendimiento total del ligante de la superficie de agregado. La mezcla arena-ligante se hierve en una solución de concentración creciente de Carbono de Sodio. El valor de la adherencia se da por uno o dos números. Cuando se da con dos números, significa que el desprendimiento se inicia en el primer número y termina en el segundo. Cuando no hay desprendimiento en ninguna de estas soluciones el valor de la adherencia será de 10. En el cuadro 23 se pueden observar los distintos índices de adhesividad relacionados con las concentraciones de Carbonato de Sodio.

Cuadro 23. Índices de Adhesividad Riedel-Weber

Solución	Índice de Adhesividad	Adherencia
0	0	Mala
M/256	1	Satisfactoria
M/128	2	Satisfactoria
M/64	3	Satisfactoria
M/32	4	Buena
M/16	5	Buena
M/8	6	Buena
M/4	7	Buena
M/2	8	Buena
M/1	9	Buena
Si no hay desprendimiento Total en la solución 9	10	Optima

Fuente: Rico Rodríguez Alfonso y del Castillo Herminio, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropistas .

4.8 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS CON PRODUCTOS ASFÁLTICOS

Los métodos de dosificación de estas mezclas consisten en determinar el porcentaje óptimo de material bituminoso que confiere a las mismas la estabilidad mínima necesaria para soportar las sollicitaciones a que estarán sometidas, la impermeabilidad adecuada para evitar el acceso de agua a la mezcla y evitar el deterioro, la deformación adecuada para que no pierda la calidad de rodamiento.

La estabilidad se mide registrando las cargas que soportan las probetas de mezcla antes de producirse su rotura o cuando llegan a una deformación máxima normalizada.

La impermeabilización o su estabilidad frente a la acción del agua se valora mediante ensayo de absorción de agua por inmersión y/o capilaridad a los que se someten las probetas con porcentajes crecientes de ligante asfáltico. La relación porcentual entre el peso de la probeta seca, dará la absorción de agua, la que a su vez deberá ser menor que un valor máximo admisible, según el método de dosificación utilizado.

Todos los métodos, ya se basen en ensayos mecánicos, en fórmulas de trabajo probadas por la experiencia, o en estudios teórico-prácticos; tienen una gran dosis de empirismo y en todos los casos es necesario el buen sentido y conocimiento técnico del ingeniero para elegir en última instancia la mejor solución de cada caso.

En general, la metodología de dosificación se basa en elegir una granulometría conveniente, de acuerdo con las características que se desean para la mezcla, las disponibilidades locales de áridos y los usos o especificaciones regidas por la práctica y que son recomendados por diversos organismos (Instituto del Asfalto, Ministerio de Obras Públicas, Laboratorios Oficiales o Privados etc.).

Con la granulometría elegida se busca el óptimo de ligante, entendiéndose por tal, aquel que otorga a la mezcla determinado comportamiento, partiendo de formulas establecidas, ensayos mecánicos o empíricos y ensayos de fundamento menos empíricos que sean capaces de determinar módulos de rigidez, tensiones de rotura, etc.

El estudio de la dosificación puede empezar por la caracterización de los áridos disponibles y del ligante a utilizar, de sus propiedades físicas y químicas y de la comprobación de que las muestras son representativas.

Para cumplir con un uso granulométrico especificado es necesario proceder en muchos casos a dosificar los diferentes materiales mediante métodos analíticos o gráficos, plenamente conocidos.

Una vez fijada la granulometría más adecuada, la dosificación de la mezcla bituminosa se continúa con la determinación del contenido óptimo de ligante. Para ello existen numerosos métodos de calculo que de manera muy general, se pueden dividir en dos grupos:

- Métodos basados en el cálculo de la superficie específica.
- Métodos basados en ensayos mecánicos.

4.8.1 Métodos basados en el calculo de la superficie especifica. Son métodos sencillos y rápidos que tienen el inconveniente de ser imprecisos cuando se trabaja con mezclas densas, al ser muy sensibles a las variaciones al contenido de ligante; entre estos métodos, todos ellos similares, se pueden citar el Duriez Francés, el del Asphalt Institute, el del Centre de Recherches Routeires de Bélgica y el C.K.E. (Equivalente Centrifugo de Keroseno)

Se basan en la aplicación de formulas que suelen determinar la superficie exterior total de las partículas de agregado. Conocida la superficie y dependiendo del área que se desea cubrir con ligante, puede determinarse fácilmente la cantidad necesaria del mismo.

4.8.2 Métodos basados en ensayos mecánicos. Además de los métodos de dosificación anteriores, la mayoría de los que se utilizan en la actualidad se basan en el empleo de diversos ensayos mecánicos, cuyos resultados se interpretan de manera empírica o semiempírica. Estos ensayos definen valores de resistencia mecánicas relativas a las mezclas y compacidades que pueden servir para controlar su fabricación y puesta en obra.

Cada ensayo se utiliza, enmarcado en un método completo, en el que suelen definirse otras propiedades importantes de la mezcla tales como la densidad, los vacíos, la permeabilidad, etc. Por ello no deben emplearse, en general, los ensayos aisladamente sino dentro de su propio método y normativa.

Con independencia del tipo de ensayo que se utilice, la metodología seguida en todos ellos es similar. Una vez elegida la granulometría de los agregados de acuerdo a especificaciones, experiencia, etc. y definidas las características del ligante a utilizar; en todos los métodos se ensayan series de probetas de diferentes proporciones de ligante con el objeto de tener el comportamiento de resistencia, deformación y vacíos en función del porcentaje de ligante. Con el cual

se consiguen las características de la mezcla que se consideran mas requeridas en el proyecto.

Entre los ensayos de laboratorio más habituales para la dosificación de mezclas bituminosas se tienen:

- **El ensayo de compresión simple:** Es uno de los ensayos más clásico y sencillo de los utilizados con todos los materiales que se emplean en construcción. Para mezclas bituminosas se han normalizado varios tipos de ensayos de compresión, siendo el mas elemental el ensayo de Inmersión-Compresión normalizado por la A.S.T.M. D1075 y en España por la norma NLT-162. El método emplea probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 10 cm de altura las cuales no solo se fallan en seco sino que se complementa la información sumergiendo las briquetas gemelas 4 días en un baño de 49 °C.

Las probetas se compactan en una prensa mediante la aplicación de una carga estática con un embolo de 17 Ton. y se rompen con una velocidad de deformación fija de 0.5 cm /minuto, a una temperatura de 25 °C. Este ensayo es útil para el análisis del efecto del agua sobre la resistencia de las mezclas bituminosas, dándonos información sobre la capacidad ligante, permitiéndonos escoger el contenido de ligante para que la resistencia residual después de la inmersión sea superior a un 75 %. Valores de resistencia a la compresión sobre las briquetas sin sumergir de 3 a 6 Mpa son normales de obtener en el ensayo a 25°C.

- **El Método Bruce Marshall:** Es uno de los métodos de dosificación de laboratorio, control de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas basado en ensayos empíricos. Es el más utilizado en nuestro país, fue desarrollado por Bruce Marshall, la normalización de este método se debe al Corp of Engineers de U.S.A; los criterios de valoración originales fueron modificados posteriormente por el Instituto del Asfalto y por las propias administraciones de carreteras para adaptarlos a la problemática específica de cada país.

El método Marshall se basa en la rotura axial mediante compresión diametral (con un cierto confinamiento producido por las mordazas) de probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 6.35 cm de altura. La velocidad de deformación es constante e igual a 2.5 cm/minuto.}

Una vez envuelta la mezcla, se compacta en un molde por la acción de un pistón (4,536 Kg) que cae desde una altura fija (0.457 m) propinándole 35, 50 o 70 golpes que dependen del trafico en cada una de las caras de la probeta.

Después de fabricadas y del periodo de enfriamiento o curado las probetas obtenidas se pesan al aire y sumergidas en agua, para calcular la densidad o peso

unitario entendido como el cociente entre el peso y el volumen. Con la densidad y los pesos específicos de los componentes (ligantes -agregados) de la mezcla, se determinan los porcentajes de vacíos de la mezcla, vacíos con ligante y vacíos de los agregados con aire.

Antes de romper las probetas se mantiene en un baño o en estufa, durante 30 minutos para alcanzar la temperatura normalizada de rotura (60°C)

- **El Ensayo de Hubbard-Field.** El método Hubbard-Field fue desarrollado para el estudio de mezclas tipo mortero; aunque posteriormente se introdujeron reformas para modificar el tamaño máximo del agregado en las mezclas ensayadas.

El método original, utiliza probetas cilíndricas de 5 cm de diámetro, por 2.5 de altura y el método modificado utiliza probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro, por 7.5 de altura.

La determinación del contenido óptimo del ligante se hace partiendo de los resultados de la estabilidad, deformación, vacíos y densidad de la mezcla, al igual que el método Marshall este ensayo no puede aplicarse a mezclas abiertas.

El procedimiento a seguir consiste en preparar varias probetas con distintos contenidos de ligante. La compactación se realiza inicialmente con un pisón manual y seguidamente con carga estática en prensa (45 KN). Una vez preparadas las probetas se las mantiene en un baño de agua a la temperatura de ensayo (60 °C) durante una hora al menos, sometiéndolas a continuación de una carga vertical.

Durante el ensayo de rotura la probeta está dentro de un molde cilíndrico perfectamente adaptado a la misma, cuya base está abierta en un círculo de diámetro inferior a la probeta, por el cual se presiona para que la mezcla pase por extrusión. La probeta se deforma a velocidad constante de 6 cm/ minuto.

Para suelos estabilizados con ligantes bituminosos se emplean probetas cilíndricas de 5 x 5 cm, fabricadas de manera análoga, tomando precauciones para asegurar el curado correspondiente (o de rotura, en el caso de emulsiones) de la mezcla, antes de que la probeta se rompa en la prensa, en estos casos las estabilidades exigidas suelen ser menores que en las mezclas en caliente (4 A 8 KN según distintas especificaciones).

Suele complementarse la dosificación de los suelos estabilizados con ensayos de estabilidad después de varios días de inmersión en agua, con el objeto de poder determinar la pérdida de resistencia mecánica que se puede producir por acción del agua, este ensayo está normalizado por la norma NTC160.

A continuación se presentan otros métodos de dosificación que no son muy comunes en nuestro medio:

- **El valor de soporte de Florida.** Ensayo aplicado sólo en arenas y donde es posible conocer “a priori” si las mismas son aptas para ser estabilizadas en asfalto. Este método permite valorar si las arenas poseen la resistencia friccional mínima para soportar cargas una vez estabilizadas.
- **Método de McKesson.** Este método es utilizado para estabilizar suelos con emulsiones asfálticas. Se basa en la utilización de ensayos de absorción y resistencia al escurrimiento plástico de los suelos, antes y después de ser tratados. La resistencia mencionada se lleva a cabo siguiendo los mismos conceptos del clásico ensayo de Hubbard-Field, establecido para mezclas asfálticas con granulometría fina (Sheet Asphalt) y luego extendido hacia las de granulometría gruesa.

4.8 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS CON ASFALTO

Prácticamente todos los tipos de suelo responden a la estabilización con asfalto, incluyendo las arcillas más compresibles y activas, pero los mejores resultados se obtienen sin duda con arenas y con gravas arenosas, materiales a los que el asfalto da cohesión e impermeabilidad. La granulometría de los suelos no es esencial, pero generalmente se piden algunos requerimientos, como los que se cita a continuación:

- El tamaño máximo de la partícula debe ser menor que un tercio del espesor compactado de la capa.
- Más del 50% del material debe ser menor que la malla No. 4, muchas veces este requerimiento se refiere a la malla 3/16”.
- 35% del material debe ser más fino que la malla No. 40.
- El retenido en la malla No. 200 debe estar comprendido entre 10 y 50%.
- EL Límite líquido de la fracción fina debe ser menor que 40.
- El índice de plasticidad de la fracción fina debe ser menor que 18.

