

Universidad del Valle de Guatemala  
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Civil

**“Estabilización de suelos blandos por medio  
de “geosintéticos” para refuerzo estructural de  
caminos”**

**Carlos Alfredo Guerra Martínez**

Trabajo de Graduación presentado para optar al grado académico de

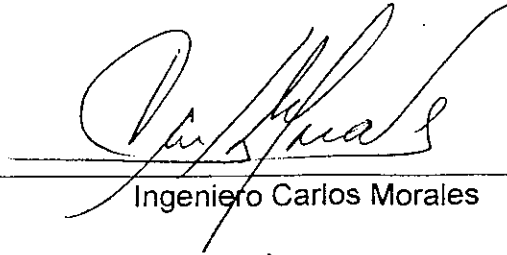
Licenciado en Ingeniería Civil



Guatemala, julio del 2,001

Vo. Bo.:

(f)



---

Ingeniero Carlos Morales

Asesor

Tribunal Examinador:

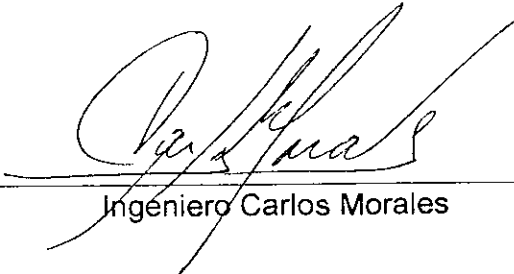
(f)



---

Ingeniere Franklin Matzdorf

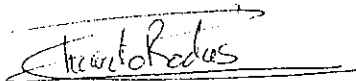
(f)



---

Ingeniero Carlos Morales

(f)



---

Ingeniero Ricardo Rodas

Fecha de Aprobación: 21 de Julio del 2,001

## **Agradecimientos:**

### **A quienes colaboraron en este trabajo:**

Ing. Franklin Matzdorf

Ing. Carlos Morales

### **A mi familia:**

Carlos Alfredo, Yolanda, Gabriela, Fernando, Juan Pablo,  
Leonor y Clary

### **A mis amigos:**

Los de siempre y CVG

### **Y muy especialmente a:**

Mis abuelos Alfredo y Elsa

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....</b>	<b>4</b>
A. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	4
1. <i>Sistema de Clasificación Unificado (USCS)</i> .....	5
2. <i>Sistema de Clasificación AASHTO</i> .....	10
3. <i>Comparación de Sistemas de Clasificación</i> .....	14
B. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS .....	16
1. <i>Requisitos de la Estabilización</i> .....	17
2. <i>Estabilización Mecánica</i> .....	18
3. <i>Estabilización Química</i> .....	21
a. Suelo-cal.....	21
b. Suelo-cemento.....	24
c. Suelo-asfalto.....	27
C. MATERIALES GEOSINTÉTICOS .....	30
1. <i>Qué son los Geosintéticos</i> .....	30
a. Geotextil.....	31
b. Geomalla .....	32
c. Geocompuesto.....	32
d. Geocelda.....	32
e. Geomembrana .....	32
f. Geored.....	32
2. <i>Materiales que Componen los Geosintéticos</i> .....	33
3. <i>Funciones y Aplicaciones de los Geosintéticos</i> .....	36
a. Funciones .....	36
b. Aplicaciones.....	43
<b>III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>47</b>
A. PRUEBAS DE CALIDAD DEL SUELO.....	47
1. <i>Granulometría y Graduación de los Suelos</i> .....	48
a. <i>Cómo afecta la graduación en el comportamiento y la calidad de un suelo</i> .....	50
2. <i>Comportamiento Plástico y Límites de Atterberg</i> .....	51
a. <i>Cómo afecta la plasticidad en el comportamiento y la calidad del suelo</i> .....	54
3. <i>Ensayo de Compactación</i> .....	55
a. <i>Cómo afectan la densidad y la compactación en el comportamiento y la calidad del suelo</i> .....	58
4. <i>California Bearing Ratio (CBR)</i> .....	58
5. <i>Prueba de Resistencia al Esfuerzo Cortante</i> .....	60
a. <i>Factores que afectan la resistencia al corte</i> .....	63
B. SUBRASANTE: FUNCIONES Y REQUERIMIENTOS .....	64
1. <i>Funciones y Requerimientos para una Subrasante</i> .....	64
a. <i>Granulometría</i> .....	66
b. <i>Plasticidad</i> .....	66
c. <i>Compactación</i> .....	66
d. <i>California Bearing Ratio (CBR) y resistencia al esfuerzo de corte</i> .....	66
<b>IV. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>67</b>
A. OBJETIVOS GENERALES .....	67
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	67
<b>V. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.....</b>	<b>68</b>

<b>VI. METODOLOGÍA.....</b>	<b>69</b>
A. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	69
B. MÉTODOS DE DISEÑO.....	70
1. <i>Diseño basado en el costo y la disponibilidad:</i> .....	70
2. <i>Diseño por especificaciones:</i> .....	71
3. <i>Diseño por función:</i> .....	71
C. DISEÑO DEL REFUERZO.....	72
1. <i>Diseño con Geotextiles</i> .....	73
a. <i>Diseño como refuerzo</i> .....	73
b. <i>Diseño como Separador</i> .....	76
2. <i>Diseño con Geomallas</i> .....	76
a. <i>Parámetros de diseño:</i> .....	77
b. <i>Diseño:</i> .....	77
c. <i>Ejemplo:</i> .....	80
D. SELECCIÓN DEL GEOSINTÉTICO ADECUADO.....	84
1. <i>Selección de un Geotextil</i> .....	84
2. <i>Selección de una Geomalla</i> .....	91
E. INSTALACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS.....	92
1. <i>Preparación del lugar</i> .....	93
2. <i>Colocación y traslapes</i> .....	94
3. <i>Colocación y esparcimiento del relleno</i> .....	96
4. <i>Compactación</i> .....	98
5. <i>Consideraciones especiales</i> .....	98
<b>VII. RESULTADOS.....</b>	<b>100</b>
A. EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE ESTABILIZACIÓN.....	102
1. <i>Ventajas de la estabilización con geosintéticos</i> .....	105
2. <i>Desventajas de la estabilización con geosintéticos</i> .....	107
<b>VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>108</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>110</b>

# I. Introducción

La construcción de caminos y carreteras en nuestros días es un elemento que ningún país puede dejar de lado para su desarrollo. Es indispensable tener una infraestructura adecuada por la cual transitar para desplazarse de un lado a otro, sea cual sea el propósito.

Sin embargo, el aumento de la población y el consecuente crecimiento de ciertas áreas del país hace que los caminos y carreteras tengan que ser construidos en lugares que pueden llegar a presentar ciertas dificultades que se tienen que afrontar. Por eso es que el Ingeniero Civil necesita utilizar todos los medios a su alcance para poder construir obras optimizando recursos. En el caso de la construcción de caminos hay varias características que pueden hacer difícil la realización de un proyecto, como por ejemplo el acceso, el tiempo de ejecución, las condiciones meteorológicas, la disponibilidad de recursos (maquinaria, equipo, mano de obra), la calidad del suelo y el costo.

La baja calidad del suelo es un problema que se presenta en muchas ocasiones y es por eso que a través de los años se ha tratado de idear métodos de mejoramiento del mismo, que permitan que la estructura del pavimento sea de buena calidad. En la construcción de vías de comunicación terrestre, la estructura depende de la resistencia del suelo subyacente, ya que de fallar éste, las capas superiores no tendrán la capacidad de sostenerse y la carga para la cual fue diseñado el proyecto hará que éste quede inservible. Esta capa de suelo es la subrasante. Dependiendo del tipo de suelo en el que se esté trabajando, así serán las características que se tendrán que modificar para que el mismo cumpla todos los requerimientos de resistencia e incompresibilidad indispensables.

El proceso por el cual se mejora el suelo para que pueda alcanzar los requisitos fijados se llama estabilización. En un sentido más amplio, la estabilización incluye otros factores como la compactación, drenaje, preconsolidación y protección de la superficie contra los factores ambientales. Sin embargo, el término va restringiendo su alcance al aspecto del mejoramiento del suelo: la modificación del propio material del lugar.

Durante los años que el hombre lleva haciendo vías de comunicación, ha tenido que enfrentar muchos tipos de suelo, y muchos han sido los métodos que se han empleado para estabilizarlos. También han sido variados los resultados que se han obtenido. Al establecer normas para la construcción de obras, se han ido consolidando conocimientos e ideas que han llevado a mejorar estos métodos de estabilización.

La ciencia de los materiales ha avanzado mucho en los últimos años. Los avances tecnológicos han hecho que las pruebas que se realizan sean más exactas y confiables, por lo que en la actualidad se cuenta con gran cantidad de información sobre estos métodos de estabilización y ahora podemos conocer con mayor precisión detalles, como la duración del trabajo realizado, el modo de empleo y la confiabilidad de cada método, como también los casos en los que se puede aplicar cada uno de estos.

Como producto de estos avances surgieron los geosintéticos. Estos materiales nacieron de la necesidad de facilitar y mejorar los procesos constructivos. De esta cuenta es que tienen gran diversidad de aplicaciones y una de éstas es la estabilización de suelos.

En países como el nuestro, es necesario ir de la mano con los avances tecnológicos para que el proceso de desarrollo no se vea afectado. Sin embargo, los problemas que se

presentan con frecuencia son la resistencia al cambio y la falta de información. Es por esto que se plantea aquí la función estabilizadora de suelos con la que cuentan estos materiales para que el constructor encuentre una opción más en la búsqueda de soluciones a los inconvenientes que pueda encontrar en su trabajo.

## II. Antecedentes Teóricos

### A. Clasificación de Suelos

Durante el desarrollo de la mecánica de suelos, los ingenieros han confiado en las experiencias del pasado. Esto los llevó a considerar conveniente la clasificación de los suelos para que estas experiencias pudieran ser aplicadas en el pronóstico de las propiedades de suelos que tuvieran características similares, e indicar los métodos adecuados para su tratamiento. Los sistemas de clasificación aparecieron tempranamente, aún ahora con el desarrollo de técnicas analíticas, los ingenieros geotécnicos siguen confiando en el pasado y en los sistemas de clasificación de suelos creados para el efecto, que son una ayuda invaluable, particularmente en donde los suelos son utilizados en una forma remoldeada, como en rellenos y terraplenes.

El principal objetivo de cualquier sistema de clasificación es predecir las propiedades ingenieriles (físicas, mecánicas, hidráulicas, etc.) y el comportamiento de un suelo, basado en sencillos análisis de laboratorio y/o de campo. Los resultados de estos análisis son utilizados para identificar el suelo y colocarlo dentro de una categoría de suelos con similares características. Probablemente no exista un sistema de clasificación de suelos que alcance el objetivo de clasificar todos los suelos por su comportamiento debido al gran número de variables que influyen en las propiedades de los suelos. La clasificación no debe ser considerada como una meta, sino como un punto de partida a partir del cual se debe ir más lejos en el conocimiento del comportamiento de los suelos.

Existen varios sistemas de clasificación de suelos, entre los de mayor uso están: el sistema de la USDA (United States Department of Agriculture (1938)), que está dirigido al uso en agricultura, y radica puramente en la distribución granulométrica de las partículas, excluyendo las mayores a 2.0 mm. No provee ninguna información sobre plasticidad, por ejemplo. Los sistemas de clasificación dirigidos a la ingeniería civil y geotécnica son el USCS (United Soil Classification System) y el AASHO (American Association of State Highway Officials (1952)), que se convertiría posteriormente en AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials (1978)). Cada clasificación tiene un contexto histórico diferente, y la tendencia es la de usar el sistema AASHTO en la industria de carreteras y el USCS para los campos geotécnicos y de aeropistas, así como análisis de campo. Sin embargo, el USCS es más útil para predecir comportamientos de suelo remoldeado. A continuación se presentan los dos tipos de clasificación de suelos que son de vital importancia para comprender más adelante con qué tipo de suelo es posible encontrarse en el campo.

## **1. Sistema de Clasificación Unificado (USCS)**

Los suelos existen en sí en la naturaleza en forma de grava, arena, limo y arcilla. Usualmente ocurre que existan mezclas de estos componentes en gran cantidad de proporciones de partículas de diferentes tamaños, cada componente contribuye en la definición de las características de la mezcla y pueden tener por añadidura material orgánico parcial o completamente descompuesto. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) se basa en las características del suelo que indicarán cómo se comportará como material de construcción.

En el USCS, los suelos se colocan en tres categorías principales:

- Grano grueso
- Grano fino
- Altamente orgánico

Después se identifican los suelos por letras:

- Los suelos de grano grueso se dividen en:

Grava y suelos gravosos (si el 50% o más de la fracción gruesa es retenida en el tamiz N°4): símbolo G

Arenas y suelos arenosos (si el 50% o más de la fracción que queda retenida en el tamiz N°200 pasa por el tamiz N°4): símbolo S

Estas gravas y arenas se dividen en:

Bien graduadas (material relativamente limpio con poco o ningún fino): símbolo W

Material bien graduado (con excelente cementante arcilloso o arena y arcilla, límites de Atterberg por encima de la línea A de la gráfica): símbolo C

Mal graduadas (material relativamente limpio con poco o ningún fino): símbolo P

Materiales gruesos con finos (con limo o limo y arena, límites de Atterberg por debajo de la línea A): símbolo M

- Los suelos finos se dividen en:

Suelos limosos inorgánicos y suelos arenosos muy finos (arcillas limosas): símbolo M

Arcillas inorgánicas: símbolo C

Limos y arcillas orgánicas: símbolo O

Cada uno de estos tres grupos de suelos finos se divide de acuerdo al límite líquido:

Suelos finos con límite líquido de 50 o menos (de baja a mediana compresibilidad):  
símbolo L

Suelos finos con límite líquido mayor que 50 (de elevada compresibilidad): símbolo H.

- Los suelos con una elevada proporción de materia orgánica, que son usualmente fibrosos, como la turba y los fangos de muy alta compresibilidad, no se subdividen, pero se clasifican dentro del grupo con símbolo Pt.

- En los suelos gruesos, la primera letra define la composición del suelo, y la segunda la graduación. En los suelos finos, la primera letra define la composición del suelo y la segunda, la plasticidad (en las arcillas) o compresibilidad (en los limos).