En arenas muy limpias puede haber problemas de adherencia entre el asfalto y los materiales silíceos, lo que conduce al desprendimiento del material estabilizante y a la desaparición de sus buenos efectos. Los suelos húmedos pueden presentar

el inconveniente de que al añadirseles más líquido durante el proceso de estabilización, lleguen a una consistencia que haga muy difícil compactarlos. En el caso de arenas muy limpias, con no más de 3% de material pasando la malla No. 200 y, en añadidura húmeda, una pre-estabilización con 1 ó 2% de cal puede dar muy buen resultado para mejorar la adherencia entre el asfalto y las partículas de arena.

Cualquier tipo de agua dulce es aceptable tanto para la estabilización propiamente dicha, como para la compactación posterior.

La concentración de sales y la materia orgánica son contraindicadas, pues perjudican la adherencia entre el suelo y el asfalto.

Los efectos estabilizantes del asfalto ocurren a través de dos mecanismos. El primero es una liga establecida entre las partículas de suelo a través del asfalto, lo que da una "cohesión" al conjunto; el segundo es la protección del suelo contra la acción del agua. El primer mecanismo es importante sobre todo en suelos granulares, en tanto que el segundo resulta más útil en suelos cohesivos.

A continuación se establecen algunos puntos de interés sobre algunas propiedades importantes de los suelos estabilizados con asfalto y de los factores que influyen en su variación.

- **Peso Volumétrico Seco.** La figura 24 muestra la variación del peso específico seco de las mezclas con el porcentaje de asfalto que utilice. La información se refiere a estabilizaciones con asfalto rebajados. Puede verse en la parte superior de la figura cómo en términos generales el asfalto hace disminuir el peso volumétrico seco máximo a que puede legarse; esta disminución seguramente no es muy, pues la estabilización produce un mejoramiento en las propiedades mecánicas que la compensa con creces. La parte inferior de la figura hace ver que la adición del asfalto y los líquidos que lo acompañan hace disminuir la necesidad de agua para compactación, lo que pudiera ser una ventaja en lugares secos.

La adición del asfalto en forma de asfaltos rebajados lleva consigo una proporción de solventes volátiles que es importante en el comportamiento de la mezcla obtenida; cuanto mayor sea el contenido de asfalto, menor será la pérdida de resistencia por saturación, respecto al suelo no tratado y, por otra parte, cuando los solventes pasan de cierta proporción la resistencia de la mezcla, así como su peso volumétrico seco disminuyen.

Adicionalmente debe tenerse en cuenta que en emulsiones o asfaltos rebajados, el agua y los solventes se añaden a la fracción líquida, y como ya se dijo, pueden

Figura 4.1 Efecto en el peso volumétrico seco y en la resistencia a la compresión simple, del contenido de solventes en especímenes estabilizados con asfalto.

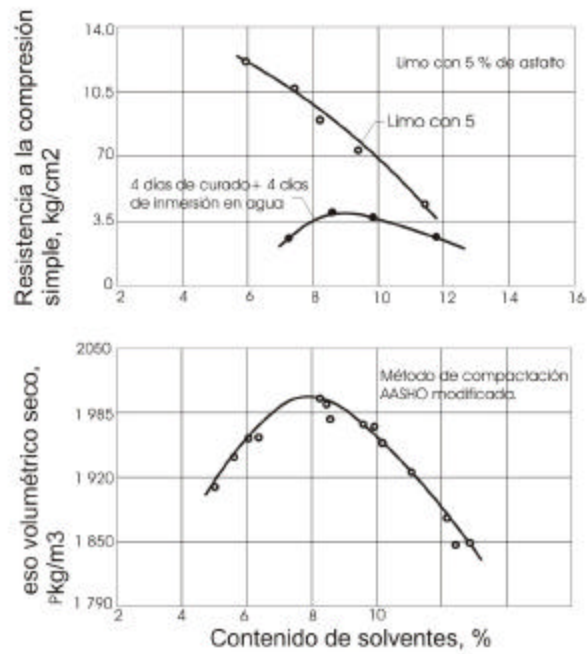
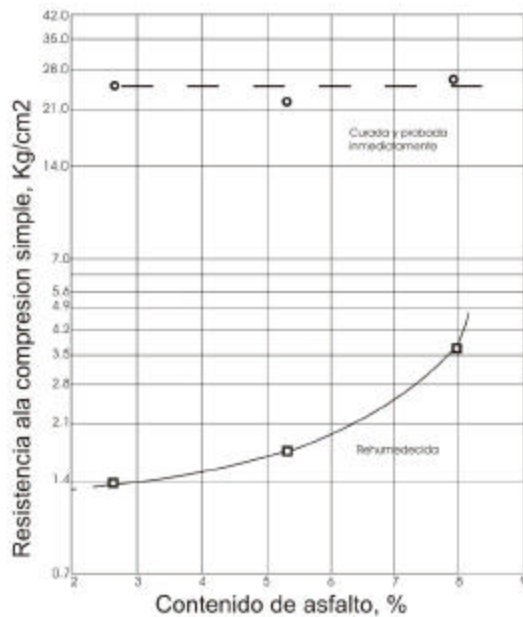


Figura 4.2. Efecto del contenido de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso, estabilizados con emulsión



Fuente: La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras Ferrocarriles y Aeropistas

aumentar inconvenientemente la humedad de la mezcla con vistas a la compactación.

La figura 25 demuestra lo anteriormente expuesto.

- **Resistencia.** Respecto al contenido de asfalto propiamente dicho, puede decirse que, en términos generales, cuanto mayor sea es mejor el comportamiento de la mezcla obtenida, dentro de los límites prácticos; Sin embargo, este mejoramiento no se refiere necesariamente a las mismas propiedades en todos los suelos. En suelos finos, el aumento del contenido de asfalto no influye en la resistencia a la compresión simple, como se puede observar en la figura 26 en la que la resistencia de un limo arcilloso, medida inmediatamente después de curada la mezcla, permanece prácticamente constante para contenidos de asfalto muy variables, se trata de una mezcla preparada con emulsión asfáltica; por el contrario, en suelos de naturaleza mas bien friccianante la resistencia sí aumenta cuando el contenido de asfalto crece, pero si este último se aumenta demasiado, la resistencia vuelve a decrecer.

Por otra parte, en los suelos finos, el contenido de asfalto sí tiene mucho que ver con el comportamiento de la mezcla ante el agua, según se muestra en la figura 25, en la que puede verse que la resistencia a que llega la mezcla del mismo limo-arcilloso y asfalto cuando es rehumedecida, sí crece con el contenido de asfalto y con un crecimiento ilimitado, por lo menos para los contenidos prácticos de dicho material. Lo anterior no quiere decir que convengan aumentar el contenido del asfalto indiscriminadamente en los suelos finos, pues si éste va más allá de un cierto valor, los solventes que acompañan a los asfaltos rebajados o el agua de las emulsiones, hacen crecer en demasía la fase líquida de la mezcla y en tal caso ésta se vuelve demasiado plástica y poco resistente.

En los suelos friccianantes, el asfalto poco añade a la estabilidad ante el agua, ya poco modificable de por sí.

La figura 26 muestra el efecto del tiempo de mezclado del suelo-asfalto en la resistencia a la compresión simple de la mezcla. Se presentan resistencias iniciales de las mezclas inmediatamente detrás del curado y resistencias tras humedecimiento. El suelo usado fue un limo arcilloso, que se mezcló con 5% de asfalto rebajado. También se presentan datos de esta mezcla y de otra a la que se le añadió 2% pentóxido de fósforo, cuyo efecto en la resistencia es notable en todos los casos.

El período de curado de las mezclas tiene importancia en sus resistencias. Cuanto mayor sea este período y más caliente la temperatura de curado es mayor la pérdida de solventes, cuando se usan rebajados. En términos generales, también se cumple que cuanto mayor sea el período de re-humedecimiento a que

Figura 4.3 Efecto del tiempo de asfalto en la resistencia a la compresión simple de especímenes de limo arcilloso, estabilizados con 5% de asfalto y sin aditivos.

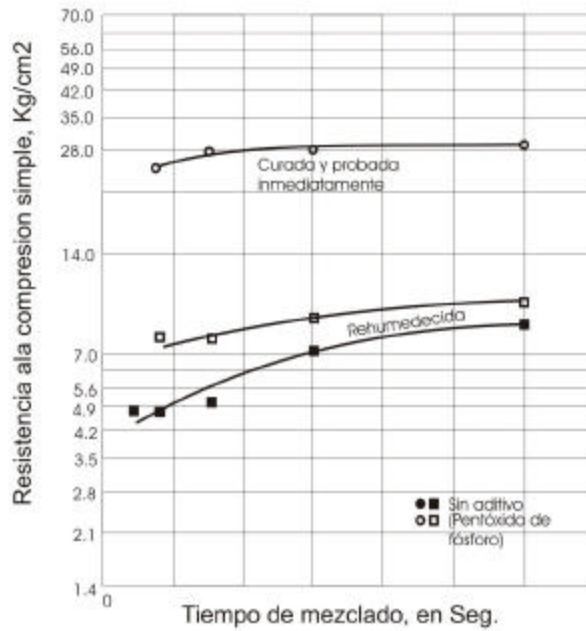
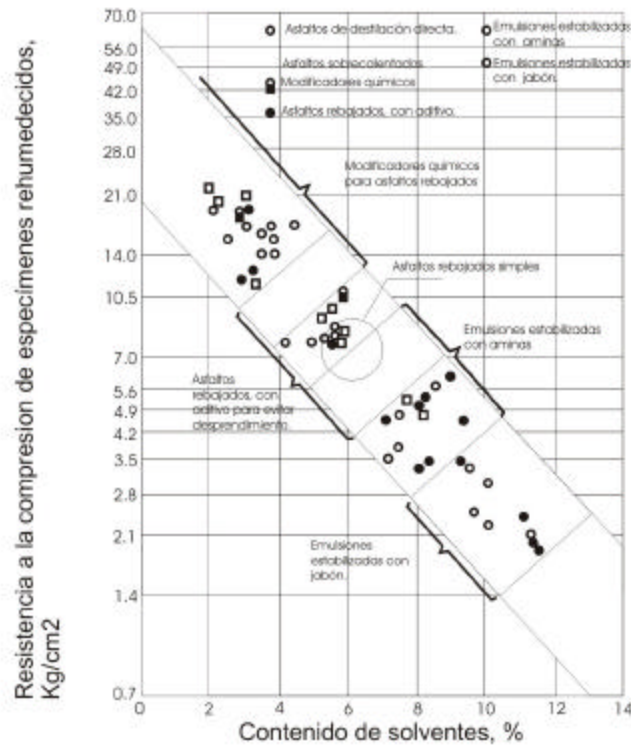
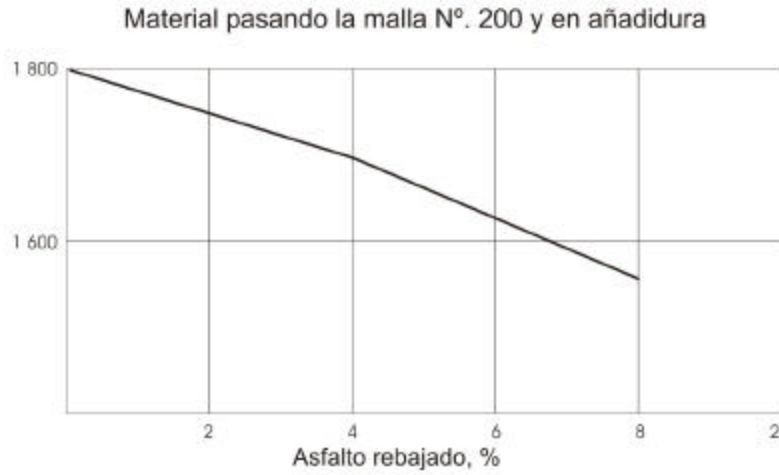


Figura 4.4 Efecto del contenido de solventes en la resistencia a la compresión simple tras un periodo de rehumedecimiento, de especímenes con productos asfálticos



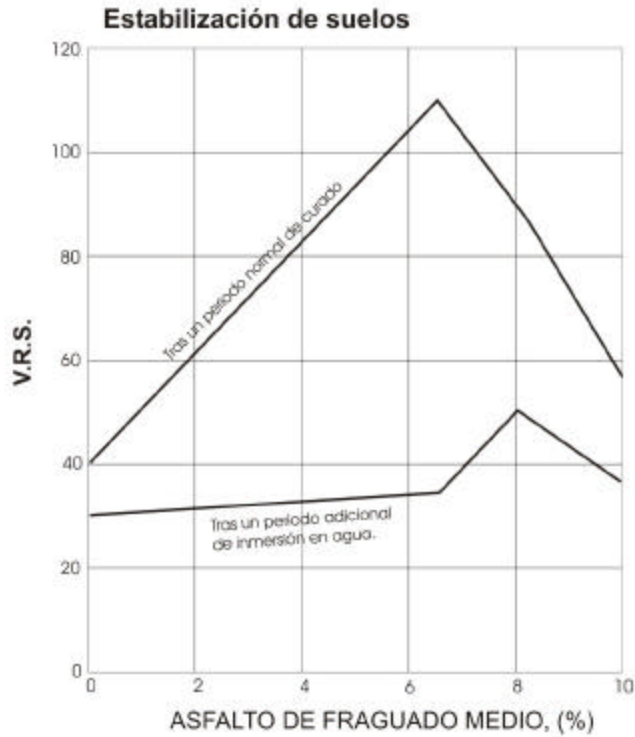
Fuente: La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras Ferrocarriles y Aeropistas

Figura 4.5 Variación de la absorción de agua con el contenido de asfalto. Especímenes de arcilla arenosa estabilizada con asfalto rebajado.



a

Figura 4.6 Variación del V.R.S. Con el contenido de asfalto, en especímenes de arena-grava, probados tras el periodo normal de curado y otro después de su inmersión en agua.



se somete la mezcla de suelo-asfalto es mayor la cantidad de agua captada. La resistencia de un suelo-asfalto es toscamente inversamente proporcional al contenido de solventes en el momento de la prueba, de manera que cuantos más solventes se pierdan mayor es la resistencia, la figura 27 recoge información a este respecto, proveniente de pruebas sobre un gran número de mezclas, preparadas de muy diversas maneras y con muy diversos suelos; puede ser considerada una correlación de tipo general y bastante confiable.

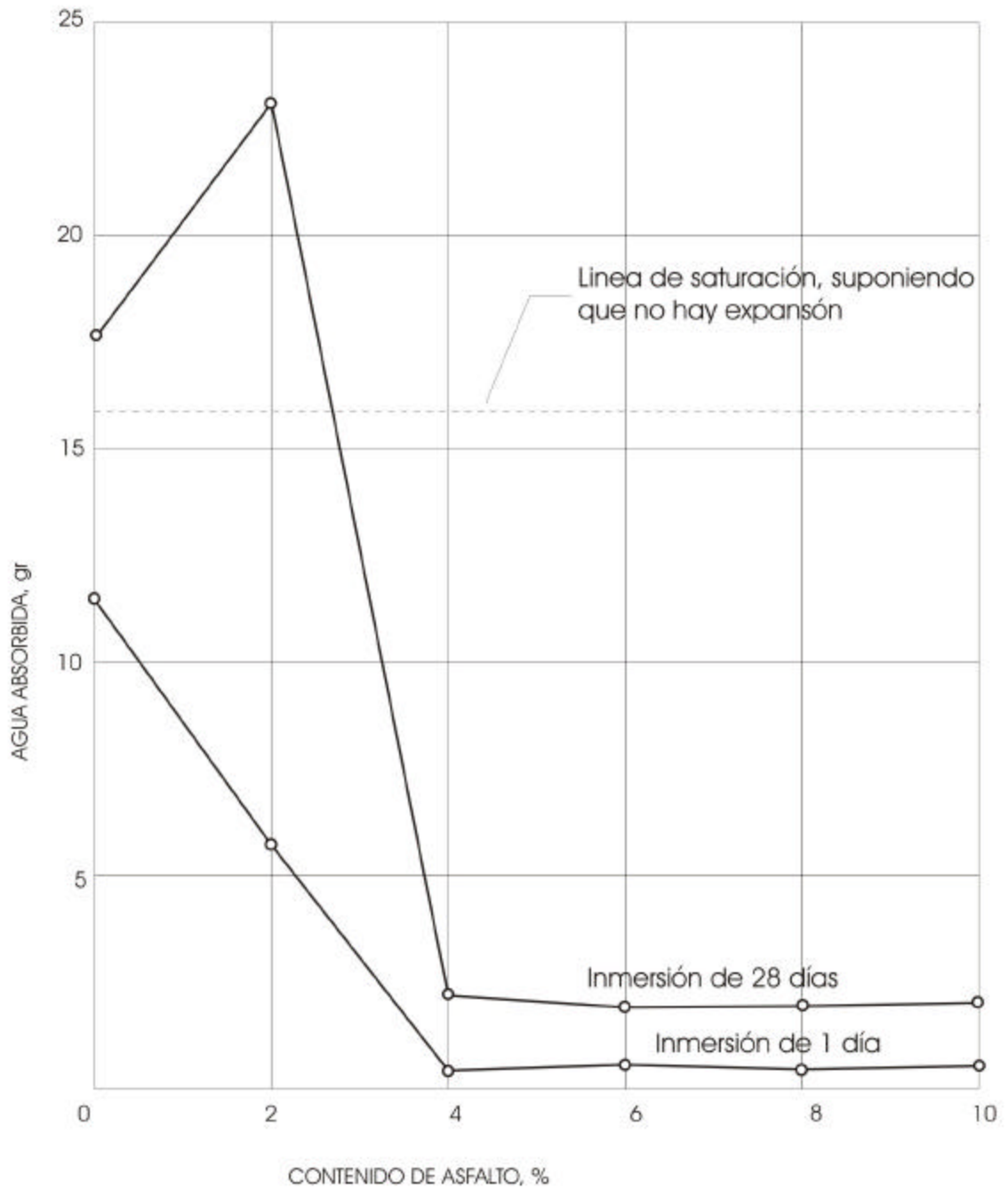
- **Valor Relativo de Soporte.** En el proporcionamiento de mezclas para la formación de capas de pavimento estabilizadas con asfalto es común, extender la utilización del método de diseño con base en el **V.R.S.**, de manera que la variación de esta propiedad tiene importancia práctica. Es normal que, en forma similar a como sucede con la resistencia a la compresión simple en suelos finos, el **V.R.S.** de la mezcla aumente con el contenido de asfalto hasta un límite, a partir del cual disminuye de nuevo. También es cierto, como ya se ha dicho anteriormente, que se buscan contenidos de asfalto relativamente altos en muchos casos, para lograr mezclas que resistan convenientemente la acción repetida del agua. Es usual tender a un contenido de asfalto que permitan alcanzar niveles razonables en ambos resultados; es decir, una resistencia adecuada y una estabilidad suficiente ante la acción del agua. Esto último trata de controlarse en el laboratorio realizando las pruebas de **V.R.S.** sobre especímenes previamente sujetos a un período de inmersión.

La figura 29 proporciona la variación del **V.R.S.** con el contenido de asfalto en una mezcla probada tras el período normal de curado y en otra probada tras un período adicional de inmersión en agua. Se trata de una arena-grava calcárea, estabilizada con un asfalto rebajado de fraguado medio.

- **Estabilidad ante el Agua.** Como ya se reiteró, esta es la característica que preponderadamente se busca al estabilizar con asfaltos a los suelos finos de naturaleza cohesiva; la figura 25 muestra cómo la estabilidad ante el agua aumenta mucho con el contenido de asfalto. En la figura 30 se presentan las experiencias de la estabilización de una arcilla arenosa con asfaltos rebajados, como corresponde a un suelo predominantemente cohesivo, la resistencia a la compresión simple resultó un tanto independiente del contenido de asfalto, aunque el contenido de arena de las muestras hace que se produzca una cierta respuesta a este factor; de hecho la resistencia a la compresión simple aumentó un 40% para el contenido de óptimo de asfalto, en comparación a la de la arcilla arenosa natural original.

Por otra parte se puede observar el fenómeno comentado anteriormente, según el cual cuando aumenta el contenido de asfalto aumenta la estabilidad de la mezcla ante el agua, hasta el grado en que los solventes que acompañan al asfalto

Figura 4.7 Variación de la absorción de agua con el contenido de asfalto. Especímenes de arcilla arenosa estabilizada con asfalto rebajado.



Fuente: La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras Ferrocarriles y Aeropistas

rebajado hacen crecer en demasía la fase líquida de la mezcla y la tornan excesivamente plástica y poco resistente; evidentemente este grado representa un límite adelante del cual no conviene ir, pues lo que se gana en estabilidad resulta compensado por lo que se pierde en resistencia.

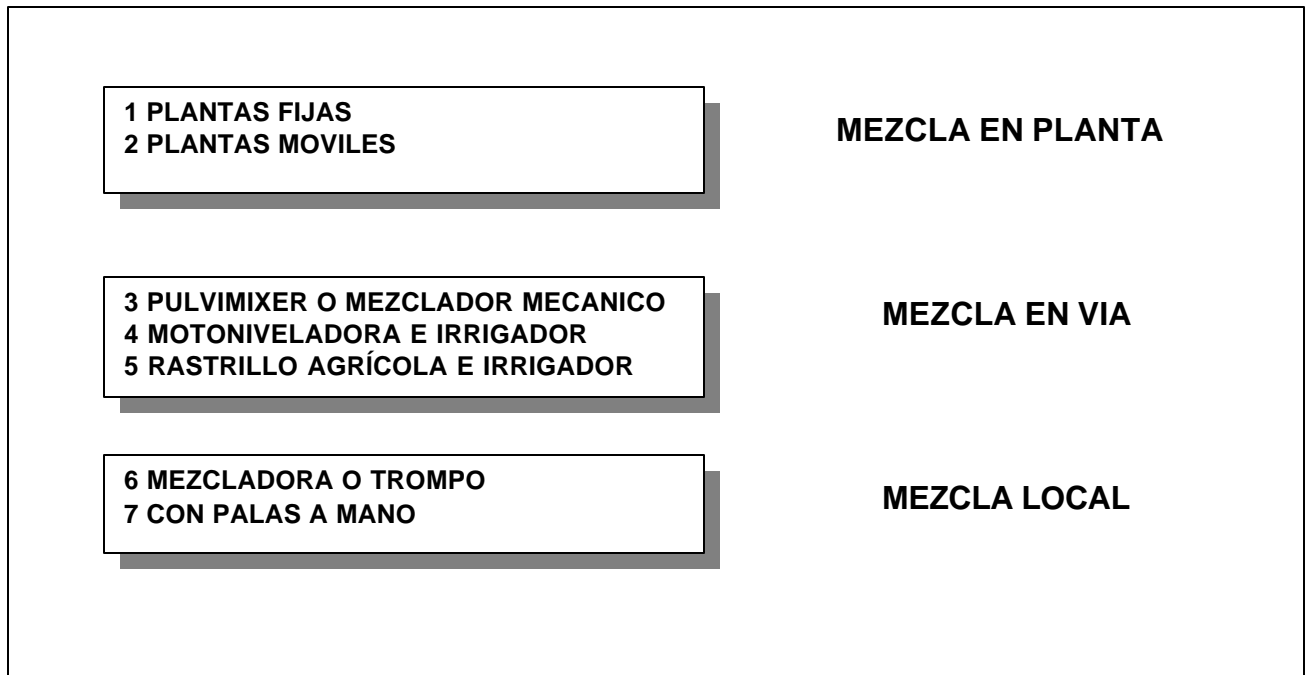
En el caso de esta investigación se vio que contenidos de asfalto arriba de un 8% ó 10% resultaban francamente indeseables por estos motivos. Pero en lo que se refiere a la estabilidad ante el agua únicamente, medida ésta por la absorción de las muestras en períodos de inmersión, si se observa que contenidos muy altos de asfalto siguen proporcionando buena estabilidad. La figura 30 muestra la absorción de agua de dos especímenes, con períodos de inmersión de 1 y 28 días, en relación con el contenido de asfalto que se dio a la arcilla arenosa, suelo con el que se hizo la investigación; el asfalto utilizado fue un rebajado de fraguado medio.