Divisiones Principales		Simbolo de Grupo	Descripción del Suelo	Características
Suelos de grano grueso: más del 50% del material es mayor que el tamiz N°200	Gravas: más del 50% de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N°4	GW	Grava con buena graduación	< 5% de finos
		GP	Grava con mala graduación	
		GM	Grava limosa	
		GC	Grava arcillosa	
	Arenas: más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N°4	SW	Arena con buena graduación	< 5% de finos
		SP	Arena con mala graduación	
		SM	Arena limosa	
		SC	Arena arcillosa	
Suelos de grano fino: más del 50% del material es menor que el tamiz N°200	Limos y arcillas con límite líquido menor a 50	ML	Limo de baja compresibilidad	Inorgánico
		CL	Arcilla	
	Limos y arcillas con límite líquido mayor a 50	OL	Limo o arcilla orgánica	Orgánico
		CH	Arcilla gruesa	Inorgánico
		MH	Limo de alta compresibilidad	
		OH	Limo o arcilla orgánica	Orgánico
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba	Muy orgánico

Tabla 1 - Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

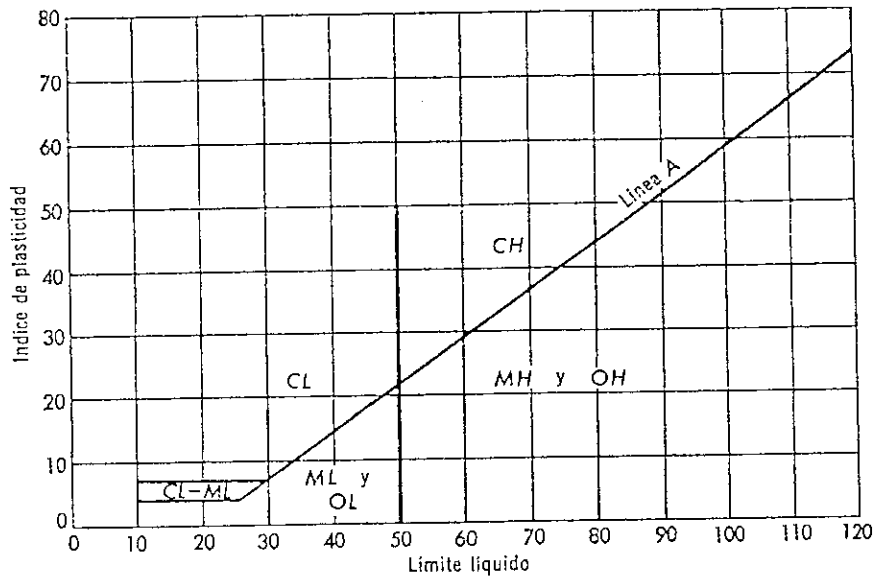


Gráfico 1 – Gráfico de Plasticidad

## 2. Sistema de Clasificación AASHTO

Este sistema divide los suelos en 8 grupos: del A-1 al A-8. Los inorgánicos van del A-1 al A-7 y los suelos con alto porcentaje de materia orgánica se clasifican como A-8. Los suelos con más de 35% del material que pasa el tamiz N°200 son considerados de grano fino (limo-arcillosos) y están clasificados de A-4 a A-7, dependiendo de su límite líquido y de su índice de plasticidad.

De estos 8 grupos hay tres que están sub-divididos y dependen de la graduación y plasticidad del suelo.

La clasificación de calidad del suelo como subrasante se define por el Índice de Grupo. Este índice está calculado de la manera siguiente:

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

en donde:

GI = Índice de Grupo

F = Porcentaje de suelo que pasa el tamiz N°200 (número entero)

LL = Límite Líquido

IP = Índice de Plasticidad

Originalmente, el índice de grupo fue utilizado directamente para obtener grosores de diseño para pavimentos al usar el "Método del Índice de Grupo", pero fue desechado y estos valores sirven ahora únicamente como guía.

La calidad del suelo como subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo. El resultado de la fórmula siempre se aproxima al entero más cercano, y si el resultado es un número negativo, entonces es 0.

Para los sub-grupos A-2-6 y A-2-7, únicamente la porción de IP es utilizada para calcular el Índice de Grupo.

La tabla se lee de izquierda a derecha, revisando los requerimientos de cada grupo y sub-grupo hasta encontrar la clasificación correcta. El Índice de Grupo se agrega al tipo de suelo así: A-7-5(12).

Clasificación General	Material Granular (menos del 35% pasa el tamiz N° 200)			Material de Grano Fino (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1	A-3	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
Grupo	A-1	A-3	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7	A-8
Descripción del Suelo	Grava o arena de buena graduación. Puede incluir finos	Arenas finas	Arenas y gravas con exceso de finos	Limos de baja compresibilidad	Limos muy compresibles, limos micáceos	Arcilla de compresibilidad baja a media	Arcilla de alta compresibilidad	Turba, suelos muy orgánicos
Análisis granulométrico: % que pasa el tamiz:								
N° 10	-	-	-	-	-	-	-	-
N° 40	50 Máx	51 Mín	-	-	-	-	-	-
N° 200	25 Máx	10 Máx	35 Máx	36 Mín	36 Mín	36 Mín	36 Mín	-
Límites de Atterberg en material que pasa el tamiz N° 40								
Límite Líquido	-	-	-	40 Máx	41 Mín	40 Máx	41 Mín	-
Índice de Plasticidad	6 Máx	No plástico	-	10 Máx	10 Máx	11 Mín	11 Mín	-
Índice de Grupo	0	0	4 Máx	8 Máx	12 Máx	16 Máx	20 Máx	-

Tabla 2 - Clasificación de Suelos de la AASHTO (Grupos Principales)

Clasificación General	Material Granular (menos del 35% pasa el tamiz N° 200)				Material de Grano Fino (más del 35% pasa el tamiz N° 200)						
	A-1		A-2			A-7					
	A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-7-5	A-7-6			
Sub-Grupo	A-1-a	A-1-b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-7-5	A-7-6			
Descripción del Suelo	Mayormente gravas, pero puede incluir arena y finos	Arena gravosa o arena graduada; puede incluir finos	Arenas, gravas con finos de limo de baja plasticidad	Arenas, gravas con finos de limo elástico	Arenas, gravas con finos de arcilla	Arena, gravas con finos de alta plasticidad	Arcillas limosas de alta compresibilidad	Arcillas de alta compresibilidad y alto cambio de volumen			
<b>Análisis granulométrico: % que pasa el tamiz:</b>											
N° 10	50 Máx	-	-	-	-	-	-	-			
N° 40	30 Máx	50 Máx	-	-	-	-	-	-			
N° 200	15 Máx	25 Máx	35 Máx	35 Máx	35 Máx	35 Máx	36 Mín	36 Mín			
<b>Límites de Atterberg en material que pasa el tamiz N° 40</b>											
Límite Líquido	-	-	40 Máx	41 Mín	40 Máx	41 Mín	41 Mín	41 Mín			
Índice de Plasticidad	6 Máx	6 Máx	10 Máx	10 Máx	11 Mín	11 Mín	11 Mín	11 Mín			
Índice de Grupo	0	0	0	0	4 Máx	4 Máx	20 Máx	20 Máx			

Tabla 3 - Clasificación de Suelos de la AASHTO (Sub-Grupos)

**Notas:**

- El grupo A-2 incluye todos los suelos en los que el 35% o menos pasa por el tamiz N° 200, que no pueden clasificarse como A-1 o A-3
- Únicamente los grupos A-1, A-2 y A-7 tienen sub-grupos
- El índice de plasticidad del sub-grupo A-7-5 es igual o menor que LL-30
- El índice de plasticidad del sub-grupo A-7-6 es igual o mayor que LL-30

### **3. Comparación de Sistemas de Clasificación**

Independientemente del sistema de clasificación que se esté usando, cada uno tiene sus ventajas y sus limitaciones, y han sido creados para diferentes propósitos.

Debe tenerse cuidado al trasladarse de una clasificación a otra, ya que los parámetros principales de clasificación difieren. Por ejemplo, el USCS considera suelo con grano fino aquellos donde el 50% pasó el tamiz N°200, y el AASHTO hace la misma consideración cuando pasa el 35%.

Para el propósito de este estudio, se utilizará básicamente el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), sin embargo aquí se presenta una tabla en la cual se compara aproximadamente con el sistema AASHTO, para que el lector pueda hacer las comparaciones necesarias en el caso en que se trabaje con este sistema.

Grupos de suelos en sistema USCS	Comparación con sistema AASHTO		
	Muy probable	Posible	Posible pero improbable
GW	A-1-a	-	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GP	A-1-a	A-1-b	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
GM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6	A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
GC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6	A-4, A-7-6, A-7-5
SW	A-1-b	A-1-a	A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-7
SP	A-3, A-1-b	A-1-a	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7
SM	A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7	A-2-6, A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a
SC	A-2-6, A-2-7	A-2-4, A-6, A-4, A-7-6	A-7-5
ML	A-4, A-5	A-6, A-7-5	-
CL	A-6, A-7-6	A-4	-
OL	A-4, A-5	A-6, A-7-5, A-7-6	-
MH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
CH	A-7-6	A-7-5	-
OH	A-7-5, A-5	-	A-7-6
Pt	-	-	-

Tabla 4 - Comparación de Sistemas de Clasificación de Suelos

## B. Estabilización de Suelos

Con mucha frecuencia los suelos disponibles para construcción no pueden llenar los requisitos de resistencia e incompresibilidad indispensables para su uso en subrasantes. El proceso por el cual se mejora el suelo para que pueda alcanzar los requisitos fijados se llama estabilización. En su más amplio sentido, la estabilización incluye la compactación, el drenaje, la pre-consolidación y la protección de la superficie contra la erosión y la infiltración de la humedad. Sin embargo, al término estabilización se le va restringiendo gradualmente su alcance a un solo aspecto del mejoramiento del suelo: la modificación del propio material del suelo.

Los métodos de estabilización son numerosos, sin embargo todos entran en dos clasificaciones:

- Estabilización mecánica
- Estabilización química

Algunas técnicas de estabilización utilizan una mezcla de las dos categorías. La estabilización mecánica se basa en procesos físicos para estabilizar el suelo, ya sea alterando la composición física del mismo, o colocando una barrera en o sobre el suelo para obtener el efecto deseado. La estabilización química se basa en el uso de un aditivo que altera las propiedades químicas del suelo para alcanzar los requisitos.

# 1. Requisitos de la Estabilización.

El modo de modificar y el grado de modificación necesario en el suelo depende de su carácter y de sus deficiencias. En la mayoría de los casos se necesita aumentar su resistencia. Si el suelo no es cohesivo, esto se puede lograr por confinamiento o dándole cohesión por medio de un agente cementante o ligante. Si es cohesivo se puede aumentar su resistencia al hacer al suelo resistente a la humedad, alterar la película de agua adsorbida o aumentar la fricción interna. La reducción de la compresibilidad se puede lograr al llenar los poros, cementar los granos con un material rígido o cambiar las fuerzas del agua adsorbida por el mineral de arcilla. La inmunidad a la retracción y a la expansión se puede lograr al cementar, modificar la capacidad del mineral arcilloso para la adsorción de agua y que el suelo sea resistente a los cambios de humedad. La permeabilidad se puede reducir al llenar los poros con un material impermeable, modificar la estructura del mineral de arcilla y el agua adsorbida para impedir la floculación, o se puede aumentar al quitar los granos finos o crear una estructura conglomerada. Se han propuesto muchos métodos de estabilización.

Desde el punto de vista de su función o efecto en el suelo, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Retención de humedad: que retiene la humedad en el suelo.
- Resistencia a la humedad: que impide que la humedad entre en el suelo o que afecten a los materiales de arcilla.
- Cementación: que une las partículas entre sí, sin modificarlas.
- Relleno: que rellena los poros.

- Estabilización mecánica: que mejora la graduación del suelo.
- Alteración físico-química: que cambia el mineral arcilloso o el sistema agua adsorbida-mineral arcilloso.

Un agente estabilizador satisfactorio debe proporcionar las cualidades requeridas y además debe satisfacer las condiciones siguientes:

- Debe ser compatible con el material del suelo;
- Debe ser permanente;
- Debe ser fácil de manejar y preparar, y
- Debe tener bajo costo.

Se han empleado muchos materiales cuyo éxito aún está en evaluación. Ningún material llena todos los requisitos y la mayoría no cumple con la última condición: el costo.

## **2. Estabilización Mecánica**

La estabilización mecánica de un suelo es el mejoramiento del mismo por el cambio de graduación. Consiste generalmente en mezclar dos o más suelos naturales para obtener un material compuesto que sea superior a cualquiera de sus componentes; pero también incluye la adición de roca triturada, escoria o la tamización del suelo para remover partículas de cierto tamaño.

El objetivo principal del método es obtener un suelo con una graduación lo más uniforme posible, con características de cohesión y plasticidad aceptables, dentro de las especificaciones dadas.

Se considera que el suelo está constituido por dos componentes: el árido, que incluye todas las partículas más gruesas que un límite arbitrario, como el tamiz N° 40 o el N° 200, y consiste en granos predominantemente redondeados. El ligante que es la fracción fina que incluye los granos finos redondeados y los minerales arcillosos. El árido proporciona la fricción interna y la incompresibilidad e idealmente consiste en partículas fuertes y angulosas bien graduadas. El ligante proporciona la cohesión y la impermeabilidad; debe tener la suficiente plasticidad para producir gran cohesión, pero al mismo tiempo, la mínima plasticidad para evitar que sea expansivo. De acuerdo con la experiencia, los mejores ligantes (más finos que el tamiz N°40) son los suelos CL, con límites líquidos menores de 40 e índices de plasticidad entre 5 y 15.

Las cantidades relativas de los dos tipos de suelo determinan las propiedades físicas de la mezcla compactada. Si el suelo no tiene ligante su fricción interna es alta y es relativamente incompresible, porque las cargas son soportadas por los contactos entre los granos de partículas redondeadas, pero la cohesión es insignificante. Cuando se usan cantidades pequeñas de ligante, una parte es atrapada entre los granos redondeados y comprimida fuertemente por la compactación, mientras que la parte restante llena parcialmente los poros. El resultado es un aumento muy marcado de la cohesión, una ligera disminución en el ángulo de fricción interna, una compresibilidad relativamente mayor y una permeabilidad relativamente alta (y un potencial de ablandamiento por el agua que circula por los poros). La cantidad óptima de ligante se alcanza cuando el ligante compactado llena los poros sin

destruir todos los contactos de grano a grano de las partículas redondeadas. Aumentar la cantidad de ligante después de alcanzado este punto, produce una rápida caída de la fricción interna, un pequeño aumento en la cohesión y mayor compresibilidad.

El proyecto de una mezcla mecánicamente estabilizada es la determinación de la proporción de material ligante que dará la cohesión óptima. Se han preparado con este objeto varias especificaciones de graduación, basadas en experiencias anteriores, pero la mayoría de éstas no consideran la forma de los granos ni el volumen de agua adsorbido en la arcilla. En un procedimiento racional se separan en cada suelo el árido y el ligante; los áridos y los ligantes se compactan separadamente para determinar el volumen de vacíos del árido compactado y el peso específico del ligante compactado. La mezcla se proporciona de manera que el total de ligante (de todos los ingredientes) sea del 75 al 90 por ciento del que se requiere para llenar los poros. Las cantidades normales de ligante que se requieren para máxima resistencia, son de 20 a 27 por ciento y son algo menores que las que resultan para el peso específico máximo compactado.

En muchas ocasiones se usa este tipo de estabilización cuando se encuentra un suelos arenoso, que no puede proveer un soporte adecuado en época seca. Por lo tanto, hay que agregar algún material ligante para obtener una plataforma sólida. Y en el caso de encontrar suelos arcillosos, se agrega material granular para evitar cambios de volumen, aumentar la capacidad de drenaje y la estabilidad, y controlar los indeseables comportamientos de las arcillas.

Básicamente los problemas en la estabilización mecánica son:

- La disponibilidad de materiales,

- El tiempo y la calidad de mezclado,
- Encontrar las proporciones exactas para la mezcla.

De estos tres factores depende el éxito de la estabilización, ya sea en términos de ingeniería, financieros o de programación.

### **3. Estabilización Química**

#### **a. Suelo-cal**

- La cal (usualmente cal hidratada) es un efectivo estabilizador de suelos y puede ser usado para secar suelos, reducir su plasticidad, mejorar su maniobrabilidad, limitar cambios volumétricos e incrementar su resistencia.
- La hidratación de la cal produce un secamiento instantáneo del suelo, por ejemplo, le quita lo pegajoso a suelos con alto contenido de arcilla.
- Generalmente hay una reducción en la plasticidad del suelo debido al intercambio de cationes, que produce un reemplazo de iones de sodio y potasio presentes en el suelo por iones de calcio aportados por la cal (aun en suelos ricos en calcio). Esto reduce la capacidad de hinchamiento o encogimiento, lo que vuelve el suelo menos susceptible a perder resistencia en presencia de humedad. Para que los efectos de la cal sean considerables en este aspecto, el suelo debe tener un índice de plasticidad igual o mayor a 10.
- El pH del suelo aumenta.