4.9 PROCEDIMIENTOS DE CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción de las capas de un pavimento, ya sean éstas estabilizadas para capas intermedias, de nivelación o rodadura obedece al siguiente proceso:

4.9.1 Elaboración de la mezcla. Las mezclas con asfalto líquido, exigen agregados secos o con una humedad máxima del 3%, esta condición es mucho más importante cuando los agregados contienen algo de plasticidad, de tal manera que la humedad es un factor que se debe cuidar tanto en la fabricación de la mezcla, como después de elaborada, esta última circunstancia se puede controlar cubriendo la mezcla con plásticos o dejándola bajo cubierta, previniendo así la inestabilidad que se puede presentar durante la compactación y en su servicio.

Los equipos que se pueden usar para el mezclado de los materiales dependen de las necesidades y magnitudes de cada proyecto; el crudo de Castilla al igual que en los asfaltos líquidos tradicionales permiten usar todos los equipos convencionales tales como se muestran en el siguiente cuadro:



Las siete alternativas propuestas demuestran la versatilidad de manejo en asfaltos líquidos y su aplicación en lugares y proyectos remotos de diferente índole.

El proceso de elaboración de la mezcla puede hacerse de tres maneras distintas

- **Mezcla en planta.** El mezclado por medio de una Planta Fija garantiza una buena dosificación del ligante, un buen manejo de la granulometría y la condición de humedad y una mezcla homogénea.

En este proceso, el ligante bituminoso se debe calentar entre 70 y 80 °C y los agregados pueden secarse usando una temperatura igual o mayor en 10 °C, estas condiciones de temperatura favorecerán el rendimiento de la mezcla y disminuirá el tiempo de curado.

El mezclado con planta móvil se realiza directamente en la vía y dependiendo del equipo que se disponga éste puede recibir el agregado desde las volquetas, dosificar el crudo, mezclarlo y extenderlo o bien levantar el agregado previamente dispuesto en un cordón, dosificar el crudo, mezclarlo y extenderlo en capas o en un cordón.

- **Mezcla en vía.** Otro procedimiento ampliamente conocido y practicado es la mezcla en vía, que sin lugar a dudas representa un medio para trabajar en zonas aisladas o en aquellos proyectos que por su magnitud no necesitan la instalación de la planta.

El uso del Pulvimixer requiere del acordonamiento del agregado y dependiendo si el equipo tiene o no dispensador de ligante incorporado se requerirá carrotanque.

4.9.2 Curado de la mezcla. La pérdida de solventes de la mezcla asfáltica se va a ver beneficiada por temperaturas altas, aireación y por la cantidad de ligante aplicado, a esta gasificación de los solventes se denomina “curado” que puede realizarse una vez elaborada la mezcla, o una vez extendida o medianamente compacta, pero la experiencia internacional indica que un proceso de compactación debe iniciarse cuando el ligante haya perdido el 50% de sus solventes en una mezcla para pavimento nuevo o cuando haya perdido el 25% si se trata de una mezcla para parcheos.

4.9.3 El extendido de la mezcla en frío. Dependiendo de la importancia del proyecto y del equipo disponible, la mezcla en frío con asfalto líquido se puede extender con uno de los siguientes métodos:

- Con Finisher o terminadora de pavimentos.
- Con el Pulvimixer.
- Con la Planta Móvil.
- Con la Motoniveladora.
- Con Pala o con Llana metálica o de madera.

La edad de la mezcla para extenderla depende del clima que se registre en el proyecto. En buen clima, sin amenaza de lluvia y temperaturas superiores a 10 °C, la mezcla se puede extender inmediatamente después de elaborada o en otra circunstancia la mezcla se puede airear para que pierda solventes hasta el 50% o 25% según indique el proyecto. Las mezclas se dejan extender y perfilar sin riesgo a que pierdan manejabilidad en un tiempo suficiente como para garantizar un buen trabajo. Durante el proceso de curado las mezclas deben cubrirse para evitar que el agua pueda inestabilizarlas.

El acabado final dependerá de la gradación y de la buena operación del equipo, en ese punto debe evitarse la segregación y la tersura, que no debe exceder de 10 mm en la regla de 3 mts.

4.9.3 La compactación. Las mezclas asfálticas con el asfalto líquido natural de Castilla son fácilmente compactables con los equipos liso que generalmente se usan en pavimentación, este proceso se puede hacer diariamente para cerrar paulatinamente los vacíos y la textura cuando la mezcla haya sido extendida sin curado o puede llegar a la densidad final dada en cada proyecto cuando la mezcla haya perdido el 50% o 25% de sus solventes.

4.9.4 Puesta en servicio. Como se entiende que la mezcla va ganando resistencia a los esfuerzos y deformaciones a medida que pierde los solventes, y que, además, el 17% que contiene el asfalto líquido de Castilla son de diversa composición, que algunos y en poca cantidad serán prácticamente no volátiles es necesario realizar diferentes pruebas en el laboratorio y en el campo si es posible sobre muestras sueltas y compactas para conocer la capacidad de perder solventes vrs. la resistencia medida por compresión simple o la estabilidad Marshall, de esta forma se podrá controlar mejor el tiempo de puesta en servicio.

4.10 OPERACIÓN DE CONTROL Y ESPECIFICACIONES

Básicamente el control de calidad que se debe llevar a cabo se puede resumir así:

EVENTO	CONTROL
Riego de Imprimación :	Condición de Temperatura Ambiente Temperatura de Aplicación del Crudo Cantidad Aplicada Condición del Equipo Condición Climática (a cielo abierto)
Mezcla :	Gradaciones Temperatura de aplicación del Crudo Humedad del Agregado Homogeneidad de Mezcla
Extendido :	Condiciones Climáticas Pendiente Longitudinal Pendiente Transversal Segregación Tersura con regla de 3 mts. Espesor
Curado :	Pérdida de solventes vs. Resistencia
Compactación :	Grado de Compactación Homogeneidad del Proceso Textura

EVENTO**CONTROL**

Puesta en Servicio : Tránsito dirigido por 8 días después de que la mezcladora haya perdido el 50%.

5. GENERALIDADES DE ESTABILIZACIÓN CON PRODUCTOS DIVERSOS

Hasta ahora se han tratado los tipos de estabilización más frecuentes como son las realizadas con cal, cemento Pórtland y productos asfálticos, sin embargo, en la actualidad se han probado un gran número de productos químicos con este fin, la mayoría de ellos con resultados satisfactorios, sin embargo, detallar todos estos productos nos llevaría a un texto sumamente extenso, por tal razón se ha considerado conveniente cubrir con cierto detalle los más utilizados como son las sales, bases y silicatos y en forma más general algunos otros productos menos comunes.

5.1 ESTABILIZACIÓN CON SALES.

La sal se forma en la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir, que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni básicos de hidroxilo (OH^-). Se designan como sales ácidas a las que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) y a las que contienen exceso de iones de hidróxilo se la designa como sales básicas.

Se ha estudiado un gran número de sales (NaCl, CaCl_2 , NaNO_3 , Na_2CO_3 , BaCl_2 , MgCl_2 , KCl), pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen unas cuantas, siendo las más comunes el cloruro de sodio y el cloruro de calcio. Estas sales se han empleado con mucho éxito en carreteras desde hace unos 60 años.

5.1.1 Estabilización con cloruro de sodio. El cloruro de sodio se produce mediante 3 métodos. El más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y el método más reciente consiste en la evaporación del agua mar mediante el empleo de hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se les consigue en el mercado constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza (la ASTM y la AASHTO han fijado especificaciones al respecto).

Con la adición de sal al agua, se puede abatir la temperatura de congelamiento de esta última. Se han reportado casos en los que el empleo de 2 a 3 % de sal abatió el punto de congelamiento de un suelo hasta en -22°C .

Las soluciones que contengan cloruro de sodio disuelto, presentan una mayor tensión superficial que en el caso del agua destilada (al 1% de sal se incrementa la tensión superficial en 1 a 2 dinas/cm²). Así mismo, la adición de sal al agua abate la presión de vapor.

Los cambios en el agua debido a la adición de sal, tanto en el punto de congelación como en la tensión superficial y la presión de vapor, dependen de la solubilidad de la sal, es decir, que a medida que se diluya mas sal las propiedades referidas se ven más afectadas. Sin embargo, si la sal se adiciona al agua en pequeños porcentajes, ésta se disuelve rápidamente, pero a medida que el porcentaje adicionado va siendo más elevado, la sal se disuelve con más dificultad y se tendrá un cierto porcentaje mas allá del cual la sal ya no se disuelve. Por ejemplo en 100 cc de agua a 0°C sólo se disuelven 36 gramos de sal, mientras que a 100°C se disuelven 40 gramos aproximadamente.

Aunque aparentemente no existe controversia en lo que respecta a las modificaciones que producen la incorporación de sal a un suelo, sí existe en lo referente a los mecanismos internos de estabilización, por lo que en todo estudio se deben involucrar tanto aspectos físicos como químicos.

Es esencial conocer las fuerzas que se presentan entre las partículas así como los procesos de intercambio catiónico, para entender la estabilización química de suelos, por tal razón a continuación se presenta una breve explicación de ambos aspectos.

La mayoría de las partículas arcillosas presentan una carga eléctrica descompensada en la superficie por lo cual atraerán algunos iones de los existentes en el líquido que la rodea. Por otra parte existen en la superficie de las partículas arcillosas una doble capa de iones adsorbidos, en el cual la energía potencial existente se disipa a partir de dicha superficie, hasta que a una cierta distancia se obtenga el mismo potencial que en el líquido circundante. La magnitud de este potencial se puede expresar por una cantidad designada como:

$$Z = \frac{4Qd}{AK}$$

En donde: Q es la carga eléctrica
 d es el espesor de la doble capa
 A es el área superficial
 K es la constante dieléctrica

De los anteriores, el único parámetro que se puede modificar es el espesor de la doble capa, lo cual se logra incrementando la concentración del electrólito en el agua de mezclado y sustituyendo iones de valencia alta por iones de valencia menor (por ejemplo Ca^{++} por iones de Na^{+}) en la superficie de la partícula de arcilla. Debido a que los iones con cargas iguales se repelen, incrementando la concentración electrolítica se comprime la doble capa replegándose gradualmente hacia la superficie de la partícula. Al sustituir iones de valencia superior por iones de valencia menor en la superficie de una partícula de arcilla se tendrán, a final de cuentas, menos iones susceptibles a crecer (por rodearse de moléculas de agua) sobre dicha superficie y en consecuencia se reduce el espesor de la doble capa. Tomando en cuenta la fórmula anterior se ve que al decrecer el espesor de la doble capa disminuye el potencial y en consecuencia, decrecen las fuerzas de repulsión entre las partículas, presentándose el efecto opuesto al aumentar el espesor de la doble capa.

Cuando las partículas se encuentren rodeadas por cargas del mismo signo se repelen; pero si algunas de las partículas o parte de ellas tienen carga opuesta entonces se desarrollan fuerzas de atracción. Se ha observado que si el medio que rodea a estas partículas es ácido, o sea, con un bajo PH, entonces los bordes de las partículas tienden a cargarse en forma positiva, en tanto que las caras permanecen con carga negativa, por lo que resulta una floculación de las caras de unas partículas con los bordes de las otras. En un medio básico, o sea, con un PH alto, tanto los bordes de las caras tienden a quedar con cargas negativas y la estructura puede quedar en forma dispersa.

Cuando se trata de fuerzas en las partículas arcillosas, no deben descartarse las debidas a otros efectos como las de Van der Waals, sin embargo, este tipo de fuerzas según se ha encontrado revisten una influencia secundaria cuando se trata de las reacciones durante una estabilización.

Como bien es sabido el intercambio iónico es la sustitución de un ión adsorbido en la superficie de la partícula por otro. En las partículas arcillosas el tipo de intercambio importante es el catiónico (intercambio de iones positivos) debido a que las superficies de las partículas están cargadas negativamente. Como es fácil deducir, la capacidad de intercambio catiónico se ve afectada por los tipos y porcentajes de minerales presentes en el suelo.

Es conveniente tener en cuenta que la materia orgánica también exhibe reacciones de intercambio catiónico por lo que ésta es tan importante en la estabilización de suelos, a tal grado que si la materia orgánica se encuentra en forma de partículas muy pequeñas su capacidad de intercambio catiónico es muy alta, alcanzando a ser varias veces superiores a las de la arcilla. Más aún, se ha encontrado que los cationes orgánicos tienden a reemplazar los cationes inorgánicos presentes en la superficie de las partículas arcillosas y producen un efecto reductor en la capacidad de intercambio catiónico en la arcilla.

Se ha discutido mucho respecto al cambio en el peso volumétrico de una arcilla con la adición de cloruro de sodio, pues mientras algunos investigadores aseguran un pequeño incremento, otros no han encontrado tal cosa; pero en lo que sí parece existir un común acuerdo es en que la adición de sal hace que se disminuya la humedad óptima. Se admite también que teóricamente el cloruro de sodio ocasione que la arcilla se estructure en forma dispersa, produciéndose así un acercamiento entre partículas y en consecuencia un mayor peso volumétrico, pero en la práctica este criterio no se ha verificado en todos los casos, por lo cual no se debe generalizar.

El cloruro de sodio ayuda a reducir los cambios de humedad en los suelos, pero existe una gran controversia en lo que respecta al orden de magnitud de ésta reducción. Se considera que se reduce la evaporación del agua debido al incremento en la tensión superficial, al agregar la sal, sin embargo, cuando la aportación de agua a la superficie expuesta es menor que la evaporación, la superficie se empieza a secar y el cloruro de sodio se cristaliza en la superficie y en los vacíos, lo que puede ayudar a formar una barrera que impedirá posteriores evaporaciones; inclusive se han obtenido relaciones que indican que la velocidad de evaporación es inversamente proporcional al espesor de la barrera referida, al saturarse esta barrera, nuevamente, se disuelve y es arrastrada hacia abajo, con lo que la arcilla al perder su estabilizante se expande y retarda el movimiento del agua en el suelo.

A este respecto se considera importante mencionar que en la estabilización de suelos con diferentes productos es responsabilidad del proyectista el tratar de conocer en forma anticipada la probable respuesta que se tendrá en la estabilización, así como los efectos de repercusión de éste en algunos otros aspectos. Por ejemplo en el caso del empleo de cloruro de sodio se han tenido en México aplicaciones exitosas, como en las terracerías de las salinas de Guerrero Negro California, en donde éstas están constituidas por arena de mar compactadas por agua de mar y cuya condición salina se mantiene siempre constante. Pero existen otras experiencias como las de las aéreo pistas de Loreto e Islas Marías, cuyas bases fueron compactadas con agua de mar y los tratamientos superficiales posteriormente colocados, se han desprendido formando ámpulas que se destruyen fácilmente por los efectos abrasivos de las llantas, se tiene noticias de que en algunos otros casos, en que se ha adicionado sal a una arcilla para compactarla, ésta ha aumentado de volumen.

En los casos de Loreto e Islas Marías parece que la solución fue el empleo de una carpeta de mezcla en el lugar, es decir, de un espesor de cierta consideración sobre los materiales estabilizados con sal. Se tiene noticia de que la aplicación de la sal, ha evitado los efectos expansivos de algunas arcillas; en otras ocasiones se ha evitado la formación de tolvánas en los aeropuertos con la aplicación de sales. De lo anterior se debe deducir tanto la importancia que tiene el conocimiento de la reacción íntima entre la sal y el suelo, así como la permanencia

a través del tiempo de la estabilización lograda y sus efectos colaterales que causaría, en algunos otros elementos de la estructura del camino.

Se ha encontrado que los efectos en la adición de cloruro de sodio a una arcilla son muy diferentes en lo que respecta a la plasticidad, estimada ésta mediante los límites de Atterberg, y que existe gran dependencia de los tipos de minerales presentes en la arcilla. Se logra mayor efectividad y durabilidad de los efectos de la sal a medida que el límite líquido es más alto. En términos generales, salvo algunas excepciones, se puede decir que la adición de sal produce en una arcilla, un decremento en la contracción volumétrica o lineal. Estos cambios físicos, la formación de la costra superficial y la reducción de la variación en la humedad, mantienen más unidas las partículas no arcillosas y cuando estas se encuentran en la superficie, se desprenden con menor facilidad cuando sufren los ataques abrasivos del tránsito.

En lo que respecta a la resistencia también se ha tenido una gran controversia. Se ha asegurado, por ejemplo, que se tiene un incremento en la resistencia solamente en la medida que se incremente el peso volumétrico a contenidos bajos de humedad. Existen casos, por ejemplo los de las arcillas sensitivas de origen marino en donde percolando una solución salina a través de ellas se logra un fuerte incremento en la resistencia.

En forma definitiva se ha visto que la adición de sal a un suelo reduce el problema de congelamiento. Se ha utilizado mucho el cloruro de sodio con el fin de evitar, en caminos revestidos la formación de polvo, pero esta acción ha sido también muy rebatida y el grado de éxito obtenida depende nuevamente del tipo de minerales que contenga el suelo y se pone de manifiesto por la unión de unas partículas finas con otras mediante la formación de agentes cementantes, sin embargo, hay algunos investigadores que aseguran que no existe tal cementación; otros investigadores indican la formación de coloides que sirven de cementantes o bien en el caso de rocas carbonatadas, se asegura que la solución salina las disuelve, precipitando después esta solución, formando carbonatos que cementan a las partículas menores, y de hecho en suelos calcáreos, la adición de sal se ha traducido en un notable incremento de resistencia.

De todo lo hasta aquí mencionado, se puede concluir que el empleo de la sal puede producir efectos difíciles de predecir, por lo que se recomienda la asesoría de técnicos especializados en este tipo de estudios, y efectuar éstos tomando en cuenta las condiciones de la obra.

Las técnicas empleadas para la incorporación de sal a un suelo son generalmente las mismas empleadas en otros tipos de aditivos y varían desde la sofisticada mezcla en planta con alto grado de control, hasta la simple mezcla en el lugar realizada con el equipo tradicional en la construcción de pavimentos.

Si se desea utilizar el equipo tradicional los pasos a seguir son:

- Escarificación
- Disgregación
- Adición del cloruro de sodio
- Adición del agua
- Mezclado con motoniveladora
- Tendido y compactación

Cuando el mezclado se hace en planta ha sido práctica común adicionar la sal en forma de solución. La práctica actual se inclina preferiblemente por este último método siendo los puntos que requieren la mayor atención la correcta dosificación, el mezclado total y la compactación adecuada, pudiéndose lograr una gran efectividad en esta última operación con el empleo de rodillos neumáticos seguidos por una compactación de cerrado empleando rodillos lisos.

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

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

5.1.2 Estabilización con cloruro de calcio (CaCl_2). El cloruro de calcio se obtiene como un subproducto en forma de salmuera en algunos procesos industriales, aunque también se pueden obtener de algunos arroyos y pozos naturales siendo la fuente más común el obtenido en la elaboración de carbonato de sodio mediante procedimientos químicos. El cloruro de calcio se expende en forma de hojuelas, o en forma de partículas redondeadas con diferentes grados de pureza.

La solubilidad del cloruro de calcio es de 60 gramos aproximadamente por cada 100 cc de agua destilada a 0°C , o e 159 gr. Aproximadamente por cada 100 cc de agua a 100°C . Esta sal es tanto delicuescente como higroscópica y aunque no impide en forma apreciable la evaporación, si repone en forma relativamente

rápida el agua evaporada al encontrarse ésta presente en humedad ambiente. La presencia del cloruro de calcio como solución en el agua, disminuye la evaporación de ésta, aunque con menos intensidad que en el caso del cloruro de sodio. Así mismo, el cloruro de calcio hace que se incremente la tensión superficial en el agua lo cual reduce un poco la evaporación. Por cada 1% de cloruro de calcio adicionado al agua, se reduce el punto de congelación de ésta en 6°C.

En el caso de la estabilización con cloruro de calcio parece haber mayor acuerdo entre los investigadores, en lo que respecta a los mecanismos de estabilización, que en el caso de cloruro de sodio. La opinión predominante es que en dichos mecanismos se presenta el intercambio catiónico cuando se trata de arcillas, lo cual puede ser fácilmente puesto en evidencia mediante mediciones del PH, que se abate al presentarse dicho intercambio. La adición de cloruro de calcio disminuye las fuerzas de repulsión entre las arcillas, pero hay autores que aseguran que la película de agua que rodean a las partículas se ven eléctricamente reforzadas con la adición de cloruro de calcio a tal grado que se incrementa notablemente la cohesión aparente. Como el intercambio catiónico se sustituye en un ión Ca^{++} por dos iones de Na^+ , la doble capa se ve reducida en su espesor y como se vio en el caso del empleo de cloruro de sodio, esto hace que se reduzca las fuerzas de potencial eléctrico y en consecuencia se reduzcan las fuerzas de repulsión entre partículas. Por otro lado, si durante la reacción del cloruro de calcio con la arcilla se produce ácido clorhídrico, entonces puede suceder que los iones de Ca^{++} reemplacen a iones de Al^{+++} lo que disminuye las fuerzas de repulsión provocando con ello mejores ligas entre las partículas. La mayoría de las referencias de este campo, han indicado un incremento de los pesos volumétricos hasta en un 11% con la adición de 0.5 a 3% de cloruro de calcio, según el tipo de suelo. Sin embargo, existen algunas referencias que reportan reducciones en el peso volumétrico con respecto a un suelo arcilloso que no contenga cloruro de calcio.

Se considera que nunca se dará el suficiente énfasis a la importancia decisiva que tienen los minerales existentes en el suelo y su proporción en la estabilización, pues son numerosos los investigadores que reportan un pequeño porcentaje, por ejemplo 1% de cloruro de calcio incrementa en forma muy notable el peso volumétrico, pero un incremento leve más allá de este porcentaje, por ejemplo de 0.5%, produce efectos contrarios. Se ha sugerido, para avalar lo anterior, que la adición de cloruro de calcio en una proporción pequeña, une las partículas al contrarrestar las repulsiones negativas, así como al formarse uniones tipo valencia; sin embargo, si se añade el cloruro de calcio en exceso se rodean todas las partículas de cargas positivas presentándose ahora una fuerza de repulsión que las separa.

El cloruro de calcio ayuda a mantener constante la humedad en un suelo pero desgraciadamente esta sal es fácilmente lavable. Se reduce la evaporación y es

capaz, el cloruro de calcio, de absorber hasta 10 veces su propio peso cuando las condiciones de humedad son altas en el medio ambiente, pudiéndose mantener dicha humedad en sus dos terceras parte durante un día de calor seco, lo que hace de esta sal un producto muy eficaz cuando se trata de evitar la formación de polvo en las terracerías si las condiciones climáticas son favorables. Se ha empleado la prueba de CBR para evaluar la estabilización con esta sal y para bajas energías de compactación el aumento en el valor de CBR ha sido muy notable, no así cuando la energía de compactación es alta; esto último se ha verificado sobre todo en gravas con pocos finos. Se han reportado incrementos del CBR, hasta del 600% con el empleo de este tipo de sal. Lo anterior, sin embargo, no ha sido verificado en todos los tipos de suelos, pues se ha puesto en evidencia que de 21 tipos de suelos finos de origen glaciario, compactados con diferentes porcentajes de cloruro de calcio, la mayoría manifestaron valores bajos de CBR que en el caso de no emplear la sal, aún en el caso de que se incrementara el peso volumétrico, por lo que se demostró una vez más, la importancia del conocimiento de los minerales que contenga un suelo, así como de sus probables reacciones con la sal.

En lo que respecta a la plasticidad de los suelos, los estudios que se han realizado indican una gran variedad de respuesta, dependiendo del tipo de suelo, aunque en general las investigaciones realizadas sobre el tema, reportan que dichos cambios son muy pequeños sino despreciables.