- Se produce una aglomeración de partículas, aunque se utilice un agente dispersante, lo que cambia la textura del suelo. Hay un descenso significativo en la proporción de partículas del tamaño de las arcillas (< de  $2\mu\text{m}$ ). Por lo tanto, un suelo arcilloso puede comportarse como uno más limoso o arenoso.
- Las bajas temperaturas retardan las reacciones entre el suelo y la cal, y una temperatura uniforme durante el tiempo de curado aumentará la resistencia final de la mezcla. El tiempo aproximado de curado es de 3 a 7 días, aunque las capas superiores se pueden construir si no hay deformación extrema. En presencia de suelos muy plásticos este período de tiempo se puede extender un poco.
- Los suelos estabilizados con cal preservan sus cualidades en presencia de humedad, sin embargo, la saturación produce pérdidas en la resistencia de los mismos.
- Los cambios extremos de temperatura y el congelamiento reducen la resistencia del suelo, pero en buenas condiciones climáticas se vuelve a recuperar.
- La filtración de agua puede reducir las proporciones de cationes de calcio, al reducir la resistencia y el pH y al aumentar la plasticidad.
- La reducción en el pH hace que los agentes cementantes de la cal reaccionen con el dióxido de carbono y se vuelvan inestables. Por eso hay que compactar adecuadamente para evitar al máximo el contacto del suelo con el dióxido de carbono, instalar la mezcla lo más pronto posible y proveer buenas condiciones de curado.

- Los sulfatos presentes en el suelo o el agua reaccionan de forma perjudicial con el calcio ya que producen grandes hinchamientos en el suelo. Una vez que la reacción comienza no se puede detener, y no se puede predecir la magnitud de la reacción.
  
- La estabilización con cal requiere de minerales arcillosos para generar floculación y adherencia de partículas para que se produzcan las reacciones a corto plazo que tendrán como efecto la reducción en la plasticidad, el cambio de textura y el aumento de resistencia. Para las reacciones a largo plazo, la cal reacciona con la alúmina y la sílice presentes en el suelo, ya que genera aumentos más prolongados en la resistencia del suelo.
  
- La materia orgánica interfiere con las reacciones de la cal, y el suelo necesitará una mayor cantidad de ésta para llevar a cabo la estabilización. Sin embargo, si el suelo tiene más de 1% de materia orgánica, se deberá utilizar otro medio de estabilización.
  
- La adición de cal al suelo tiende a aumentar el contenido óptimo de humedad y a reducir la densidad máxima de compactación.
  
- La humedad óptima para compactación debe dársele al suelo hasta que haya sido mezclado con la cal.
  
- La cal produce mucho polvo.

- En cantidades muy grandes de material a estabilizar, habrá que utilizar mezcladoras mecánicas o hacerlo en una planta mezcladora, ya que la estabilización no será satisfactoria a menos que se mezcle perfectamente el suelo a estabilizar con la cal. Una mezcla completa puede llevar mucho tiempo y elevar los costos.
- Hay que evitar que el suelo pierda humedad durante el curado, y esto se logra al impermeabilizarlo, humedecerlo constantemente o al cubrirlo.
- El proceso de estabilización es despacho y distribución de cal, mezcla, homogenización, compactación y curado.

## **b. Suelo-cemento**

- La cal contenida en el cemento produce las mismas reacciones que en la estabilización suelo-cal. Sin embargo, el cemento tiene un mayor poder de adherencia para las partículas de suelo y no necesita una contribución química del suelo para desarrollar resistencia, ya que esto lo alcanza en presencia de agua.
- Mientras mayor sea el contenido de cemento y la densidad alcanzada, mayor será la resistencia del suelo y éste se volverá menos permeable, y será más difícil su saturación.
- Los suelos de grano fino requieren mayor cantidad de cemento y ganan menor resistencia que los de grano grueso. Los suelos de graduación uniforme o de mala

graduación requieren una mayor cantidad de cemento. Las gravas de graduación uniforme necesitarán mezclarse con un suelo intermedio para llenar vacíos.

- Un mayor tiempo de curado produce una mayor resistencia.
- La mayoría de los suelos estabilizados son de grano grueso, lo que minimiza el efecto de los sulfatos, sin embargo para reducir aún más este efecto se puede utilizar cemento tipo II o tipo V.
- Al igual que en el concreto, los cambios de humedad y temperatura durante la hidratación del cemento conducen a cambios de volumen en el suelo y producen grietas. En suelos arcillosos se producirán grietas muy finas y con poca separación y en suelos granulares serán más anchas pero más separadas. Cuando el pavimento sea flexible, estas grietas se transmitirán a la superficie.
- Se debe controlar en el suelo: el pH (tiene que ser mayor a 5.3), la presencia de sulfatos, el contenido de materia orgánica (tiene que ser menor al 2%).
- Un contenido muy alto de cemento tendrá las siguientes consecuencias: aumento en la proporción de finos y por lo tanto de plasticidad, alto costo y forzará a hacer juntas de contracción al igual que se hace en pisos de concreto.
- Hay que tener cuidado con las juntas entre cada capa de compactación, picando la superficie, agregando adherentes o retardantes, manteniendo limpia la superficie y utilizando el menor tiempo posible para el esparcimiento de las capas. Debido a estas

juntas, el agua se filtrará muy probablemente en el plano paralelo a la compactación y no en el perpendicular. Además se trasladará por las juntas construidas o por las grietas formadas por la contracción del material.

- Los materiales más utilizados para estabilizar con cemento son: los materiales arenosos y gravas que tienen entre 10% y 35% en peso que pasa el tamiz N°200, 55% o más que pasa el tamiz N°4, 37% o más que pasa el tamiz N°10 y que no haya material de más de 2 pulgadas. Un suelo más fino o más grueso que éste, necesitaría mucho cemento.
- Un índice de plasticidad mayor que 8 en suelos arcillosos provocará la formación de bolas de arcilla, a menos que se trabaje con un contenido de humedad ligeramente por encima del óptimo (esto puede hacer que el suelo se vuelva difícil de manejar), y un material granular con muy poca humedad causará la formación de bolas de cemento.
- La adición de cemento al suelo hace que aumente el contenido óptimo de humedad para compactación.
- Generalmente, debido a la dificultad de mezclar en el campo, la cantidad sugerida en laboratorio se aumenta en 1% ó 2%.
- En cantidades muy grandes de material a estabilizar, habrá que utilizar mezcladoras mecánicas o hacerlo en una planta mezcladora, ya que la estabilización no será satisfactoria, a menos que se mezcle perfectamente el suelo a estabilizar con el cemento. Una mezcla completa puede llevar mucho tiempo y elevar los costos.

- Hay que evitar que el suelo pierda humedad durante el curado, y esto se puede lograr impermeabilizándolo, humedeciéndolo constantemente o cubriéndolo durante 3 a 7 días.
- Pasos para estabilizar: Despacho y distribución del cemento, mezcla, homogenización, graduación final y curado.
- La humedad óptima para compactación debe dársele al suelo hasta que haya sido perfectamente mezclado con el cemento.
- Para continuar con rellenos colocados anteriormente es necesario hacer cortes verticales en las capas ya compactadas para evitar desplazamientos horizontales en el suelo.
- Hay que tener en cuenta que el cemento tiene un tiempo de endurecimiento muy corto, por lo que hay que considerar ciertos tiempos máximos: transporte (30 minutos), inicio de compactación (1 hora después de mezclar), fin de la compactación (2 horas después de mezclar), curado (cuando la pérdida de humedad comience, se puede necesitar rociar agua durante el proceso). En días calurosos estos tiempos se reducen, por lo que se pueden necesitar aditivos retardantes.

### **c. Suelo-asfalto**

- La estabilización con asfalto trabaja mejor en suelos granulares.

- El exceso de finos provoca una pobre cobertura de las partículas, requiere mayor cantidad de asfalto y dificulta la mezcla.
- La resistencia alcanzada en el suelo estabilizado con asfalto dependerá más de la calidad del suelo que cuando se estabiliza con cal o cemento. Éste proporcionará básicamente impermeabilización y cumple una función ligante entre partículas de suelo aumentando la cohesión. La impermeabilización, sin embargo, evitará que el suelo sea susceptible a los efectos de la humedad, lo que aumenta su resistencia.
- Un contenido alto de humedad en el suelo causará problemas de adherencia. La filtración de agua en un suelo estabilizado con asfalto puede reducir su durabilidad y desprenderlo de las partículas de suelo.
- Generalmente, un índice de plasticidad mayor que 6 y más del 12% del suelo que pasa por el tamiz N°200 causa problemas con la estabilización.
- Los cementos asfálticos necesitan ser calentados para reducir su viscosidad hasta alcanzar una que permita mezclarlos con el suelo. Se usan más en materiales bien graduados, con pocos finos y poca plasticidad.
- Los asfaltos líquidos se endurecen al evaporarse los solventes, sin embargo existen restricciones ambientales en torno a su utilización. En presencia de un material uniformemente graduado se necesitará un asfalto de alta viscosidad, y conforme vaya aumentando la proporción de finos ésta se irá reduciendo.

- Las emulsiones asfálticas son líquidas a temperatura ambiente y permiten obtener materiales de rápido, mediano o lento endurecimiento, dependiendo de la cantidad y el tipo de agente emulsionante.
- Los asfaltos pierden rigidez al aumentar la temperatura y su capacidad de resistir deformaciones disminuye al incrementar el tiempo de aplicación de una carga.
- Si en la estabilización resulta un muy bajo porcentaje de vacíos rellenos con asfalto, el suelo tenderá a deformarse con facilidad, la mezcla será inestable y el trabajo no tendrá mucha duración. Si por el contrario se rellenara un muy alto porcentaje de vacíos en el suelo, podría haber problemas de estabilidad de la mezcla.
- Los cementos asfálticos proporcionan una mayor resistencia al suelo que los asfaltos líquidos y “cutbacks”.
- El tiempo de compactación dependerá de la temperatura del asfalto y de la calidad del suelo. Se tratará de evitar grietas, desplazamientos horizontales y problemas de densidad.
- Al utilizar asfaltos líquidos, se deberá considerar que por lo menos la mitad de los solventes (en el caso del “cutback”) o del agua (para las emulsiones) deberá haberse perdido antes de comenzar con la compactación.

## **C. Materiales Geosintéticos**

En Guatemala, actualmente, vemos con más frecuencia la utilización de productos geosintéticos en una amplia gama de aplicaciones en proyectos de Ingeniería Civil, Geotécnica y Ambiental, con los cuales se obtienen soluciones técnicas que ayudan a mejorar el rendimiento y reducir los costos de éstos, permitiendo el avance de la construcción aun en condiciones difíciles, además de proveer soluciones con un menor impacto ambiental.

### **1. Qué son los Geosintéticos**

El término "Geosintético" es aplicado a una gran cantidad de productos usados en ingeniería geotécnica. Son materiales sintéticos elaborados con polímeros, y se utilizan en una gran diversidad de proyectos de ingeniería civil. Los geosintéticos se distinguen principalmente por su apariencia física y el proceso de fabricación al que fueron sometidos, y la función que cumplen está determinada por sus propiedades mecánicas, físicas, hidráulicas y ambientales.

Entre los materiales geosintéticos se incluyen los geotextiles tejidos, no tejidos y punzonados, geomembranas, geoceldas, geomallas unidireccionales y bidireccionales, georedes y geocompuestos. Cada tipo de geosintético tiene funciones propias, en las que su desempeño es óptimo, sin embargo, pueden ser usados en numerosas aplicaciones limitadas solamente por la imaginación del diseñador.

Dependiendo de la función que vayan a cumplir, así serán sus características físicas (masa, grosor, gravedad específica, porcentaje de área abierta, abertura aparente de poro), mecánicas (resistencia a la tensión, estiramiento, resistencia al corte), hidráulicas (capacidad filtrante en el plano perpendicular y en el plano paralelo) y de durabilidad (resistencia a los rayos ultra violeta, resistencia al pH, absorción de humedad, resistencia biológica, resistencia química, envejecimiento (*Creep*)). Estas propiedades deben ser examinadas y empleadas para ayudar a seleccionar el geosintético más apropiado para usar en cada proyecto.

A continuación se enumeran y definen los principales geosintéticos:

### **a. Geotextil**

Es un material permeable elaborado con fibras o hilos combinados dentro de una estructura plana, de polipropileno o poliéster. Pueden ser tejidos, no tejidos o punzonados, lo cual depende del método utilizado para combinar los filamentos o cintas dentro de la estructura. También conocidos como geotelas, lienzos filtrantes, telas de soporte o telas de ingeniería civil, los geotextiles se utilizan para estabilizar suelos. Las funciones primarias de los geotextiles son reforzar los suelos, proporcionándoles la resistencia de tensión que de otro modo no poseen, y separar los diferentes tipos de suelos para evitar que se mezclen y se produzcan modificaciones indeseables en sus propiedades.

Los geotextiles se dividen en dos categorías: tejidos y no tejidos, dependiendo del método de fabricación. Las telas tejidas generalmente tienen mayor resistencia a tensión, mayor valor de módulo y menos estiramiento, mientras que las telas no tejidas tienen mejor

permeabilidad y estiramiento. Los geotextiles son productos muy versátiles y pueden ser utilizados en diferentes maneras.

## **b. Geomalla**

Es un geosintético de polietileno de alta densidad (HDPE), o polipropileno (PP) o poliéster (PET), cuya función principal es de refuerzo. Consiste en una malla reticular (similar a una rejilla), formada de elementos deformados o no deformados, con aberturas de suficiente tamaño para trabar o enclavar el material de relleno que la rodee. Estas pueden ser unidireccionales o bidireccionales.

## **c. Geocompuesto**

Un geocompuesto consiste en una combinación de dos o más tipos de geosintéticos. Por esta razón , también combina las ventajas de cada uno de sus componentes en un solo producto.

## **d. Geocelda**

Son estructuras tridimensionales de polietileno de alta densidad (HDPE) similares a un panal de abeja. Estas se rellenan con suelo orgánico, agregados o concreto.

## **e. Geomembrana**

Son membranas sintéticas impermeables que se utilizan como forro o barrera para controlar la migración de fluidos.

## **f. Geored**

Son estructuras de polietileno o polipropileno formadas por series de nervios paralelos conectados entre sí. Son únicamente utilizados como drenaje y tienen la capacidad de conducir cualquier tipo de líquido o gas.

A continuación se presenta un cuadro simplificado con una clasificación sencilla de los geosintéticos según su apariencia:

CLASIFICACIÓN DE LOS GEOSINTETICOS BASADA EN EL ASPECTO FISICO	
GEOTEXTILES	Tejidos
	No Tejidos Punzonados
GEOMEMBRANAS	Sintéticas (HDPE, PP, PVC, EPDM, etc)
	Bituminosas
	Bentoníticas
GEOREDES	
GEOESTERAS	
GEOCELDAS	
GEOCOMPUESTOS	Hojas Planas
	Tiras
	Drenajes Horizontales
	Drenajes Verticales
GEOMALLAS	Unidireccionales
	Bidireccionales
BIOESTERAS (Paja, Coco, Algodón, etc.)	
BIOREDES (Yute)	

Tabla 5 - Clasificación de Geosintéticos Basada en el Aspecto Físico

## 2. Materiales que Componen los Geosintéticos

Los polímeros sintéticos de mayor uso en la elaboración de los geosintéticos son: polipropileno, poliéster y polietileno, puesto que son altamente resistentes a la degradación

biológica y química. Con menor frecuencia se ha utilizado polímeros del tipo poliamida (nylon) y fibra de vidrio, así como fibras naturales, tales como algodón, yute, etc., pero su uso es esencialmente para aplicaciones temporales.

Con ese propósito, casi siempre se aplican telas permeables y flexibles hechas de fibras sintéticas, que poseen resistencia alta de tensión, aun si están mojadas, módulos grandes de elasticidad, ductilidad alta y flujos plásticos despreciables bajo carga. También es necesario que estas telas sean biológicamente inertes, de modo que no se descompongan en el suelo; que resistan el desgaste, los desgarres, los punzonamientos y la abrasión y que no les afecte la luz ultravioleta antes de instalarlas, los ácidos, álcalis, aceites y una gran variedad de solventes químicos.