Se ha encontrado que un 2% de sal adicionada a un limo, material sumamente susceptible a la acción de congelamiento, abate dicha susceptibilidad en forma muy considerable, obteniéndose estos mismos efectos con 1% en arcillas y 0.5% para gravas con finos. Por desgracia las investigaciones en este tema no indican la forma de determinar con precisión la cantidad de cloruro de calcio necesaria para estabilizar un suelo y menos aún para predecir el período en que dicha estabilización sea efectiva, debido a que esta sal es fácilmente lavable. Sin embargo, se ha reportado que si bien es cierto que la sal se lava, en los períodos de evaporación dicha sal tiende a ser arrastrada hacia la superficie y nuevamente produce los efectos ya referidos. Se tiene noticia también de que el empleo de sales puede hacer que se saturen algunas zonas con los consecuentes problemas. No obstante, es costumbre un tanto generalizada no adicionar más de 1% de cloruro de calcio al suelo que se pretende estabilizar. Sin embargo, esto en cada caso será decidido por un estudio especial en donde se involucre inclusive al factor económico.

En lo que respecta a los procedimientos de construcción puede explicarse lo ya mencionado para el caso de cloruro de sodio.

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

- Que en el medio ambiente se tenga una humedad relativa o superior al 30%.
- Que se tengan minerales que pasen la malla 200 y que estos reaccionen favorablemente con la sal.
- Que el nivel freático no se encuentre a distancias que provoquen la emigración de la sal.

5.1.3 Estabilización con silicato de sodio. El silicato de sodio pertenece al grupo de compuestos químicos que poseen un amplio intervalo en sus propiedades físicas y químicas. Se le ha empleado como adhesivo, cementante, detergente, defloculante catalizador, etc. se le produce con diferente grado de alcalinidad, tamaño de partícula y pureza. Se obtiene de materiales con alta proporción de sílice tratados con sales de sodio y agua. Se prepara el silicato de varias formas entre las cuales se destacan las llamadas como “proceso en húmedo” en el que se incluyen soluciones de inclusorio o tierras de diatomeas en hidróxidos alcalinos; en estos procesos se obtiene un producto relativamente impuro. Las reacciones aludidas pueden expresarse como sigue:



También se ha obtenido el silicato de sodio mediante la reacción del hidróxido de sodio con los residuos obtenidos en la extracción de metales como el aluminio, berilio y tungsteno. La mayoría de los silicatos de sodio se obtienen de la fusión de una cierta arena con carbonato de sodio a altas temperaturas. El producto obtenido es un vidrio fundido al que se le puede permitir su solidificación y posterior molienda al tamaño deseado, o bien se puede disolver a dicho vidrio mediante la aplicación de vapor a alta presión para obtener la consistencia líquida de diferentes concentraciones.

Se expende en el mercado un gran número de variedades de silicato de sodio, variando fundamentalmente en la relación

$$R = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$$

Siendo el más comúnmente empleado el que presenta una relación de “R” de 3.22.

El silicato de sodio en solución es incoloro e inodoro y actúa, en términos generales, como un jabón fuerte, y causa mucho daño a los ojos si se llegase

a introducir en ellos; se considera como no tóxico pero si se le traga puede producir dolores y vómitos.

Debe guardarse al silicato de sodio en recipiente herméticamente cerrado. Los recipientes deben ser de acero inoxidable o de otro material no reactivo; si se emplea recipientes de aluminio, lámina galvanizada, o zinc, se tiene la posibilidad de que se forme gas de hidrógeno que al expandirse puede romper los recipientes. El silicato de sodio puede atacar lentamente al vidrio, absorber dióxido de carbono de la atmósfera o bien perder agua por evaporación.

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

Todos los silicatos de sodio son alcalinos, y si se les mezcla en una solución con un material ácido, la mezcla obtenida se volverá lechosa e iridiscente. Si la concentración sílice es superior al 1 o 2%, se precipita ácido silícico y ocurre la formación de un gel (masa coherente elástica formada por floculación de una solución coloidal). Las soluciones con concentraciones menores de sílice producen un sol (suspensión de partículas sólidas de dimensiones coloidales en un líquido) cuyas partículas coloidales hidratadas adquieren en general carga negativa.

Las propiedades del gel formado, tales como la resistencia, durabilidad y permeabilidad son muy variables y dependen de factores como la concentración de la solución, la relación Na_2/SiO_2 , temperaturas y tipos de ácidos, sales o base que intervengan en la reacción.

Varios investigadores han reportado desde 1945, la efectividad del silicato de sodio como estabilizante de suelos; algunas veces se le empleó solo y otras veces junto con otros productos químicos. Sin embargo, parece ser, como anteriormente se expuso, que los éxitos logrados fueron para el caso de suelos arenosos y en climas moderados si se emplea nada más el silicato de sodio, ya que para otros tipos de suelos se requiere el empleo de otros productos químicos adicionales.

Debido a que el proceso de la formación del gel referido no es del todo conocido, ha resultado imposible establecer con precisión la reacción que se realiza entre el suelo y el silicato de sodio; se ha establecido que éste reacciona con algunos minerales arcillosos pero sin explicar cómo se realiza dicha reacción.

Lo que sí se ha podido comprobar, es que el silicato de sodio se puede utilizar para trabajos de estabilización de suelos cuando también se tiene la presencia de sales de calcio diluidas en el agua, pues esto origina silicatos gelatinosos de calcio insolubles, los cuales al hidratarse producen un magnífico agente cementante. El efecto de la adición de un silicato a cierto tipo de suelos, ha sido el de incrementar

la permanencia del agua de compactación, aumentar la resistencia al disgregado, abatir el índice plástico y la expansión. Algunas evidencias indican que en la reacción del silicato de sodio con el suelo se presenta un intercambio aniónico, dando como resultado la formación de corazas de silicatos insolubles alrededor de las partículas de suelo, aparejado esto a una acción cementante entre las partículas; Algunas otras veces se ha establecido que el silicato se precipita formando una matriz continua, en la que se presenta una liga iónica fuerte y rígida entre las partículas de suelo y el estabilizante. Algunos estudios han puesto de manifiesto que en las arcillas poco activas como la caolinita, la aplicación del silicato de sodio las hace menos activas, pasando lo contrario con las arcillas de alta actividad como las montmorillonitas.

Se tiene conocimiento de algunos estudios de estabilización efectuados con arcillas puras, pero parece ser que en cuanto a resistencia los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios. En cambio, en el caso de arenas, los resultados han sido alentadores; Inclusive se han reportado que cantidades tan pequeñas como 2.5 % de silicato de sodio han producido, en arenas y suelos arenosos, incrementos de las resistencias muy notables y hasta del orden de 100 kg/cm², mientras que con cemento Pórtland aplicado en un 10% las resistencias fueron del orden de 90 kg/Cm²; También se ha notado que resulta muy benéfico un periodo muy largo de curado.

En algunas ocasiones el silicato de sodio ha sido empleado en proporciones de 1 a 3 % en arenas para formar una costra superficial, que si bien no tiene una alta resistencia sí evita que las partículas superficiales se desprendan.

En lo que respecta al peso volumétrico puede decirse que no existen a la fecha datos que confirmen tendencias en forma categórica, sin embargo, parece ser que lo que se puede presentar es un incremento en la humedad optima.

Aunque se ha dejado ver la posibilidad de que la adición de silicato de sodio a suelos granulares o arenas, puede aumentar su estabilidad, se tiene una gran incertidumbre en lo que respecta a la permanencia de dicha estabilidad con el tiempo; a tal grado es la incertidumbre que mientras algunos investigadores indican la nula resistencia del suelo estabilizado bajo los efectos del agua otros aseguran que los suelos arenosos estabilizados con silicato de sodio, resisten la abrasión en forma más efectiva que con el empleo de cemento Pórtland; a este respecto se considera conveniente mencionar que dichos investigadores efectuaron prueba de durabilidad en especímenes que se sumergían en agua durante 5 horas y posteriormente se les secaba a 72 °C durante 42 horas; Los especímenes que contenían 10% de arcilla y 90% de arena y, además, tratados con 1 % de silicato de sodio soportaron 12 ciclos en la prueba referida mostrando perdidas de solamente 3.5 a 4.0 %. El empleo de porcentajes más altos de silicatos de sodio resultó contraproducente, pues los especímenes simplemente se disgregaban al sumergirlos en el agua en el primer ciclo. Se aumento el contenido

de arcilla pero los resultados fueron desalentadores, se empleo adicionalmente arena limpia con 1 % de silicato de sodio y se logro una ligera mejoría, pero al emplear el 6% de dicho aditivo la arena estabilizada soporto los doce ciclos de secado, manifestando una perdida de 6 % y al tratar de emplear mayores porcentajes de aditivo el desgaste se vio incrementado. Dichos investigadores hacen notar también, que a medida que se permitió un mayor tiempo de reposo en los especimenes desde su elaboración hasta la ejecución de la prueba de durabilidad la estabilidad al desgaste fue asimismo mayor.

El cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos reporta que se trató a un suelo fino constituido por arcillas y limos (ML-CL), de baja compresibilidad con una solución al 30 % de silicato de sodio, aplicada en la superficie para que penetrara 4 cm aproximadamente y dicha superficie soportó 200 recubrimientos de vehículos militares ligeros, sin mostrar agrietamiento o indicios de abrasión. En el caso de arenas compactadas, el cuerpo de ingenieros indica que el rociado de soluciones de silicato de sodio puede proporcionar estabilidad a ésta.

El cuerpo de ingenieros llevó asimismo a cabo un interesante estudio acerca de la facilidad con que produce polvo un Loess (LL= 38 %, IP= 16%, pasa malla 200 el 97%), una vez que había sido compactado a la humedad óptima y estabilizado con 4% de silicato de sodio y notaron que al hacer pasar un camión pesado (14 Toneladas en el eje trasero en tandem) durante 40 veces sobre unos parches de 1.20 m x 0.75 m se desprendieron las siguientes cantidades de suelo tratado:

PRUEBA	SIN TRATAR (en gramos)	TRATADO (en gramos)
1	1148	905
2	3481	1237
3	2783	2012
4	3058	2730
5	1969	2242
6	7824	5479
7	3970	3164

A juzgar por estos resultados se podría decir que la aplicación del silicato de sodio produce una ligera mejoría. Sin embargo, en pruebas efectuadas, en el mismo material, con asfaltos rebajados de fraguado medio se encontró que el máximo desprendimiento fue de 722 gramos y el mínimo de 185 gramos lo que obviamente mostró que el silicato de sodio no era competitivo.

En lo que respecta a la permeabilidad se ha encontrado que la adición de silicato de sodio no altera dicha propiedad en los suelos.

5.1.4 Empleo de otros tipos de sales. En el Instituto de Tecnología de Massachusetts se encontró mediante un estudio exhaustivo, que otros tipos de sales diferentes a los ya referidos, tales como el sulfato de cobre, sulfato de bario, sulfato de aluminio, sulfato de magnesio, etc., no producen cambios significativos a los suelos, o bien la mejoría resulta demasiado pequeña y su costo es muy elevado como para justificar la aplicación de dichas sales.

Algunas veces se han empleado con éxito mezclas de cloruro de calcio con cloruro de sodio, mezclando al suelo con éste y posteriormente adicionando aquel de la capa superior a estabilizar. Algunos investigadores opinan que no debería descartarse la posibilidad del empleo de estos productos químicos basados en las experiencias efectuadas en otros países o lugares simplemente porque en dichas experiencias no se tuvo éxito, ya que las condiciones de un sitio son muy distintas a las condiciones de otro.