Los polímeros de que están hechos la mayoría de los geosintéticos tienen muchas características que dependen del proceso de fabricación. Las propiedades físicas y mecánicas están directamente relacionadas con el mecanismo que une las cadenas moleculares, así como la longitud de las mismas. Las propiedades plásticas pueden ser modificadas mediante combinación de materiales y mezclas con aditivos. La combinación de cualquiera de los factores anteriores determinará la resistencia a la tensión y la flexibilidad o rigidez del producto final.

La durabilidad de los polímeros es influenciada por el grosor, diámetro de fibra, relación de volumen contra área superficial y otros indicadores de exposición al medio ambiente. La degradación del material es directamente proporcional al área de exposición (oxidación, rayos ultravioleta, etc...) e inversamente proporcional al grosor del material (absorción, dispersión, etc...).

Generalmente existen dos tipos principales de polímeros: de polipropileno (PP) y de polietileno (PE). El polímero de polipropileno se compone de cadenas moleculares largas y bien alineadas. Esto da a la estructura rigidez, resistencia a la tensión, buena resistencia a la soldadura plástica, resistencia a los ácidos, alcalinos y la mayoría de los solventes. Tiene baja resistencia al impacto y es frágil en presencia de bajas temperaturas.

El polietileno es uno de los más simples polímeros. Tiene la estructura con menor reactividad química de todos los termoplásticos comerciales. El Polietileno de Alta Densidad (HDPE) es de buena resistencia a la tensión, al impacto, y a los químicos. Proporciona las mejores propiedades mecánicas de los polietilenos, especialmente a altas temperaturas. Sin embargo, necesita ser estabilizado contra la radiación ultravioleta y el polietileno con cadenas moleculares no orientadas es muy frágil bajo cargas.

Además de los polímeros, que son el principal componente en la fabricación de geosintéticos, también existen aditivos y estabilizadores que se utilizan para mejorar aún más las propiedades de estos. Los aditivos más usados son: antioxidantes (previenen la degradación de las uniones de los polímeros. Este proceso es más crítico a altas temperaturas, ya sea en el proceso de fabricación o exposición ambiental), estabilizadores UV (reducen la foto-oxidación producida por la radiación ultravioleta absorbiéndola)

A continuación se enumeran algunas de las propiedades de los polímeros de polipropileno y polietileno:

Propiedad	Polipropileno	Poliétileno
Altas Temperaturas	Hasta 100° C	Hasta 70° C
Bajas Temperaturas	Hasta -10° C	Hasta -70° C
Resistencia a la Tensión	Alta	Moderada
Módulo de Tensión	Muy alta	Moderado
Resistencia a la Compresión	Alta	Moderado
Resistencia al Impacto	Pobre	Buena
Capacidad de Soldadura	Buena	Moderada
Resistencia a Químicos	Buena	Buena
Resistencia a Intemperie	Buena	Buena

Tabla 6 - Propiedades de PP Vrs. PE (Orientado y Estabilizado)

### 3. Funciones y Aplicaciones de los Geosintéticos

#### a. Funciones

Se sabe que los geosintéticos pueden desempeñar más de una función a la vez en una aplicación dada. Sin embargo, una sola función está determinada a ser la más importante y se le considera la función primaria o principal del geosintético, las otras funciones concurrentes son consideradas secundarias.

La identificación de las funciones que debe desempeñar el geosintético es uno de los pasos iniciales en el proceso de diseño. Estas funciones dirigen al Ingeniero a especificar en el mismo las propiedades y métodos de ensayo que deben cumplir los materiales para la aplicación dada.

De acuerdo a lo expuesto por recientes investigadores, se considera que los geosintéticos tienen seis funciones básicas o primarias, dentro de la extensa gama que pueden desarrollar, siendo éstas:

- Separación,
- Refuerzo,
- Drenaje,
- Filtro,
- Barrera para fluidos,
- Protección .

## **i. Separación**

Cuando son usados como separador, los geosintéticos son colocados comúnmente entre dos materiales disímiles para conservar o mejorar la integridad y funcionalidad de ambos durante la vida útil de la estructura, evitando la perjudicial migración de los finos, normalmente plásticos, del suelo natural hacia el suelo de mejores características y propiedades, normalmente suelos granulares y arenosos. En muchas ocasiones el geosintético utilizado como separador incluso mejora el suelo proporcionando refuerzo a los esfuerzos de tensión. Este uso puede ser necesario para prevenir una reducción en la permeabilidad y/o resistencia de un material granular como el balasto, o la base granular bajo el pavimento, o piedra y arena usada como sobrecarga en suelos blandos.

Los geosintéticos pueden ser usados para separar dos suelos susceptibles a congelamiento, constituyendo una barrera capilar para romper el flujo de humedad.

Para este uso son apropiados los geotextiles. Son comúnmente usados para estabilizar un suelo débil ( $\text{CBR} < 3\%$ ) sobre el cual va a ser construida una estructura. Sirven para extender la vida útil de un camino construido sobre un suelo de mediana capacidad ( $3\% < \text{CBR} < 7\%$ ). Evita la mezcla de agregados de la base o sub-base con la capa de

subrasante, con lo cual se preservan los espesores de diseño y de esta manera no se pierda la capacidad soporte de la estructura a lo largo de la vida útil del pavimento.

## **ii. Refuerzo**

Al igual que el concreto y las rocas, el suelo tiene resistencia a la compresión pero muy poca a la tensión, y los geosintéticos están diseñados para resistir los esfuerzos de tensión provocados por las condiciones de carga y servicio a que la estructura esté expuesta. El refuerzo de un suelo blando de fundación (CBR < 5%) en un camino disminuye el grosor de las capas de base y sub-base en la estructura. El geosintético es el responsable de soportar las fuerzas tensionantes que el suelo por sí solo no puede resistir.

Es un método económico y rápido de construcción, y en este caso los materiales más utilizados son los geotextiles tejidos y las geomallas. Pueden ser usados para proveer refuerzo en varias maneras. En muchas ocasiones, los geotextiles usados como separación pueden cumplir también la función de refuerzo.

Colocado debajo de un terraplén, el geosintético reduce el esfuerzo transmitido a las capas inferiores cuando trabaja a tensión bajo la carga, distribuyendo la carga sobre un área más extensa reduciendo su intensidad. Los geotextiles han sido ampliamente usados en la construcción de caminos sobre suelos blandos. Uno de los suelos más blandos que se pueden encontrar son los rellenos hidráulicos. Además pueden ser usados para estabilizar taludes con pendientes pronunciadas.

## **iii. Drenaje**

El drenaje en un geosintético, o función de transmisión, se da cuando el agua se conduce en el mismo plano del material. La función de drenaje requiere que el geosintético tenga gran habilidad de transmitir agua en el plano de la tela, sin dejar pasar las partículas de suelo. Como ejemplo están los drenajes adyacentes a la cara de los muros de retención, en estribos de puentes, en drenajes interceptores en taludes, a la orilla de un pavimento o para conducir gas metano debajo de geomembranas en rellenos sanitarios.

Los geotextiles no tejidos y los punzonados tienen esa habilidad. Al igual que para la función de filtro, los geotextiles no tejidos deben tener por lo menos cinco veces la permeabilidad del suelo adyacente, y los tejidos deben tener un porcentaje de área abierta de 10% o más para suelos limpios ( menos de 5% pasa a través del tamiz N° 200) o 4% o más para otro tipo de suelo.

En situaciones donde se requiera trasladar grandes cantidades de agua o agua a gran velocidad, un material con mayor capacidad de flujo que el geotextil debe ser utilizado, las georedes o geocompuestos son buenos candidatos para estos trabajos.

#### **iv. Filtro**

Esta función consiste en prevenir la migración del suelo hacia el agregado o la tubería de drenaje. Las aplicaciones más comunes son la construcción de sub-drenajes, el control de erosión, drenajes en muros de contención y en esencia son un reemplazo de los filtros graduados o “drenajes franceses”. El agua debe conducirse en un plano perpendicular al del geosintético, sin tener la capacidad de llevar partículas de suelo, y provocar taponamiento de tuberías o capas permeables de suelo.

Debido a la permeabilidad y tamaño de abertura controladas, el geosintético a usar es el geotextil. Los filtros de geotextil usualmente se colocan fácilmente, su grosor es menor a los 300 mils, y debido a que se requiere menos material, son menos costosos que los filtros graduados. Los filtros de geotextil son usualmente usados alrededor de piedra triturada o tuberías de sub-drenaje, bajo estructuras de control de erosión, detrás de muros de contención, y para remplazar algunos o todos los filtros graduados necesarios en un proyecto específico de movimiento de tierras, aun en presas de tierra. Nunca se debe colocar el geotextil en una posición en la que se restrinja el flujo de agua. Se incorporan importantes consideraciones de diseño para un sistema de drenaje con geotextil que incluyen no sólo una adecuada capacidad de flujo, sino capacidad de retención de suelo. Generalmente, los geotextiles no tejidos deben tener por lo menos cinco veces la permeabilidad del suelo adyacente, y los tejidos deben tener un porcentaje de área abierta de 10% o más para suelos limpios ( menos de 5% para a través del tamiz Nº 200) o 4% o más para otro tipo de suelo.

En situaciones donde se requiera trasladar grandes cantidades de agua o agua a gran velocidad, un material con mayor capacidad de flujo que el geotextil debe ser utilizado, las georedes o geocompuestos son buenos candidatos para estos trabajos.

## **v. Barrera para fluidos**

Esta función consiste en la prevención del movimiento de flujos de líquidos o gases a través del plano del geosintético de un lugar a otro. Por ejemplo en rehabilitación de carreteras pavimentadas, los geotextiles no tejidos proveen la función de barrera cuando son saturados con materiales bituminosos al colocarlos sobre la superficie del pavimento existente, previo a colocar la nueva carpeta de asfalto. Con ello se incorpora una capa

impermeable que restringe el flujo vertical del agua dentro de la estructura del pavimento, con lo cual se incrementa la vida útil de la carretera.

## **vi. Protección**

Esta función se refiere al uso de geosintéticos para proteger otros componentes dentro de la aplicación total. Los usos más frecuentes son por ejemplo: para proteger geomembranas de posibles daños que le puedan hacer partículas de roca, escombros y otros materiales durante la instalación y mientras este en servicio; en el control de la erosión de suelos su uso es a través de mantas, almohadillas, formas, etc., para reducir la erosión provocada por la lluvia y corrientes de agua superficiales.

A continuación se hace un resumen de las principales funciones de cada geosintético:

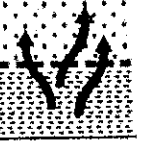
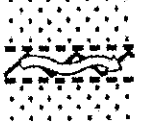
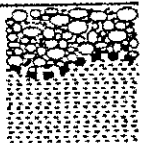
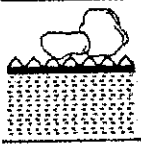

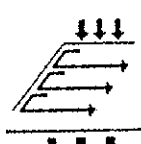
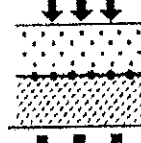
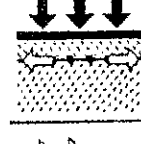
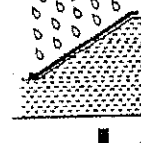

FUNCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	PRODUCTO SUGERIDO
Filtración		Permite el paso de fluidos previniendo la migración de finos	Geotextiles, Geocompuestos
Drenaje		Transporte de fluidos	Georedes, Geocompuestos
Separación		Prevención de la mezcla de dos tipos de suelos o materiales	Geotextiles, Geocompuestos
Protección		Evita daños a estructuras, materiales u otros geosintéticos	Geotextiles No Tejidos, Georedes, Geocompuestos
Impermeabilización		Barrera de fluidos	Geomembranas, Geocompuestos
Refuerzo de Muros y Taludes con pendientes pronunciadas		Proporciona resistencia a esfuerzos de tensión en la masa del suelo	Geomallas unidireccionales, Geotextiles Tejidos
Refuerzo de suelos blandos		Incrementa la capacidad portante	Geomallas bidireccionales, Geotextiles, Geocompuestos
Refuerzo en Concreto Hidráulico y Concreto Asfáltico		Provee resistencia a los esfuerzos de tensión y la fatiga	Geomallas bidireccionales, Geotextiles No Tejidos
Control de Erosión o Estabilización superficial		Evita el desprendimiento y transporte de partículas de suelo por lluvia, escorrentía superficial y viento; permite un mejor anclaje de la raíz en el suelo	Geoesteras, Geoceldas, Bioesteras, Biorredes
Confinamiento		Restricción del movimiento lateral de masas de suelos	Geoceldas

Tabla 7 - Funciones de los Geosintéticos

## **b. Aplicaciones**

Las áreas de aplicación de los geosintéticos son numerosas y en constante aumento, por lo que a continuación se mencionan las más comunes con el geosintético de mayor uso y la o las funciones más representativas de desempeño,

### **i. Separación / Estabilización**

El uso de geotextiles en esta aplicación se refiere a dos casos concretos:

- La simple separación de suelos de características diferentes, en el cual tenemos suelos típicamente de naturaleza plástica con  $\text{CBR} > 3\%$  y  $\text{CBR} < 8\%$ . La función de separación del geotextil es prevenir la contaminación de la base estructural del pavimento y debe tener las características de un sistema de filtración y drenaje. Un geotextil usado como separador debe ser proyectado para que resista los daños de instalación y cumpla con los requerimientos hidráulicos que sean especificados para esta aplicación.
- El otro caso se refiere a suelos blandos con  $\text{CBR} < 3\%$  y cohesión  $c < 86.2 \text{ kPa}$ . La función del geotextil no sólo es separación sino también estabilización. Primero, el geotextil provee una restricción localizada del agregado, y segundo, puede reforzar. El geotextil estabilizador desarrolla una función vital: evita la migración de finos hacia la estructura granular y previene el fallo local de la capacidad portante del agregado con la subrasante.

## ii. Repavimentación

En este caso, el geotextil no tejido se usa para crear un sistema de membrana de entrecapa que impermeabiliza y retarda las grietas reflectivas y de fatiga. El éxito de las capas de rodadura asfáltica con geotextil de pavimentación depende principalmente de la calidad de construcción, del tipo de geotextil y su retención asfáltica, del grado de deterioro del pavimento existente y mantenimientos realizados, del espesor de la nueva capa de concreto asfáltico y de las condiciones meteorológicas prevalecientes en el momento de la repavimentación. Este sistema se usa para prolongar la vida útil y para reducir el mantenimiento de la estructura del pavimento.

## iii. Filtración y Drenaje

Es otra de las aplicaciones más usadas de los geotextiles, en que adecuadamente diseñado y seleccionado puede realizar la misma función de filtración que un filtro de capas de agregados de tamaños graduados. El geotextil usado como filtro debe cumplir con dos criterios básicos: el geotextil debe retener las partículas de suelos finos mientras que permita el paso del agua a través del plano del geotextil desde el suelo que está reteniendo. Principios básicos de filtración son usados para establecer criterios de diseños para los geotextiles, los cuales son:

- Retención: el geotextil debe retener el suelo.
- Permeabilidad: el geotextil debe permitir el paso de una gran cantidad de agua sin restringir el flujo.
- Colmatación: el flujo debe mantenerse a través de la vida útil de la estructura.
- Supervivencia y Durabilidad: el geotextil debe resistir y sobrevivir los esfuerzos producidos durante la instalación y a través de la vida útil de la estructura.