5.1.5 Conclusiones generales respecto al empleo de sales para la estabilización de suelos. De acuerdo con lo visto hasta ahora podría decirse lo siguiente, respecto a la estabilización con sales:

- El tipo y la cantidad de sal a adicionar a un suelo constituyen condiciones únicas para dicho suelo y dependen de sus propiedades físicas y químicas, así como de su composición mineralógica y en consecuencia cada suelo deberá ser estudiado en estos aspectos, si se trata especialmente de incrementar su resistencia, no siendo recomendable extrapolar resultados de otros estudios ni proceder por tanteos.
- Por regla general, la adición de sal a un suelo hace que se disminuya su humedad óptima de compactación.
- Se reducen los problemas de congelamiento con la adición de sal a un suelo.
- La sal se lavará a menos que en la superficie se tenga una capa impermeable.
- Con la adición de sal se mantiene la humedad en el suelo.
- En lo que respecta a la ganancia en la resistencia de un suelo estabilizado con sal los resultados son un tanto inciertos. Esto mismo podría decirse de la plasticidad.
- En las pruebas de laboratorio deben simularse lo más perfectamente posible las condiciones de campo. (Agua de compactación, energía de compactación, mezclado, medio ambiente, etc.).

Investigaciones de campo en el que se analizaron los resultados obtenidos al estabilizar un material de base con el empleo de sal concluyeron lo siguiente:

- La construcción se facilitó con el empleo de la sal, pudiéndose alcanzar rápidamente los pesos volumétricos especificados. El agregado húmedo disolvió rápidamente la sal.
- Se pudo manejar mejor al agregado cuando su humedad fue de 1 a 2 % debajo de la óptima.
- El contenido de sal fue disminuyendo con el tiempo hasta estabilizarse con un cierto porcentaje en las zonas con altos contenidos de finos, mientras que después de tres años casi no se encontró sal en las zonas con pocos finos.
- En lo que respecta al empleo de silicato de sodio en estabilización de suelos, podría decirse que su mayor aplicación tanto solo como con otros aditivos es en el caso de suelos arenosos o calcáreos y en climas benignos. El silicato de sodio no produce cambios de importancia en lo que respecta a efectos abrasivos o de permeabilidad. Aunque existe alguna evidencia de que se puede mejorar la resistencia de algunos suelos finos no plásticos, no existen comprobaciones de campo que avalen su empleo en este tipo de suelos sobre todo en condiciones climáticas severas. Una de las mayores aplicaciones que tiene el silicato de sodio es como aditivo secundario, esto no obstante, deberá apoyarse en estudios detallados de las reacciones que se lleven a cabo así como en la permanencia de la estabilización con el tiempo.

5. 2. ESTABILIZACIÓN CON ÁCIDOS INORGÁNICOS.

Aunque poco común, la estabilización con productos ácidos está adquiriendo bastante difusión y experimentación. De los ácidos que han demostrado ser efectivos para modificar favorablemente algún suelo, algunos son económicamente competitivos contra otros productos más comunes; sin embargo, como en el caso de los otros productos hasta aquí mencionados, se debe contar con la asesoría especializada en la etapa de diseño como de construcción de la estabilización, pues en este caso se involucran peligros tanto como para las personas como para los equipos. Los ácidos más comunes utilizados en este tipo de estabilización son: el ácido fosfórico y el ácido fluorhídrico.

5.2.1 Estabilización con ácido fosfórico. Como sucede en la mayoría de los estabilizantes, el tratamiento con este producto está indicado para los suelos de naturaleza ácida y han resultado ser ineficaces en los casos de materiales alcalinos, en limos y arenas.

El uso del ácido fosfórico o los fosfatos en la estabilización de suelos, presentan dos ventajas muy particulares que deben ser mencionadas: la primera de ellas consiste en que el mineral arcilloso denominado “clorita”, cuyo comportamiento no está bien definido en los tratamientos con cemento o cal, reacciona de una manera perfecta con el ácido fosfórico; y la segunda ventaja se refiere a la ruptura de la estructura inicial por el ion fosfato al actuar sobre la arcilla, lo cual permite obtener una mayor densificación en el suelo, resultando de ellos una mayor resistencia mecánica. De aquí resulta que el ácido tenga el mérito muy particular para estabilizar suelos localizados en regiones de naturaleza volcánica en donde es abundante la clorita.

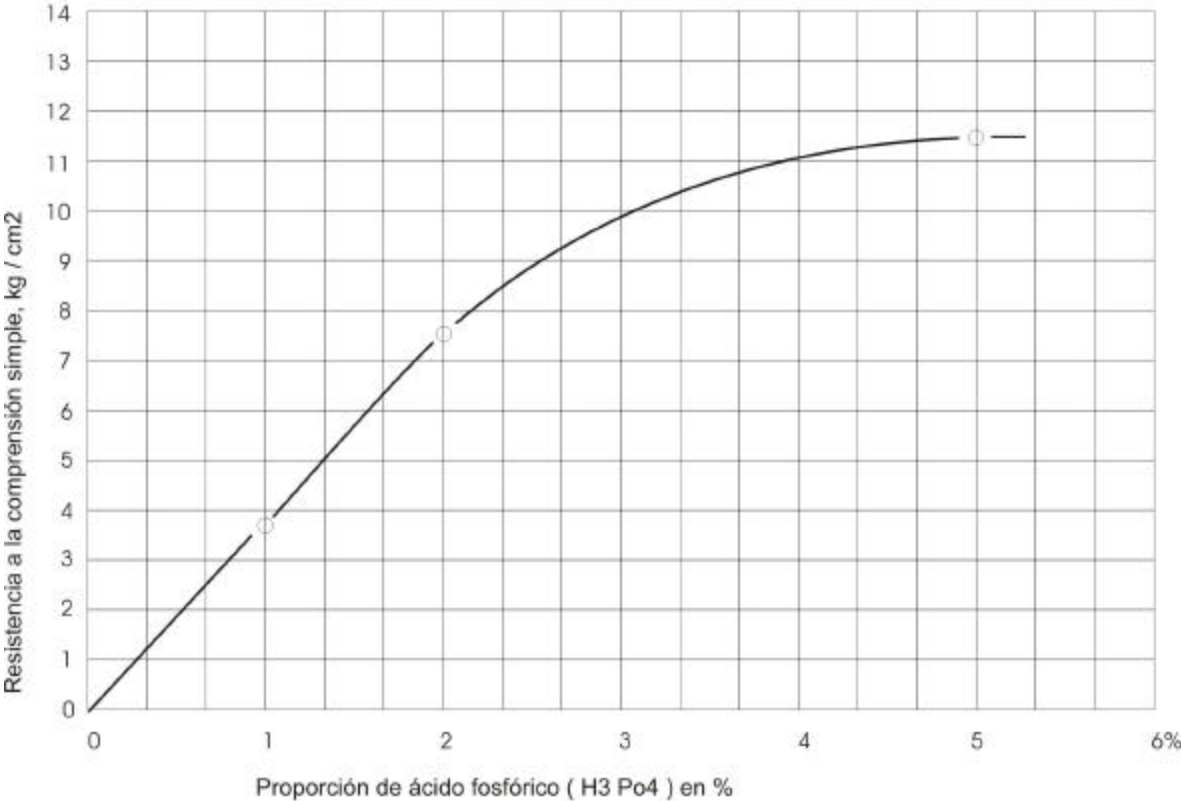
Aparentemente, los cambios producidos por el ácido fosfórico en las propiedades de los suelos arcillosos, se deben a que este reacciona directamente con la estructura interna de la arcilla. Se efectuaron estudios en los cuales compararon espectros obtenidos por difracción de rayos X, de minerales arcillosos antes y después de ser sometidos a tratamientos con ácido fosfórico, del análisis de dichos espectros se concluyó que ocurrió un rompimiento o división de los cristales de arcilla debido al tratamiento con ácido fosfórico, y se determinó asimismo una reacción química entre el ácido fosfórico y los minerales de arcilla, en la que se produce fosfatos de aluminio y agua, originando un compuesto soluble que es el elemento cementante que actúa durante el tratamiento.

El ácido fosfórico es un agente estabilizante que desarrolla de manera sensible diferentes características de resistencia en los suelos finos que contienen diferentes clases de minerales arcillosos, lo cual se atribuye a las reacciones que tienen lugar en cada uno de dichos minerales al estar en contacto con el ácido. Hipotéticamente se piensa que estas reacciones se deben principalmente a las diferencias de velocidad e intensidad con que ocurren éstas en presencia de los minerales arcillosos.

Al hacer un análisis de los datos de resistencia de suelos estabilizados con este procedimiento, se han obtenido las siguientes conclusiones: la reacción observada entre la clorita y el ácido fosfórico es rápida y completa; la reacción con la montmorillonita es rápida pero incompleta y con la caolinita y vermiculita es lenta y continua. Sin embargo, estas conclusiones dejan el camino abierto a ciertas dudas, debido a que los suelos casi siempre se encuentran en la naturaleza formados por una gran variedad de minerales arcillosos, entre los cuales casi siempre se encuentra un elemento arcilloso predominante y varios colaterales cuya influencia se considera secundaria.

Figura 5.1 Curva que relaciona la resistencia en la proporción de ácido fosfórico agregada a un suelo arcilloso-limoso compactado en probetas de 2" x 4" sumergidas en agua durante dos días y curados durante 5 días

ESTABILIZACION CON ACIDOS INORGANICOS



Fuente: Mejoramiento y Estabilización de Suelos

Figura 5.2 Curva que relaciona la resistencia con el tiempo de curado de probetas de arcilla limosa estabilizada con 2% de H_3PO_4 , sumergidas en agua durante 2 días antes de la prueba de compresión simple.

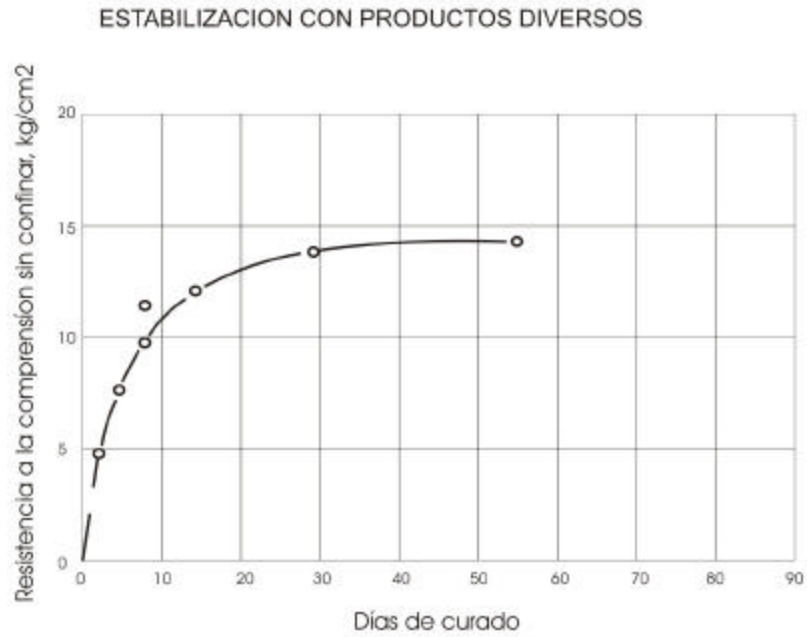
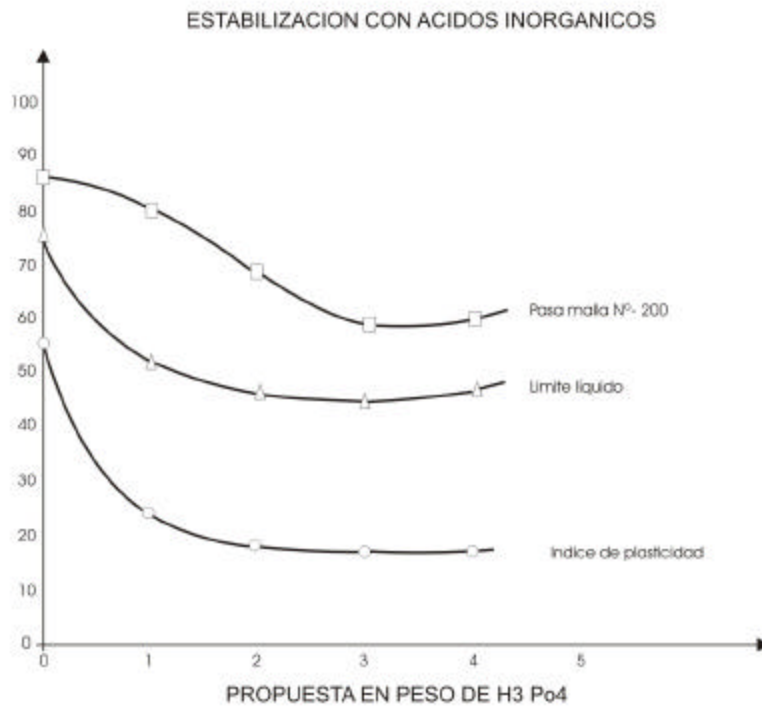


Figura 5.3 Efectos producidos por el ácido fosfórico en una arcilla limosa



Fuente: Mejoramiento y Estabilización de Suelos

En la estabilización de suelos arcillosos por medio del ácido fosfórico intervienen una serie de variables tales como el tipo de suelo, humedad, grado de compactación, forma de mezclado y curado, cantidad y concentración de estabilizante y condiciones ambientales.