#### **iv. Refuerzo**

En muros de retención y refuerzo de taludes con pendientes muy pronunciadas, el uso de los geosintéticos provee al suelo de resistencia a la tensión producida por las cargas y los empujes naturales de los suelos, así como la presión hidrostática en aquellos casos con altas concentraciones de agua dentro del suelo retenido. Esta función de refuerzo ha sido usada extensamente como un método económico para construir muros de retención ecológicos o con bloques segmentados de mampostería, asimismo, son ampliamente usados para construir terraplenes sobre suelos blandos o donde se tiene limitación de espacio.

A continuación se resumen las principales aplicaciones de los geosintéticos según su función:

Funciones y productos

Aplicaciones

	FUNCIONES							PRODUCTOS									
	Filtracion	Drenaje	Separacion	Proteccion	Impermeabilizacion	Refuerzo	Control de erosion	Confinamiento	Geotextil tejido	Geotextil no tejido	Geomallas	Georedes	Geomembranas	Geosteras	Geoceldas	Bioesteras/Biorredes	Geocompuestos
Taludes de suelo reforzado						•	•		•		•			•	•		•
Muros de suelo reforzado						•			•		•						•
Estabilizacion bases para camino			•			•		•	•	•					•		
Refuerzo de asfalto			•			•			•	•							
Estabilizacion de bases de vias férreas			•			•		•	•	•					•		
Terraplenes en suelos			•			•			•	•	•						
Rellenos sanitarios	•	•	•	•	•					•		•	•				•
Drenaje	•	•							•			•					•
Consolidacion de suelos blandos	•	•															•
Tuneles	•	•			•				•			•	•				•
Control de erosión en Taludes							•	•						•	•	•	
Refuerzo secundario de concreto						•				•							
Concreto a prueba de agua					•	•							•				•

Tabla 8 – Aplicaciones de los Geosintéticos

### **III. Planteamiento del Problema**

Existen varios métodos de diseño de pavimentos y normas de calidad de suelos. Sin embargo, a lo largo de los años se han ido escogiendo los métodos que por su confiabilidad y facilidad de aplicación son los más usados. También las normas han sufrido un proceso de homogeneización. En esta etapa de la investigación se hace una reseña de las pruebas más importantes a las que se debería someter un suelo que servirá como subrasante y ciertas características que tiene que cumplir para que sea de buena calidad. En caso de que no las cumpla en su totalidad deberá ser estabilizado, por lo que después se procederá a diseñar pavimentos con el uso de geosintéticos como agente estabilizador.

#### **A. Pruebas de Calidad del Suelo**

Los suelos pueden presentar muchas características, muy diferentes unas de otras. El problema en muchas ocasiones está en qué características son las que se deben tomar en cuenta para evaluar un suelo como subrasante. Además, según los parámetros bajo los cuales se trabajará, se pueden identificar los suelos que necesitan un tratamiento previo a la construcción para que se puedan utilizar. Básicamente un suelo blando es un suelo que no puede soportar las cargas de diseño con las que cuenta el proyecto de pavimento. Esta incapacidad de cumplir su objetivo principal obliga a conocer ciertas características que influyen directa o indirectamente con la resistencia del suelo. Estas características se evaluarán y se determinará cuáles se deben mejorar para que el suelo sea útil y no haya que reemplazarlo.

A partir de estas necesidades se podrá escoger un geosintético adecuado a las necesidades del proyecto.

## **1. Granulometría y Graduación de los Suelos**

Los suelos son generalmente descritos por el tamaño de las partículas de sus componentes. Se ha tratado por muchos años de dividir en secciones la gran escala de tamaños que poseen los diferentes tipos de suelos, pero la escala más utilizada, es la adoptada por la ASTM (American Standard For Testing and Materials). Tiene tres grupos principales, que son gravas, con granos mayores que el tamiz N°4 (4.76 mm); arenas, con partículas menores que el tamiz N°4 y mayores que el tamiz N°200 (0.074 mm); y los finos, menores que el tamiz N°200. Debido a que existen otros tamices con aberturas intermedias, se crearon sub-divisiones para estos grupos:

Suelo uniforme: es un suelo en que casi todos los granos son del mismo tamaño. La curva granulométrica es empinada.

Suelo de buena graduación: es un suelo con gran variedad de tamaños de grano representado por una curva suave.

Suelo de graduación discontinua: es un suelo que está compuesto de dos o más suelos uniformes, indicado por una curva con inflexiones.

Suelo uniforme meteorizado: es un suelo que se formó originalmente por meteorización mecánica y que después se alteró químicamente. Está representado por una curva

empinada en la sección que corresponde a la arena y que se hace larga y aplanada en la sección de los finos.

Coefficiente de uniformidad ( $C_u$ ): es un índice que se define por la relación:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

En donde el valor de " $D_{60}$ " es el diámetro en el cual el suelo tiene 60% en peso de partículas más finas, y el valor de " $D_{10}$ " es el diámetro en el cual el suelo tiene 10% en peso de partículas más finas.

Los suelos que tienen  $C_u$  menor que 4 se dice que son uniformes; los suelos con  $C_u$  mayor que 6 (para suelos gravosos) o 4 (para suelos arenosos) están bien graduados, siempre que la curva granulométrica sea suave y bastante simétrica.

Coefficiente de Curvatura ( $C_c$ ): es un índice que está definido por:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$$

En donde el valor de " $D_{30}$ " es el diámetro en el cual el suelo tiene 30% en peso de partículas más finas.

El coeficiente de curvatura para un suelo bien graduado debe estar cerca de la unidad.

## a. Cómo afecta la graduación en el comportamiento y la calidad de un suelo

- Los suelos pobremente graduados, aquellos con un pequeño rango de diámetro de partículas, contienen una mayor proporción de vacíos que los suelos bien graduados, en los cuales las partículas finas llenan los vacíos que se forman entre los granos gruesos. Por lo tanto, la graduación influye en la densidad de los suelos. En el caso de suelos de granos finos, la proporción de vacíos es relativamente alta, sin embargo, estos vacíos son extremadamente pequeños. Ya que la proporción y el tamaño de los vacíos afecta el flujo de agua en un suelo, la graduación puede influenciar la permeabilidad.
- La consolidación comprende exprimir el agua del suelo sacándola de los vacíos, y bajo carga, los granos de suelo van acercándose. La permeabilidad del suelo es la que define qué tan rápido se consolida un suelo. Como los suelos de grano fino y los pobremente graduados tienen una mayor proporción de vacíos, y tienden a estar peor empacados que los suelos de grano grueso y buena graduación, tienden a consolidarse más. Los suelos de grano fino son más compresibles que los de grano grueso, se consolidan a una menor velocidad y son entonces de especial importancia para el ingeniero. El grosor de los granos es muy pequeño para ser medido por medios convencionales, y a éste tamaño de partículas las propiedades de los minerales presentes son de mayor importancia que la graduación. Por lo tanto, la correlación entre graduación y consolidación no existe. Sin embargo, el efecto de la graduación en la consolidación es tomado en cuenta indirectamente en algunas clasificaciones de

suelos que son utilizadas para predecir el comportamiento de los suelos en movimientos de tierras y subrasantes de pavimentos.

- La resistencia al corte también es afectada por la graduación, ya que esta influencia el contacto entre partículas. Sin embargo, la correlación entre la graduación y la resistencia al corte no se puede realizar por causa de otros factores, como la angularidad de las partículas, la presión de confinamiento, la compactación, el historial de consolidación y los tipos de minerales presentes en las arcillas. De forma similar, la graduación afecta el CBR del suelo.
- Una graduación impropia de la subrasante puede hacer que haya migración de finos hacia el material de base al contaminar el material. Esto impide el drenaje, reduce la resistencia del suelo que conforma la base y disminuye el espesor efectivo de la misma.

## **2. Comportamiento Plástico y Límites de Atterberg**

Límite Plástico (LP): es el contenido de humedad del suelo por debajo del cual éste pasa del estado plástico al semisólido.

Límite Líquido (LL): es el contenido de humedad por encima del cual el suelo comienza a comportarse más como un líquido viscoso que como un sólido. Pasa del estado plástico al líquido.

Índice de Plasticidad (IP): Es el intervalo de humedad en el cual el suelo se comporta de forma plástica. En este estado, el suelo puede deformarse o remodelarse sin la formación de grietas y sin que cambie el volumen. Está definido por:

$$IP = LL - LP$$

Límite de Retracción (LR): es el contenido de humedad por debajo del cual el volumen del suelo no sigue decreciendo.

Índice de Liquidez (IL): es una relación que sirve para localizar el contenido natural de humedad de la arcilla en comparación a los límites líquido y plástico. Está definido por:

$$I_L = \frac{w - LP}{LL - LP} = \frac{w - LP}{IP}$$

En donde "w" es el contenido natural de humedad del suelo que existe en el campo. Un índice de liquidez menor a 0 indica que el contenido de humedad está por debajo del límite plástico, uno igual a 0 identifica al suelo en su límite plástico, uno mayor que 1 muestra que el contenido de humedad está por encima del límite líquido y uno entre 0 y 1 indica que se encuentra en un estado plástico.

Gráfico de Plasticidad: es un gráfico desarrollado por A.Casagrande en el que las ordenadas representen valores del índice de plasticidad, y las abscisas valores del límite líquido. Se divide en seis regiones por la recta "A", que tiene por ecuación:

$$I_p = 0.73(LL - 20)$$

y dos rectas verticales que tienen por ecuación:

$$LL = 30$$

$$LL = 50$$

respectivamente. Los suelos representados por puntos por encima de la línea "A" son arcillas inorgánicas y su plasticidad puede ser baja ( $LL < 30$ ), media ( $30 < LL < 50$ ) o alta ( $LL > 50$ ). Los suelos representados por puntos por debajo de la línea "A" son limos inorgánicos de compresibilidad baja ( $LL < 30$ ), media ( $30 < LL < 50$ ) o alta ( $LL > 50$ ); limos orgánicos ( $30 < LL < 50$ ); y arcillas orgánicas ( $LL > 50$ ).

Diferenciación entre suelos orgánicos y no orgánicos: si el límite líquido de una muestra secada al horno es inferior a 0.75 veces el de una muestra húmeda o secada al aire, el suelo es considerado como orgánico.

Los límites de Atterberg varían con la proporción de arcilla en el suelo, con el tipo de mineral arcilloso, y con la naturaleza de los iones adsorbidos en la superficie de la arcilla.

Los límites de Atterberg se efectúan en suelos remoldeados y únicamente a la fracción del suelo que pasa por el tamiz N°40.

## a. Cómo afecta la plasticidad en el comportamiento y la calidad del suelo

- Todos los suelos en su límite líquido presentan similar resistencia al esfuerzo de corte sin drenar, y es de aproximadamente  $1-2 \text{ kN/m}^2$ . Del mismo modo presentan similar resistencia al esfuerzo de corte sin drenar en su límite plástico, de aproximadamente  $100-200 \text{ kN/m}^2$ . Por lo tanto, esta resistencia al esfuerzo de corte está directamente relacionada con el contenido de humedad del suelo. Un suelo con un bajo índice de plasticidad requiere una pequeña reducción en el contenido de humedad para tener un substancial aumento en la resistencia al esfuerzo de corte. Del mismo modo, un suelo con alto índice de plasticidad no se estabilizará bajo carga hasta que se dé una gran variación en el contenido de humedad.
- Así como el tamaño de las partículas y la graduación puede ser fácilmente observada en suelos de grano grueso, es obvio que las arcillas son de alguna manera diferentes debido a las propiedades plásticas que las gravas y arenas no tienen.
- La plasticidad es la habilidad de un material de ser moldeado (deformado de forma irreversible) sin que se fracture. En los suelos de grano fino, esto se debe al comportamiento electroquímico de los minerales de arcilla y es único de los suelos que los contienen. Son estructuras cargadas negativamente en su superficie. Los cationes presentes en el agua que se encuentra en los poros provocan una atracción entre estos y el mineral arcilloso, lo que forma una red de uniones en el suelo. Además, como el agua también está polarizada, las moléculas de agua adyacentes a los minerales de arcilla son atraídos y unidos (adsorbidos) a la superficie para formar un complejo de

adsorción. Esta atracción se mantiene aún cuando se presentan grandes deformaciones entre las partículas de arcilla, para producir el fenómeno de plasticidad.

- Los suelos plásticos, como las arcillas, son generalmente llamados “cohesivos”, para distinguirlos de los suelos no plásticos, arenas y gravas, que son descritos como granulares o no cohesivos. Sin embargo, aunque “plástico” y “cohesivo” puedan parecer sinónimos hay ciertas diferencias entre los dos términos. La plasticidad es la propiedad que permite deformación sin ruptura, la cohesión provee de resistencia al corte que permite al suelo mantener su forma bajo carga, aún si no está confinado.
- Los suelos con un índice de plasticidad muy alto tienen un alto potencial de cambio de volumen. El aumento en el contenido de humedad resulta en hinchamiento y consecuente deterioro del pavimento. La pérdida de humedad causa encogimiento, lo que produce grietas que se transmiten a la superficie de la estructura. Estas grietas sirven después como cauce para que el agua penetre en el suelo de subrasante.

### **3. Ensayo de Compactación**

La compactación es el proceso mediante el cual un suelo se vuelve denso. La densificación se lleva a cabo al presionar las partículas para que se acerquen más, expeliendo el aire de la masa de suelo, es decir reducir su relación de vacíos. La compactación de un suelo aumenta su densidad y resistencia, al mismo tiempo que reduce su permeabilidad. Estos cambios son deseables en un suelo, y la compactación es el método más sencillo de mejorar las propiedades ingenieriles de un suelo.

La prueba de compactación es realizada en laboratorio compactando capas de suelo en un cilindro, usando cierta cantidad de golpes con un martillo de impacto de determinado peso, según el método de compactación requerido (Proctor Normal o Estándar, o Proctor Modificado). La prueba se repite varias veces, con contenidos de humedad diferentes, hasta que se definen suficientes puntos como para establecer la relación entre el contenido de agua y la densidad. Generalmente, cinco puntos escogidos definen la curva. El punto más alto de la curva es la densidad seca óptima y el contenido óptimo de humedad, a una energía de compactación específica. Con un contenido de humedad por encima del óptimo, la densidad seca disminuye. Si la energía de compactación aumenta, la densidad seca óptima crece y el contenido óptimo de humedad disminuye.

La eficacia de la energía de compactación depende del tipo de partículas que componen el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo. En un suelo cohesivo la compactación está acompañada, principalmente, por distorsión y reorientación, las cuales son resistidas por las fuerzas atractivas de la cohesión. A medida que la humedad del suelo aumenta la cohesión del suelo disminuye, la resistencia se hace menor y el esfuerzo de compactación, más efectivo. En un suelo no cohesivo o en una roca partida, la compactación del suelo se logra principalmente por la reorientación de los granos, aunque la fractura de los granos en los puntos de contacto es algunas veces importante. La reorientación es resistida por el roce entre las partículas. La tensión capilar de la película de humedad entre los granos aumenta la presión de contacto y por tanto la fricción. A medida que la humedad aumenta, la tensión capilar disminuye y el esfuerzo de compactación es más efectivo.

En algunas arenas y en la roca partida el aplastamiento local de los puntos de contacto entre partículas es el mecanismo más importante de la compactación. La humedad acelera

el aplastamiento y por lo tanto ayuda la compactación y esta aceleración del aplastamiento reduce los futuros asentamientos después de ejecutada la obra. Sin embargo, si la humedad es muy alta, la compactación y la reducción de la relación de vacíos de los suelos, tanto cohesivos como no cohesivos, los lleva a la saturación. El esfuerzo neutro que se crea, impide que continúe disminuyendo la relación de vacíos y, por lo tanto, el esfuerzo adicional de compactación que se aplique, se perderá. La saturación es, por lo tanto, el límite teórico de la compactación para una humedad dada. En los suelos no cohesivos y en roca triturada, la permeabilidad es tan grande que no se puede producir la saturación durante la construcción, a menos que la masa esté inundada. El peso específico límite a que pueda llegarse, está regulado por la geometría de las partículas y por el agrupamiento estructural más favorable, que se llama rellamamiento y que corresponde a la relación de vacíos mínima.

A continuación se hace una identificación del máximo peso específico, contenido de humedad y calidad de drenaje, y permeabilidad de los suelos, según la clasificación USDS:

Tipo de Suelo	Máximo Peso Específico Seco, Proctor Normal (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido Óptimo de Humedad (%)	Drenaje y Permeabilidad
GW	2,000 – 2,160	11 - 8	Buen drenaje, permeable
GP	1,840 – 2,000	14 – 11	Buen drenaje, permeable
GM	1,920 – 2,160	12 – 8	Drenaje deficiente, semipermeable
GC	1,840 – 2,080	14 – 9	Drenaje deficiente, impermeable
SW	1,760 – 2,080	16 – 9	Buen drenaje, permeable
SP	1,600 – 1,920	21 – 12	Buen drenaje, permeable
SM	1,760 – 2,000	16 – 11	Drenaje deficiente, impermeable
SC	1,680 – 2,000	19 – 11	Drenaje deficiente, impermeable
ML	1,520 – 1,920	24 – 12	Drenaje deficiente, impermeable
CL	1,520 – 1,920	24 – 12	No hay drenaje, impermeable
OL	1,280 – 1,600	33 – 21	Drenaje deficiente, impermeable
MH	1,120 – 1,520	40 – 24	Drenaje deficiente, impermeable
CH	1,280 – 1,680	36 – 19	No hay drenaje, impermeable
OH	1,040 – 1,600	45 – 21	No hay drenaje, impermeable
Pt	-	-	Drenaje aceptable a deficiente

Tabla 9 - Resultados Aproximados del Ensayo de Compactación

## **a. Cómo afectan la densidad y la compactación en el comportamiento y la calidad del suelo**

- La compactación aumenta la densidad y disminuye el contenido de humedad, aun cuando pueda estar sometido a saturación. Esto provoca un aumento en la resistencia.
- Un drenaje inadecuado puede permitir un aumento en el contenido de humedad. Esto provoca una pérdida de resistencia e hinchamiento del suelo.

## **4. California Bearing Ratio (CBR)**

Esta prueba fue desarrollada por el California Highway Department (Departamento de Carreteras De California). El procedimiento de diseño del California Bearing Ratio (CBR) es la base principal para el procedimiento de diseño de pavimentos flexibles. Es utilizado para el diseño de pavimentos y como un estándar de comparación para validar procedimientos de diseño menos aceptados en muchos países alrededor del mundo.

La prueba CBR es tanto una prueba de laboratorio como de campo. Puede ser utilizada para probar muestras compactadas en laboratorio o muestras tomadas del campo; y también puede realizarse en muestras in situ. Las pruebas hechas a muestras compactadas en laboratorio sirven para determinar el CBR de diseño para un material en particular; por lo que se deben realizar muchas pruebas para identificar el valor correcto del CBR a utilizar. El propósito de realizar las pruebas en muestras de campo es para determinar las condiciones de un relleno compactado en el campo de trabajo. Esta prueba es más apropiada y da resultados más confiables para suelos de graduación fina, sin embargo es usado también

para caracterizar la resistencia de mezclas de agregados para suelo (por ejemplo en subbases) y para la base. En suelos no cohesivos, especialmente aquellos con partículas grandes, la realización de la prueba es difícil.

La prueba del CBR provee un índice de resistencia, pero no es un medidor de resistencia, como lo son las pruebas de compresión no confinada, la triaxial y la de corte directo. El CBR mide la resistencia a la penetración de un suelo y compara los resultados con un juego de valores de referencia para determinar el valor del CBR para ese suelo en particular.

Las muestras de suelo deben ser preparadas para duplicar condiciones de densidad y humedad existentes o anticipadas en el campo. La condición más crítica para la mayoría de los materiales se presenta cuando el contenido de humedad es el máximo, eso quiere decir que está saturado y baja la resistencia al mínimo. Por esta razón, la prueba del CBR es comúnmente realizada en muestras que han estado sumergidas en agua por 4 días, confinadas en un molde, bajo una carga igual a la que se planea colocar en las capas superiores. El método exacto para preparar la prueba depende del tipo de suelo que se vaya a analizar; hay diferentes procedimientos para arenas sin cohesión y grava, suelos cohesivos y suelos expansivos. Los procedimientos para la preparación de la muestra y la prueba del CBR están proporcionados en ASTM D 1883.

Para conducir una prueba adecuada de CBR, tienen que desarrollarse tres curvas de compactación, cada una usando 12, 25 y 55 golpes por capa.

A continuación se muestran los diferentes valores de CBR que poseen los suelos según la clasificación USDS:

Tipo de Suelo	Valor de CBR (%)
GW	60 – 80
GP	35 – 60
GM	40 – 80
GC	20 – 40
SW	20 – 50
SP	10 – 25
SM	20 – 40
SC	10 – 20
CL	5 – 15
ML	5 – 15
OL	4 – 8
CH	3 – 5
MH	4 – 8
OH	3 – 5
Pt	< 1

Tabla 10 - Valores Tentativos de CBR para Suelos

## 5. Prueba de Resistencia al Esfuerzo Cortante

La resistencia al corte de un suelo es una propiedad fundamental que es afectada por numerosos factores difíciles de determinar con exactitud. Depende de su composición mineralógica, el tamaño de las partículas, forma de los granos, condiciones de humedad, condiciones de drenaje, historial de esfuerzos anteriores, esfuerzos de falla y método de prueba.

La resistencia al corte es importante, ya que controla en gran parte la capacidad de carga de un suelo, la estabilidad en taludes, el diseño de cimentaciones, la resistencia bajo cargas en movimiento y casi cualquier otro caso de estabilidad bajo cualquier tipo de carga.

La resistencia al corte de un suelo está compuesta de dos componentes básicos: la cohesión (o adhesión entre partículas) y la fricción (resistencia al movimiento causado por el contacto entre partículas). Estos parámetros son determinados usualmente en una prueba de laboratorio. Las muestras de suelo son probadas bajo distintas condiciones de esfuerzo y los resultados son analizados al utilizar círculos de esfuerzo de Mohr para definir la envolvente. Determinar cuál de estos componentes es el que resiste y evita la falla depende de muchos factores incluyendo el tipo de material, la carga aplicada, la presencia de fallas existentes y el historial de esfuerzos del suelo.

Resistencia por fricción: si tomamos un bloque al que se le aplica una fuerza  $P$  a un ángulo de oblicuidad  $\alpha$ , esta fuerza se puede dividir en dos componentes, una vertical ( $N$ , componente de esfuerzo normal) y otra horizontal ( $T$ , componente de esfuerzo cortante). La fuerza opositora a  $T$  es la fuerza friccionante ( $N_f$ ), en donde  $f$  es el coeficiente de fricción, y depende directamente de la componente  $N$ . El ángulo  $\phi$  es el ángulo de oblicuidad máximo que puede tener la fuerza  $P$  sin que el bloque se deslice. La resistencia máxima de corte (dada en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $\text{kPa}$ , o  $\text{tsf}$ ) es:

$$S_{\max} = N \tan \phi$$

en donde:

$S_{\max}$  = resistencia máxima al corte

$N$  = magnitud de la componente vertical de  $P$  ( $N$ )

$\phi$  = ángulo máximo de oblicuidad

Resistencia por cohesión: es generalmente considerada como el adhesivo superficial entre partículas coloidales resultante de fuerzas como la electromagnética. Es independiente de las fuerzas externas, y la resistencia de un material que presenta cohesión y fricción puede expresarse como:

$$s = c + \sigma_n \tan \phi$$

en donde:

s = resistencia al esfuerzo de corte

c = cohesión

$\sigma$  = esfuerzo normal sobre el plano

$\phi$  = ángulo de fricción interna

En suelos no cohesivos, la envolvente de Mohr pasa por el origen, y la resistencia es expresada en términos del ángulo de fricción interna como:

$$s = \sigma_n \tan \phi$$

En suelos cohesivos la envolvente intercepta el eje de esfuerzo de corte en un valor tomado como la cohesión, y la resistencia está dada por:

$$s = c + \sigma_n \tan \phi$$

## a. Factores que afectan la resistencia al corte

Hay muchas variables que pueden afectar la resistencia al corte de un suelo, sin embargo podemos clasificarlas en tres grupos generales (1) características del material, (2) factores externos, y (3) metodología de prueba empleada para medir parámetros.

Características del material: En suelos granulares sin cohesión, el ángulo de fricción, en la mayoría de los casos, aumenta cuando crece la proporción de partículas gruesas, la rugosidad de los granos, y la densidad relativa. La mineralogía puede ser importante: los granos de cuarzo son casi indestructibles, pero los granos de arenas calcáreas son relativamente suaves y se rompen con mayor facilidad.

En suelos arcillosos, la resistencia depende principalmente del grado de preesfuerzo indicado por la consistencia, se incrementa cuando la consistencia se va haciendo más dura. En arcillas normalmente consolidadas, la resistencia drenada generalmente disminuye cuando el índice de plasticidad aumenta. A medida que la proporción de material granular aumenta, la resistencia se incrementa.

Factores externos: los factores externos que afectan la resistencia del suelo incluyen muchas formas de procesos naturales que pueden resultar en incremento o disminución de la misma. La resistencia puede ser disminuida por intemperismo químico (al ser afectada la granulometría). El nivel de consolidación (en las arcillas) o compresión (en arenas) influye en la resistencia del suelo. Las cargas o fuerzas a las que ha sido sometido el suelo durante el proceso de formación y los materiales a su alrededor. Al aumentar el nivel de consolidación la resistencia al corte se incrementa.

Pruebas para medir la resistencia al esfuerzo de corte: para determinar la resistencia al esfuerzo de corte de un suelo, la prueba triaxial es la más versátil. El comportamiento del suelo durante la prueba de laboratorio y bajo cargas de campo es tremendamente influenciado por las condiciones de drenaje que existen. Por esta razón, se han desarrollado varias versiones de la prueba para obtener la resistencia del material bajo diferentes condiciones (controladas) de drenaje: No consolidada y no drenada, consolidada no drenada, consolidada no drenada con medición de la presión de poro y consolidada drenada. Para seleccionar la prueba correcta a realizar, se deberán simular las condiciones de campo. La prueba triaxial es una excelente herramienta para pronosticar la resistencia al esfuerzo de corte de los suelos en numerosas situaciones.

## **B. Subrasante: Funciones y Requerimientos**

### **1. Funciones y Requerimientos para una Subrasante**

Una subrasante tiene los mismos requisitos en general que un relleno: resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y la retracción; además debe ser lo suficientemente rígida para evitar una deformación excesiva por efecto de las cargas accidentales.

Las investigaciones de los materiales que se tenga intención de utilizar en las subrasantes, son similares a las de los rellenos. Se debe tomar un gran número de muestras en las

posibles áreas de préstamo y en la capa superior del suelo virgen, donde no se vaya a emplear relleno. Estas muestras se clasificarán visualmente y por pruebas de laboratorio. Se hace una evaluación preliminar de sus cualidades basándose en correlaciones empíricas de comportamiento, de acuerdo con la clase de suelo.

Las propiedades deseadas en un suelo que va a ser utilizado como subrasante en un camino son:

- Resistencia adecuada,
- Compresión y expansión aceptables,
- Drenaje adecuado,
- Buena compactación.

Algunas de estas características pueden ser proporcionadas por métodos adecuados de construcción. Mientras tanto, los materiales con buena capacidad de drenaje son recomendados, pero si no están disponibles localmente, un drenaje adecuado se puede lograr mediante la instalación de un sistema de recolección de agua. Los requerimientos de resistencia para los materiales a colocar en la base son altos, y únicamente materiales de buena calidad serán aceptados. Sin embargo, materiales con menos resistencia se pueden utilizar en la subrasante, al compensar esta deficiencia con una base de mayor grosor, o al agregar algún tipo de geosintético. Es importante realizar pruebas de campo y/o de laboratorio para poder hacer la clasificación dentro de los sistemas de clasificación de suelos, que proveen una ayuda inicial sobre el comportamiento de los mismos.

## **a. Granulometría**

Para lograr una subrasante satisfactoria, se debe tener no más de 35% de material en peso, que pase por el tamiz N° 200.

## **b. Plasticidad**

Los suelos con límites líquidos mayores a 40 e índices de plasticidad mayores de 10 presentan problemas al ser conformados como subrasantes.

## **c. Compactación**

Para una subrasante, los requerimientos de compactación son los siguientes: si el CBR del suelo es menor a 20, deberá alcanzarse el 90% de compactación en suelos cohesivos, y 95% en suelos no cohesivos. Para suelos con CBR mayor a 20, deberá alcanzarse el 100% de compactación.

## **d. California Bearing Ratio (CBR) y resistencia al esfuerzo de corte**

Con los datos obtenidos en las pruebas anteriores, se determinará el valor del CBR y la resistencia al esfuerzo de corte del suelo a estudiar. Estos valores definen la calidad del suelo con el que se va a trabajar, los procedimientos a emplear para mejorar sus características y cual va a ser el grosor del pavimento que se va a construir.

## **IV. Objetivos de la Investigación**

### **A. Objetivos Generales**

- Conocer cuáles son los diferentes tipos de suelos que se pueden encontrar.
- Determinar cuáles son las características principales que se deben determinar en un suelo.
- Interpretar los resultados para deducir si un suelo necesita estabilización.
- Conocer los geosintéticos y saber cuales son sus funciones y aplicaciones.

### **B. Objetivos Específicos**

- Plantear el uso de geosintéticos como estabilizador de suelos.
- Determinar cuáles son los geosintéticos que se pueden utilizar para refuerzo estructural de caminos y qué consideraciones se deben tomar en cuenta.
- Saber cuál es la contribución de los geosintéticos en el diseño de pavimentos.
- Conocer las cualidades y desventajas que presentan los geosintéticos como refuerzo estructural.
- Saber cómo instalar los geosintéticos en la construcción de estructuras de pavimento.

## V. Planteamiento de la Hipótesis

Al tener conocimiento de los tipos de suelos existentes y de los métodos de estabilización más utilizados, es más sencillo formarse una idea precisa de lo que se requiere en un trabajo de estabilización.

Además, la mecánica de suelos nos permite evaluar cualquier tipo de material y considerar su uso en una estructura de pavimento al seguir las normas establecidas.

Por lo tanto, esta información sumada a las características, funciones y aplicaciones de los materiales geosintéticos nos permite escoger un método más de estabilización.

Es por eso que el fin de esta investigación es probar que el uso de materiales geosintéticos mejora la calidad de suelos blandos al proveer refuerzo estructural. El estudio se enfocará en el caso específico del uso de suelos para caminos.

Los requerimientos de un suelo que servirá como subrasante, el diseño de pavimentos, la selección de un material adecuado como agente estabilizador y los procedimientos para aplicarlo en obra nos indicarán si es factible considerar su uso.

## **VI. Metodología**

### **A. Metodología de la Investigación**

En la presente investigación se pretende conocer cuáles son las funciones de los geosintéticos y conocer su aplicación en la estabilización de suelos. Se describirán cuáles son los posibles métodos de diseño, el diseño del refuerzo, la selección del geosintético adecuado y la correcta instalación del mismo.

El diseño del refuerzo se plantea como una guía al diseño del pavimento cuando se utilizan geosintéticos para mejorar las características del suelo. Debido a la inmensa variedad de materiales, métodos de fabricación y fabricantes presentes en el mundo, es prácticamente imposible diseñar un pavimento con un geotextil o una geomalla con características especiales. Todos los fabricantes tienen su propio método de diseño, el cual se acopla a las características de sus diferentes productos. Sería además poco práctico tratar de encontrar todos los tipos y marcas de geosintéticos que se acomoden al diseño de refuerzo en cada caso que se encuentre en el campo.