En la figura 31 se muestra la evolución de la resistencia a la compresión sin confinar de probetas preparadas con diferentes proporciones de ácido fosfórico en un material arcillosos-limoso. En esta grafica se observa un comportamiento proporcional de la resistencia con el aumento de las cantidades incorporadas a la arcilla hasta un valor de 2 % aproximadamente; más allá de este punto la curva deja de ser asintótica.

Al observar la figura 32 se puede apreciar el efecto que tiene el tiempo de curado sobre la resistencia a la compresión sin confinar las probetas de arcilla a las cuales se adicionó 2% de ácido fosfórico, en la grafica se observa, además, que el aumento de resistencia es rápido en la primera semana, se reduce en las 3 semanas siguientes y de ahí en adelante el aumento de resistencia es muy lento.

En la figura 33 se muestran los efectos producidos en la granulometría, límite líquido e índice de plasticidad de una arcilla limosa tratada con diferentes contenidos de ácido fosfórico; para el efecto se prepararon probetas que se curaron en ambiente húmedo durante cinco días.

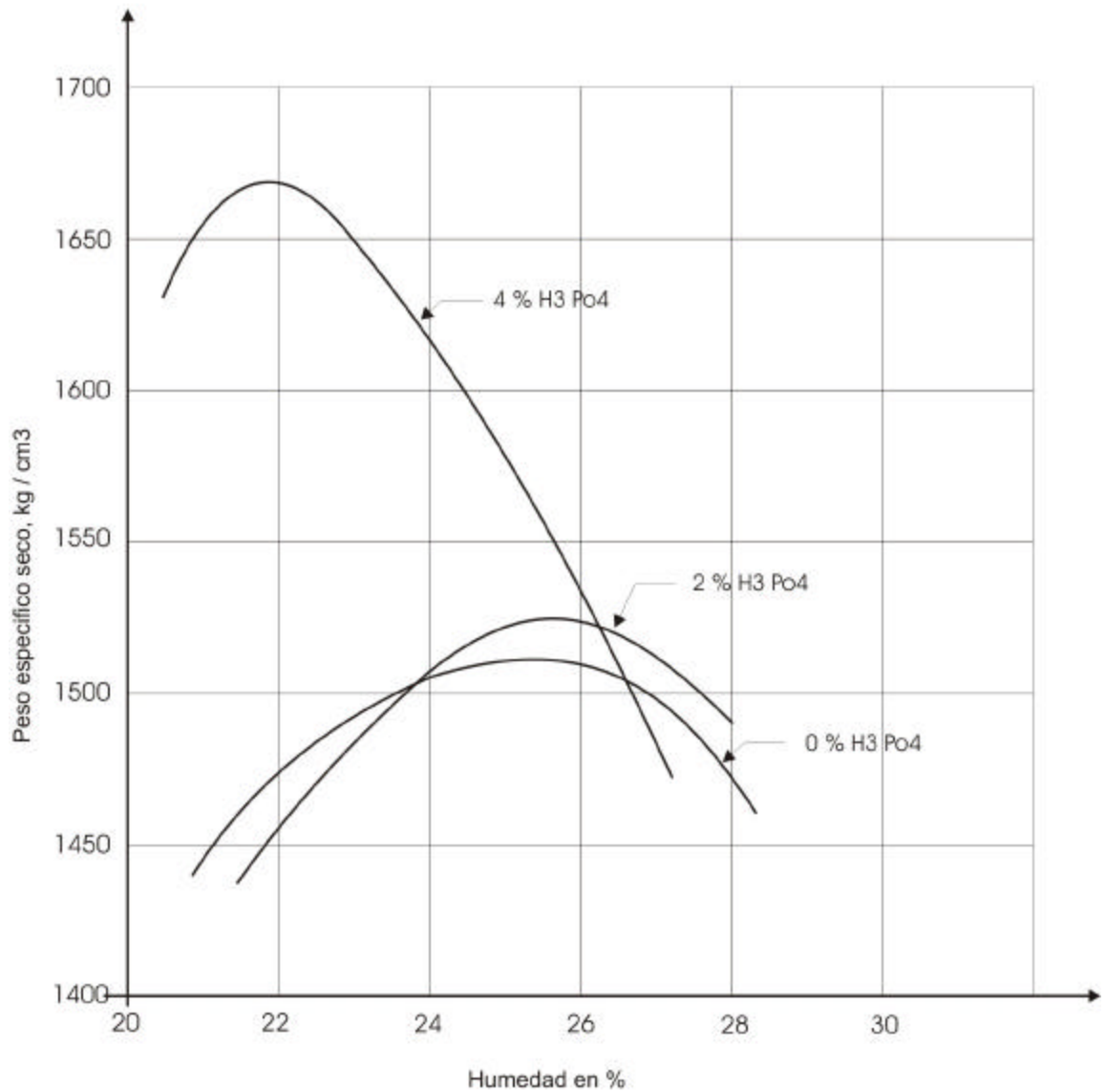
Los efectos producidos por el ácido fosfórico en la compactación también son de cierta significación. A título de ejemplo se presenta en la figura 34 las curvas de compactación correspondientes a una arcilla limosa compactada, tratada con 4 % y 2 % de ácido fosfórico, y una de ellas sin tratar. En la grafica se observa que el peso volumétrico seco máximo aumenta de 1.510 kg/m^3 aproximadamente para el suelo sin tratar, hasta 1.670 kg/m^3 para el caso en que se adiciono al suelo 4% de ácido fosfórico. También se observa una reducción de una humedad óptima hacia valores menores a medida en que se aumenta al material el porcentaje de ácido fosfórico.

La mayoría de los suelos mencionados, arcillas y “arcillas limosas” consideradas en las gráficas anteriores presentaron apreciables cambios volumétricos después de someterlos a periodos de inmersión en agua, y al ser tratados con ácido fosfórico, en la mayoría de ellos se redujeron estos cambios volumétricos a valores que podrían considerarse despreciables (menores de 0.6%), principalmente en aquellos casos en los que se obtenía un alto grado de estabilización.

De las observaciones hechas a través de la experimentación, se puede decir que el ácido fosfórico es un estabilizador efectivo, para una amplia variedad de materiales que contienen arcilla, pues el mejoramiento de las propiedades que interesan a la ingeniería es muy marcado en casi todos los casos; por ejemplo, en

Figura 5.4 Curvas de compactación de una arcilla limosa, tratada con 4% y 2% de ácido fosfórico, y sin tratar.

ESTABILIZACION CON PRODUCTOS DIVERSOS



Fuente: Mejoramiento y Estabilización de Suelos

lo que se refiere a las subrasantes, se puede ver que los suelos arcillosos estabilizados con ácido fosfórico, mejoran notablemente sus resistencias a la compresión simple, a un grado tal, que en ciertos materiales se pueden utilizar en las capas de base.

La variación de los porcentajes de estabilizante requeridos es de 1 a 5, y en algunos casos pueden resultar valores mayores.

Por otra parte, conviene señalar que las resistencias de probetas sujetas a inmersión en agua, varían con el peso específico pero muy pocas veces coincide el máximo de resistencia con el máximo de densidad, observándose que la misma resistencia tiene lugar cuando las humedades son ligeramente superiores a la óptima, esto parece tener su explicación en el comportamiento de las presiones de poro desarrolladas durante el proceso de inmersión en agua a que se sujetan las probetas.

5.2.2 Estabilización con ácido fluorhídrico. La investigación ha demostrado que este estabilizador es muy efectivo, de rápida reacción en todas las arcillas con excepción de aquellas que tienen contenido rico de aluminio (caolín, bauxita). La reacción, ya sea en arenas o arcillas, consiste en producir en los componentes de sílice modificaciones de tipo químico para formar fluoruros de silicato insoluble, de alta resistencia. No ha evolucionado el tratamiento de suelos utilizando este ácido, debido principalmente a su alto costo y también a que su manejo requiere cuidados muy especiales por ser de acción extremadamente corrosiva.

5.3 TRATAMIENTO DE RESINAS Y POLÍMEROS

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

La anilina, un derivado líquido del alquitrán de hulla y el furfural, un producto orgánico líquido producido en la refinación de los derivados del maíz; mezclados en la proporción de dos partes a una, reaccionan formando una resina viscosa de color rojo oscuro que se endurece en forma lenta hasta alcanzar su completa solidificación. El mecanismo de preparación es el siguiente: Primero se mezcla uno de los líquidos con el suelo y después el otro, y luego se compacta. Se puede estabilizar de esta manera la arena suelta en forma rápida para que los caminos así estabilizados se abran al tránsito a las pocas horas después del tratamiento.

6. CONCLUSIONES

A pesar de los datos obtenidos en el uso de la cal como corrector de suelos mejorando sus características, este no es muy utilizado en nuestro medio.

El máximo impacto del uso de la cal se obtiene en suelos arcillosos disminuyendo considerablemente la plasticidad aumentando la trabajabilidad de los suelos y generando excelentes superficies de trabajo.

En la estabilización con cal debe evitarse la utilización de arenas ácidas sobre todo cuando se va a utilizar riego de sello asfáltico, pues la estabilización de la cristalización de las sales produce desprenden el sello.

Muchas veces la cal es utilizada como pretratamiento en la estabilización con cemento para reducir la plasticidad y en la estabilización bituminosa.

La cal y el asfalto son muy poco efectivos con la presencia de material orgánico en el suelo.

Los suelos más fáciles de tratar con cemento son los granulares pues requieren de menor cantidad de cemento en comparación a suelos más finos.

La mayor limitación de estabilización con materiales bituminosos es la carencia de conocimientos técnicos y experiencia practica.

El tipo y la cantidad de sal a adicionar a un suelo constituyen condiciones únicas para dicho suelo y dependen de sus propiedades físicas y químicas, así como de su composición mineralógica y en consecuencia cada suelo deberá ser estudiado en estos aspectos, si se trata especialmente de incrementar su resistencia, no siendo recomendable extrapolar resultados de otros estudios ni proceder por tanteos.

BIBLIOGRAFIA

ARENAS LOZANO, Hugo León. Estabilización de suelos con materiales bituminosos. Popayán: Universidad del Cauca, 1999. sp.

COLOMBIA, MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS. Investigaciones sobre las arcillas expansivas de Galapa y Bayunca, 1966. sp.

FERNÁNDEZ LOAIZA, Carlos. Mejoramiento y estabilización de suelos. México: Limusa, 1982. 352 p.

FIGUEROA SANDOVAL, Carlos. Estabilización de suelos con cal, XXIX curso de especialización de vías terrestres. Popayán: Universidad del Cauca, 1999. sp.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Construcción de pavimentos de Suelo-Cemento. Medellín, 1992. 12 p.

----- Dosificación de mezclas de suelo-cemento. Medellín, 1983. 28p.

----- Materiales tratados con cemento para pavimentos. Medellín, 1992. 14p.

LILLI, Félix Juan. La estabilización de suelos con cal en el estado de Texas. Buenos Aires: Dirección de vialidad de la provincia de Buenos Aires, 1970. sp.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 ed. Colombia: Universidad Católica de Colombia, 1999. 733 p.

RICO RODRÍGUEZ, Alfonso y DEL CASTILLO, Hermilio. La Ingeniería de pavimentos para carreteras. 2 ed. Colombia: Universidad Católica de Colombia, 1999. 643 p.