En la selección del geosintético adecuado hay una variedad de factores que se deben tomar en cuenta para escoger un material en especial. Se enumerarán los que se deban tomar en consideración y se sugerirán características con valores mínimos para cumplir con la función que se desee. De esto se puede tomar una idea, buscar con el fabricante que se desee y evaluar quién ofrece las características y costos más atractivos.

La instalación de los geosintéticos generalmente coincide con la mayoría de tipos y fabricantes. Las precauciones a tomar y los requerimientos mínimos son los mismos en la gran mayoría de los casos, y si se cumplen no habrá problema con el buen funcionamiento de la estabilización.

## **B. Métodos de Diseño**

Debido a la gran variedad de geosintéticos y sus innumerables aplicaciones, la selección de un método en particular para diseñar o una filosofía de diseño son aspectos críticos en el proceso de decisión. Existen varios métodos de diseño con geosintéticos, o una combinación de métodos. Sin embargo, la decisión para una aplicación en particular puede realizarse basada en tres posibilidades:

- Diseño que depende del costo y disponibilidad,
- Diseño para cumplir con las especificaciones,
- Diseño dependiendo de la función del geosintético.

### **1. Diseño basado en el costo y la disponibilidad:**

Este diseño es muy pobre desde el punto de vista técnico, y consiste en tomar la cantidad de dinero disponible para el geosintético, dividida por el área a cubrir. De esta forma se obtiene el precio unitario máximo disponible para comprar el material. El desarrollo de numerosas especificaciones ha reducido esta práctica.

## **2. Diseño por especificaciones:**

Este método es muy común y es frecuentemente utilizado en proyectos relacionados con entidades gubernamentales. Este método presenta varias categorías para el uso de los geosintéticos con propiedades críticas para cada una de ellas, basadas en las experiencias en el campo al usar estos productos. Sin embargo, este tipo de especificaciones sólo presenta propiedades mínimas para asegurar que el geosintético resistirá los daños durante la instalación y a través de la vida útil requerida.

El uso de este método de diseño debe ser visto con cautela debido a que las recomendaciones en estas especificaciones presentan propiedades mínimas de los geosintéticos; sin embargo, existe la posibilidad de que valores más altos que los establecidos como mínimos sean requeridos para cumplir con el diseño, además, no se consideran parámetros relacionados con la obra en particular.

## **3. Diseño por función:**

Este método consiste en la evaluación de la función principal del geosintético en la aplicación y luego usando los conocimientos básicos de mecánica de suelos e hidráulica, se calculan los valores numéricos requeridos. El proceso permite determinar el factor de seguridad a partir de los parámetros necesarios y existentes; si el factor de seguridad obtenido es mayor de 1, el geosintético evaluado es aceptable. Los diseños basados en este método están enfocados en la evaluación de la función primaria del geosintético en la aplicación y en la verificación de las funciones secundarias.

## **C. Diseño del Refuerzo**

Para el efecto de este estudio, los geosintéticos a escoger deberán cumplir la función de refuerzo para la base del camino a nivel de la subrasante. Por lo tanto, al tener conocimiento de la diversidad de materiales geosintéticos existentes, y de las funciones que desempeña cada uno, las únicas funciones que interesan son las de:

- Separación,
- Refuerzo.

Para lograr una o más de las funciones mencionadas, se requerirá el uso de:

- Geotextiles: tejidos o no tejidos
- Geomallas: biaxiales

Los geocompuestos son de utilidad si se van a cubrir dos o más funciones, y el diseño se hace al tomar en cuenta los dos elementos del geocompuesto por separado. En este caso sería únicamente el geocompuesto conformado por un geotextil y una geomalla.

# 1. Diseño con Geotextiles

Cada día los geotextiles están teniendo mejor aceptación para uso en el diseño de ingeniería. Esto ha llevado a la creación de muchas compañías productoras con muchas variedades de productos, cada uno con características propias. La metodología y guías de diseño que se presentan a continuación son una ayuda en la selección del geosintético adecuado para cumplir con los requisitos constructivos del contratista.

## a. Diseño como refuerzo

### i. Carga permitida en el suelo de subrasante

La magnitud de la carga que puede ser aplicada al suelo que conforma la subrasante sin causar fallas es el esfuerzo permitido (S):

El esfuerzo permitido en una subrasante sin geotextil es:

$$S = (2.8)C$$

El esfuerzo permitido en una subrasante con geotextil es:

$$S = (5.0)C$$

En donde C es la resistencia al corte del suelo en libras por pulgada cuadrada.

Carga de Neumático, Presión de Contacto y Área de Contacto: Estimar la carga por neumático (lb), la presión de contacto (psi) y el área de contacto (in<sup>2</sup>). Para propósitos de diseño del geotextil, los neumáticos sencillos y dobles son representados como cargas de neumático sencillo (L). La carga por neumático es la mitad de la carga por eje, en el caso de ejes sencillos, y la mitad más 20% en el caso de ejes dobles. Esta carga es aplicada por los neumáticos a una presión de contacto (P), que es igual a la presión de aire que contiene el neumático. En el caso de neumáticos dobles, la presión de contacto es 75% de la presión de aire de los mismos.

Área de contacto estimada en donde será aplicada la carga (B<sup>2</sup>):

$$B^2 = \frac{L}{P}$$

$$B = \sqrt{B^2} = \sqrt{\frac{L}{P}}$$

En donde B es el largo en pulgadas de un lado del área de contacto

## ii. Grosor del agregado de la base

Al asumir que las cargas de los neumáticos son aplicadas sobre un área cuadrada, utilizar la teoría de Boussinesq de distribución de cargas para determinar el grosor de la sección de agregado requerida para soportar la carga de diseño. Los coeficientes de la teoría de Boussinesq están en la siguiente tabla:

Si X =	Entonces M =
0.005	0.10
0.011	0.15
0.018	0.20
0.026	0.25
0.037	0.30
0.048	0.35
0.060	0.40
0.072	0.45
0.084	0.50
0.096	0.55
0.107	0.60
0.118	0.65
0.128	0.70
0.138	0.75
0.146	0.80
0.155	0.85
0.162	0.90
0.169	0.95
0.175	1.00
0.186	1.10
0.196	1.20
0.207	1.35
0.215	1.50
0.224	1.75
0.232	2.00
0.237	2.25
0.240	2.50
0.242	2.75
0.244	3.00
0.247	4.00
0.249	5.00
0.249	7.50
0.250	10.00
0.250	Infinito

Tabla 11 - Tabla de Coeficientes de Boussinesq

Primero, resolver para X:

$$\text{Sin geotextil: } X = \frac{S}{(4)^P}$$

$$\text{Con geotextil: } X_{\text{geotextil}} = \frac{S_{\text{geotextil}}}{(4)P}$$

Usando los valores calculados de  $X$  y  $X_{\text{geotextil}}$ , utilizar la tabla de coeficientes de Boussinesq para determinar los valores correspondientes de  $M$  y  $M_{\text{geotextil}}$ .

Resolver entonces para el grosor de agregado de base  $H$  y  $H_{\text{geotextil}}$ :

$$\text{Sin geotextil: } H = \frac{B}{(2)M}$$

$$\text{Con geotextil: } H_{\text{geotextil}} = \frac{B}{(2)M_{\text{geotextil}}}$$

La diferencia entre  $H$  y  $H_{\text{geotextil}}$  es el agregado ahorrado debido al uso de geotextil.

## b. Diseño como Separador

Como separador no tiene ningún diseño en especial. Únicamente se coloca el geotextil entre la subrasante y la base. La selección del geotextil dependerá únicamente de las condiciones de construcción y del tipo de suelo de subrasante que estará en contacto con él.

## 2. Diseño con Geomallas

El diseño para la utilización de geomallas consiste en la determinación del grosor requerido para la capa de base. El relleno debe ser lo suficientemente grueso para reducir la presión

de contacto de las llantas de los vehículos a un valor que pueda ser soportado por una subrasante débil.

### a. Parámetros de diseño:

- $C_u$ : Resistencia al esfuerzo de corte sin drenar el suelo de la subrasante (psi),
- $C_f$ : Resistencia al esfuerzo de corte del material de relleno (psi),
- $P$ : Carga dinámica de llanta (lb),
- $p$ : Presión de contacto (psi),
- $N$ : Factor de capacidad de carga (adimensional),
  - $N_u$ : 3.1 (Sin refuerzo),
  - $N_r$ : 6.2 (Reforzado con geomalla),
- $R$ : Radio de área de contacto (plg),
- $q_u, q_r$ : Capacidad soporte permitida por la subrasante (psi),
- $z_u, z_r$ : Relleno requerido para soportar las cargas (in),

### b. Diseño:

#### i. Paso 1:

Determinar la resistencia al esfuerzo de corte del suelo de la subrasante ( $c_u$ )

#### ii. Paso 2:

Calcular la capacidad de carga permitida por la subrasante ( $q_u$ : sin refuerzo y  $q_r$ : con refuerzo):

$$q_u = N_u c_u$$

$$q_r = N_r c_u$$

### iii. Paso 3:

Determinar la carga de diseño (P), la presión de llantas (p) y el área de contacto.

La carga de diseño para vehículos con llantas de hule es la carga que soporta cada llanta.

La presión de contacto es la misma presión a la que están infladas las llantas.

Para determinar el área de contacto se calcula el radio de área de contacto (R):

$$R = \left( \frac{P}{3.14 p} \right)^{0.5}$$

### iv. Paso 4:

Calcular el grosor de relleno requerido sin usar refuerzo ( $z_u$ ):

$$z_u = \frac{R}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \frac{q_u}{p} \right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}}$$

### v. Paso 5:

Calcular el grosor de relleno requerido al usar refuerzo ( $z_r$ ):

$$z_r = \frac{R}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{q_r}{p}\right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}}$$

#### vi. Paso 6:

El relleno a utilizar deberá tener un CBR no menor a la presión de contacto dividido entre 10. Si es un material ya disponible, se deberá calcular la capacidad de carga del relleno:

$$q_f = N_u c_f$$

#### vii. Paso 7:

Determinar el grosor de la capa superior de base. Repetir los pasos 1 a 4 sustituyendo la resistencia al esfuerzo de corte del suelo de la subrasante ( $c_u$ ) por la resistencia al esfuerzo de corte del suelo del relleno ( $c_f$ ).

#### viii. Paso 8:

Restar el grosor de la capa superior de base requerido, al determinar en el paso 7, del grosor total determinado en los pasos 4 y 5 para definir los grosores finales con y sin refuerzo. El grosor de la capa superior del pavimento es la misma en los dos casos a menos que se utilicen dos capas de geomallas, una en la interfase subrasante-relleno y la otra en la interfaz relleno-base para reducir el grosor de la capa superior.

#### ix. Paso 9:

Determinar las cargas máximas soportadas:

$$p_a = \frac{q}{\left[ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right]}$$

$$P_a = p_a * 3.14 * R^2$$

Calcular en las dos condiciones: reforzado y no reforzado.

### c. Ejemplo:

Se construirá sobre un suelo blando que tiene una resistencia al esfuerzo de corte de 4.0 psi. Para el relleno se colocará un material con CBR igual a 5 ( $c_r=20$ ) y para la base se utilizará un material con un CBR de 80. Se utilizará maquinaria con presión de llantas de 100 psi y una carga de 11,000 libras con doble llanta en los ejes.

#### i. Paso 1:

$$c_u = 4.0 \text{ psi}$$

#### ii. Paso 2:

$$q_u = N_u c_u = 3.1 * 4.0 = 12.4 \text{ psi}$$

$$q_r = N_r c_u = 6.2 * 4.0 = 24.8 \text{ psi}$$

**iii. Paso 3:**

$$P = 11,000 \text{ lb}$$

$$p = 100 \text{ psi}$$

$$R = \left( \frac{P}{3.14 p} \right)^{0.5} = \left( \frac{11,000}{3.14 * 100} \right)^{0.5} = 5.9 \text{ plg}$$

**iv. Paso 4:**

$$z_u = \frac{R}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \frac{q_u}{p} \right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = \frac{5.9}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \frac{12.4}{100} \right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = 19.4 \text{ plg}$$

**v. Paso 5:**

$$z_r = \frac{R}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \frac{q_r}{p} \right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = \frac{5.9}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left( 1 - \frac{24.8}{100} \right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = 12.9 \text{ plg}$$

**vi. Paso 6:**

El relleno a utilizar debería tener un CBR igual a 10, sin embargo, el material disponible tiene un CBR igual a 5 ( $c_f=20$ ), por lo tanto habrá que calcular la máxima presión de contacto permitida.

$$q_f = N_u c_f = 3.1 * 20 = 62 \text{ psi}$$

Ya que la presión de contacto permitida es menor a la que se pretendía usar, se necesitará maquinaria de baja presión de contacto para que el suelo del relleno pueda soportarla. Sin embargo la mejor opción sería conseguir otro material de relleno.

### vii. Paso 7:

$$c_f = 20 \text{ psi}$$

$$q_f = N_u c_f = 3.1 * 20 = 62 \text{ psi}$$

$$P = 11,000 \text{ lb}$$

$$p = 100 \text{ psi}$$

$$R = \left( \frac{P}{3.14 p} \right)^{0.5} = \left( \frac{11,000}{3.14 * 100} \right)^{0.5} = 5.9 \text{ plg}$$

$$z_f = \frac{R}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{q_f}{p}\right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = \frac{5.9}{\left[ \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{62}{100}\right)^{0.67}} \right\} - 1 \right]^{0.5}} = 6.2 \text{ plg}$$

### viii. Paso 8:

Espesor sin reforzar:  $19.4 - 6.2 = 13.2 \text{ plg}$

Espesor con refuerzo:  $12.9 - 6.2 = 6.70$  plg

### ix. Paso 9:

Cargas máximas soportadas sin refuerzo:

$$P_a = \frac{q}{\left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}} = \frac{12.4}{\left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{5.9}{13.2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}} = 51.8 \text{ psi}$$

$$P_a = 51.8 * 3.14 * 5.9^2 = 5,660 \text{ lb}$$

Cargas máximas soportadas con refuerzo:

$$P_a = \frac{q}{\left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{R}{z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}} = \frac{24.8}{\left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{5.9}{6.7} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}} = 43.0 \text{ psi}$$

$$P_a = 43.0 * 3.14 * 5.9^2 = 4,700 \text{ lb}$$

Utilizar maquinaria con poca presión de contacto para la colocación del relleno hasta que la segunda capa de agregado sea colocada.

## **D. Selección del Geosintético Adecuado**

### **1. Selección de un Geotextil**

Hasta este punto del proceso, el diseño se ha concentrado en propiedades generales del diseño de pavimentos en presencia o ausencia de un geotextil. Ahora es necesario decidir qué tipo de geotextil hay que escoger.

Debido a la gran variedad de fabricantes de geotextiles, es muy difícil escoger con precisión el material adecuado, sin embargo se mostrarán los criterios más importantes a tomar en cuenta dependiendo de la aplicación que se le va a dar y del equipo que se vaya a utilizar en la construcción de la obra. Además algunos parámetros que tiene que cumplir para adecuarse a las necesidades y condiciones del proyecto.

Además, es necesario saber qué tan alta deberá ser la supervivencia para el material:

Propiedades	Métodos de Ensayo ASTM	Unidad	Clase de Geotextil <sup>(1)</sup>					
			Clase 1		Clase 2		Clase 3	
			Alargamiento		Alargamiento		Alargamiento	
			< 50% (2)	> 50% (2)	< 50% (2)	> 50% (2)	< 50% (2)	> 50% (2)
Resistencia a la tracción	D 4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Resistencia de la costura <sup>(3)</sup>	D 4632	N	1260	810	990	630	720	450
Resistencia al desgarre o corte trapezoidal	D 4533	N	500	350	400 <sup>(4)</sup>	250	300	180
Resistencia a la perforación	D 4833	N	500	350	400	250	300	180
Resistencia al reventado	D 3786	KPa	3500	1700	2700	1300	2100	950
Permisividad	D 4491	s <sup>-1</sup>	Las propiedades mínimas requeridas están basadas en el tipo de aplicación del geotextil					
Abertura aparente de los poros	D 4751	Mm						
Estabilidad a los rayos UV	D 4355	%						

**Tabla 12 - Requerimientos Físicos para Geotextil en Función de su Supervivencia Durante la Instalación**

**Notas:**

- **(1)** La clase de geotextil requerida está designada en la correspondiente tabla para la aplicación indicada. La severidad de las condiciones de instalación para cada aplicación generalmente dicta la clase de geotextil requerida. La Clase 1 está especificada para las más severas o rudas condiciones de instalación, donde hay un gran potencial de daño del geotextil, las Clases 2 y 3 se especifican para condiciones de severidad decrecientes.
- **(2)** El primero de los valores de esta columna aplica al geotextil que se rompe a <50% de alargamiento (ASTM D 4632). El segundo de los valores en esta columna aplica al geotextil que se rompe a >50% de alargamiento (ASTM D 4632)
- **(3)** Aplica cuando se requiere uniones cosidas. En cada aplicación del geotextil se indican los requerimientos de traslape y costura.
- **(4)** El valor promedio mínimo del rollo a la resistencia al desgarre para geotextil tejido tipo monofilamentos es de 245 N.

Es necesario conocer los requerimientos de un geotextil si éste va a cumplir una función de separación:

Propiedades	Método de Ensayo ASTM	Unidad	Especificaciones <sup>(1) (2)</sup>		
			Clase 1	Clase 2	Clase 3
Resistencia a la tracción	D 4632	N	1400 / 900	1100 / 700	800 / 500
Resistencia de la costura	D 4632	N	1260 / 810	990 / 630	720 / 450
Resistencia al desgarre	D 4533	N	500 / 350	400 <sup>(3)</sup> / 250	300 / 180
Resistencia a la perforación	D 4833	N	500 / 350	400 / 250	300 / 180
Resistencia al reventado	D 3786	kPa	3500 / 1700	2700 / 1300	2100 / 950
Permisividad	D 4491	s <sup>-1</sup>	0.02 <sup>(4)</sup>	0.02 <sup>(4)</sup>	0.02 <sup>(4)</sup>
Abertura aparente de poros	D 4751	mm	0.60 <sup>(5)</sup>	0.60 <sup>(5)</sup>	0.60 <sup>(5)</sup>
Estabilidad a los rayos UV	D 4355	%	50 % después de 500 horas de exposición		

Tabla 13 - Requerimientos Físicos para Geotextil en Función de Separación

**Notas:**

- **(1)** El geotextil Clase 2 es la selección por omisión. El contratista podrá especificar geotextil Clase 3 basado en una o más de las indicaciones siguientes:
  - a.- El contratista considera que el geotextil Clase 3 tiene la suficiente supervivencia basado en su experiencia de campo.
  - b.- El contratista considera que el geotextil Clase 3 tiene la suficiente supervivencia basado en ensayos de laboratorio e inspecciones visuales de muestras de geotextil tomadas desde una sección del campo construida previamente bajo las condiciones de campo.
  - c.- El espesor de la primera capa de agregado que cubre el geotextil excede 300 mm y el diámetro del agregado es menor a 50 mm.
  - d.- El espesor de la primera capa que cubre el geotextil excede 150 mm, el diámetro del agregado es menor a 30 mm y la presión de contacto del equipo de construcción es menor a 550 kPa.
- **(2)** El primero de los valores en esta columna aplica al geotextil que rompe a <50% de alargamiento. El segundo de los valores en esta columna aplica al geotextil que rompe a >50% de alargamiento.
- **(3)** El mínimo valor promedio del rollo a la resistencia a desgarre para geotextil tejido tipo monofilamento es de 245 N.
- **(4)** Valores indicados por omisión. La permisividad del geotextil debe ser mayor que la del suelo ( $\psi_g > \psi_s$ ). El contratista podrá requerir además que la permeabilidad del geotextil sea mayor a la del suelo ( $\kappa_g > \kappa_s$ ).

- (5) Valor promedio máximo del rollo.

Y por último los requerimientos para cumplir la función de estabilización:

Propiedades	Método de Ensayo ASTM	Unidad	Especificaciones <sup>(1) (2)</sup>	
			Clase 1	Clase 2
Resistencia a la tracción	D 4632	N	1400 / 900	1100 / 700
Resistencia de la costura	D 4632	N	1260 / 810	990 / 630
Resistencia al desgarre	D 4533	N	500 / 350	400 <sup>(3)</sup> / 250
Resistencia a la perforación	D 4833	N	500 / 350	400 / 250
Resistencia al reventado	D 3786	kPa	3500 / 1700	2700 / 1300
Permisividad	D 4491	s <sup>-1</sup>	0.05 <sup>(4)</sup>	0.05 <sup>(4)</sup>
Abertura aparente de poros	D 4751	mm	0.43	0.43
Estabilidad a los rayos UV	D 4355	%	50 % después de 500 horas de exposición	

Tabla 14 - Requerimientos Físicos para Geotextil en Función de Estabilización

#### Notas:

- (1) El geotextil Clase 1 es la selección por omisión. El contratista podrá especificar geotextil Clase 2 o 3 basado en una o más de las indicaciones siguientes:
  - a.- El contratista considera que el geotextil Clase 2 o 3 tiene la suficiente supervivencia basado en su experiencia de campo.
  - b.- El contratista considera que el geotextil Clase 2 o 3 tiene la suficiente supervivencia basado en ensayos de laboratorio e inspecciones visuales de muestras de geotextil tomadas desde una sección del campo construida previamente bajo las condiciones de campo.
- (2) El primero de los valores en esta columna aplica al geotextil que rompe a <50% de alargamiento. El segundo de los valores en esta columna aplica al geotextil que rompe a >50% de alargamiento.
- (3) El mínimo valor promedio del rollo a la resistencia a desgarre para geotextil tejido tipo monofilamento es de 245 N.
- (4) Valores indicados por omisión. La permisividad del geotextil debe ser mayor que la del suelo ( $\psi_g > \psi_s$ ). El contratista podrá requerir además que la permeabilidad del geotextil sea mayor a la del suelo ( $\kappa_g > \kappa_s$ ).
- (4) El mínimo valor promedio del rollo a la resistencia a desgarre para geotextil tejido tipo monofilamento es de 245 N.

En vista de las características y limitaciones que presentan los geotextiles, es conveniente que se evalúen ciertas condiciones que se presentan en la construcción de obras y que muchas veces no son tomadas en cuenta. A partir de ocho preguntas se hará una evaluación cualitativa para recomendar la tasa de supervivencia de un geotextil. Cada respuesta tiene un punteo. Las características recomendadas que debería tener el geotextil son propuestas al depender de la suma de los puntos acumulados en las diferentes preguntas.

1. ¿Cuál será la presión máxima de contacto prevista o presión de llanta aplicada al agregado de base durante la construcción?

		<u>Pts.</u>
A.	0 – 4 psi      Case 950 LPG Dozer	0
B.	4 – 8 psi      Cat D4H Dozer	10
C.	8 – 35 psi      Cargador de llanta	20
D.	35 – 100 psi      Camión de construcción	30
E.	Más de 100 psi      Camión de carretera	40

2. ¿Cuál es el grosor mínimo de la capa de base o subbase (en pulgadas) a ser colocado sobre el geotextil?

$$\text{Puntos} = (-2) * \text{Grosor del agregado} + 48$$

3. ¿Cual es el diámetro máximo de agregado (en pulgadas) a ser colocado directamente sobre el geotextil:?

$$\text{Puntos} = (2) * \text{Diámetro del agregado} + 1$$

Si el diámetro del agregado es mayor a la mitad del grosor de la capa de base:  
agregar 3 puntos.

Si el diámetro del agregado es mayor a tres cuartas partes el grosor de la capa de base colocada sobre el geotextil: agregar otros 3 puntos.

4. ¿Cuál es la angularidad de las partículas del agregado colocado directamente sobre el geotextil?

	<u>Pts.</u>
A. Muy redondas	0
B. Redondas	7
C. Subredondas	15
D. Subangulosas	23
E. Angulosas	30

5. ¿Cuál es la condición del terreno del suelo por debajo del geotextil?

	<u>Pts.</u>
A. Suelo de grano fino con superficie lisa	0
B. Suelo de grano fino con depresiones leves que no exceden 6 pulgadas de profundidad	10
C. Superficie de terreno natural con depresiones que	

no exceden 12 pulgadas de profundidad	20
D. Superficie de terreno natural con algunas piedras y algo de contaminación	30
E. Superficie de terreno natural con depresiones Significantes y contaminación	40

6. ¿Cuál es la resistencia al esfuerzo de corte de la subrasante?

	<u>CBR</u>	<u>Mód. de reacción</u>	<u>Pts.</u>
A. < 500 psf	<1	< 30 psi/plg	20
B. 500 – 1000 psf	1 – 2	30 – 60 psi/plg	15
C. 1000 – 1800 psf	2 – 3	60 – 100 psi/plg	10
D. 1800 – 3000 psf	3 – 5	100 – 150 psi/plg	5
E. > 3000 psf	> 5	> 150 psi/plg	0

7. ¿Qué nivel de supervisión tendrá la obra durante la instalación del geotextil y las capas de material?

	<u>Pts.</u>
A. Supervisión cercana	0
B. Supervisión regular	2
C. Supervisión moderada	4
D. Poca supervisión	6
E. Ninguna supervisión	10

8. ¿Qué tanto tiempo circulará el tráfico en el camino previo a la finalización del pavimento?

	<u>Pts.</u>
A. Sólo para la colocación del pavimento	0
B. 3 días	2
C. 2 semanas	4
D. 2 meses	6
E. Más de 2 meses	10

De las respuestas dadas se evaluará el nivel de supervivencia del geotextil según el puntaje obtenido:

Punteo	Nivel de supervivencia
Menos de 91	Moderado
91 – 108	Alto
108 – 119	Muy Alto
119 – 180	Máximo
Más de 180	N / D

## 2. Selección de una Geomalla

La selección de una geomalla depende del fabricante que la produjo. Sin embargo aquí se presentan valores mínimos de ciertas características que deberían tener estos geosintéticos para que su desempeño sea apropiado:

Propiedad	Prueba	Unidad	CBR > 1	CBR < 1 ó cargas pesadas
<b>Entrelazamiento</b>				
Apertura Mínima	I.D Caliper			
<i>MD</i>		Plg	1.00	1.00
<i>CMD</i>		Plg	1.30	1.30
Área Abierta	Método COE	%	70.00	70.00
Grosor Mínimo	ASTM D1777			
<i>Elementos</i>		Plg	0.03	0.05
<i>Juntas</i>		Plg	0.11	0.16
<b>Refuerzo</b>				
Rigidez a Torsión	Cuerpo de Ingenieros	cm.kg.deg	1.60	4.00
Rigidez a Flexión	ASTM D1388	mg.cm	225,000.00	750,000.00
Módulo de Tensión	GRI GG1	lb/pie	14,000.00	18,500.00
Juntas				
<i>Resistencia</i>	GRI GG2	lb/pie	710.00	1,080.00
<i>Eficiencia</i>	GRI GG2	%	90.00	90.00
<b>Material</b>				
Polipropileno o Polietileno de Alta Densidad	ASTM D4101 Grupo 1, Clase 1, Grado 2	%	97.00	98.00
Carbon Black	ASTM 4218	%	0.50	0.50

Tabla 15 - Requerimientos para una Geomalla aplicada como Refuerzo

**Notas:**

- MD: Dirección Principal (Machine Direction)
- CMD: Dirección Transversal (Cross Machine Direction)

## E. Instalación de los Geosintéticos

La instalación de geosintéticos para estabilizar un suelo blando deberá hacerse sobre la subrasante de suelo existente, debajo de la capa de base o sub-base. El procedimiento y consideraciones a tomar en cuenta para su instalación se enumeran a continuación:

# 1. Preparación del lugar

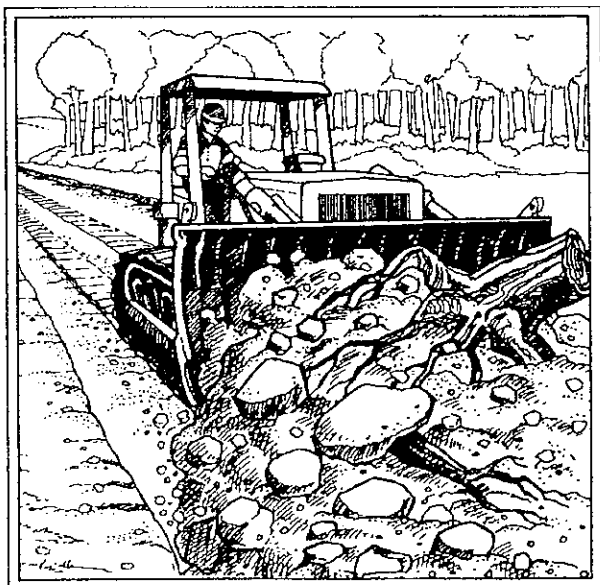


Figura 1 – Preparación del Lugar

Limpiar el suelo de desechos como rocas, troncos, raíces o materiales que pudieran perforar el geosintético (Figura 1). En ocasiones se han recortado los árboles y las raíces a ras del suelo pero es más recomendable eliminarlos por completo y dejarlos a por lo menos 3 pulgadas de la superficie para evitar punzonamiento y ruptura. Dejar la subrasante al nivel requerido y nivelarla apropiadamente para que pueda proveer un drenaje adecuado. Si el CBR es menor a 1 se recomienda realizar una compactación ligera, siempre que las condiciones de humedad del suelo lo permitan.

## 2. Colocación y traslapes

Desenrollar el geosintético en el lugar, manteniendo el traslape adecuado (Figuras 2 y 3). Puede ser desplegado a mano o con maquinaria, sin embargo debe evitarse que esta última pase encima del geosintético. Evitar que se formen arrugas. Los rollos colocados uno al lado del otro o uno detrás del otro deben ser traslapados como lo recomienda la tabla.

Esta aconseja la longitud de traslape mínimo basado en la resistencia al corte del suelo. El traslape debe hacerse en la misma dirección en la que se va a esparcir el suelo para evitar que la junta se levante (Figura 3). Dependiendo de las condiciones del suelo el traslape puede necesitar pegamento o costura. Los geosintéticos deberán ser estirados y fijados con grapas, ganchos, rocas o promontorios del material de relleno (Figura 4). Se deberá inspeccionar cuidadosamente para detectar cualquier irregularidad.

Localización del Traslape	Resistencia del Terreno (CBR)	Traslape Mínimo (mm)
Traslape de rollos de geosintético adyacente	CBR > 3	300 – 450
	1 < CBR < 3	600 – 1000
	0.5 < CBR < 1	1000 – Costura
	CBR < 0.5	Costura
Traslape de terminaciones de geosintético	CBR > 0.5	1000
	CBR < 0.5	Costura

Tabla 16 - Requerimientos Mínimos Recomendados para Traslape

### Notas:

- (1) De acuerdo a la norma AASHTO M 288-96.
- (2) Los requerimientos de traslape no son aplicables a las uniones por costura.
- (3) Traslapes no son recomendados para terrenos con un CBR menor o igual a 0.5.
- (4) Uniones por costura para rollos de geotextil adyacente son recomendables para terrenos con un CBR mayor a 0.5 pero menor o igual a 1.
- (5) Uniones por costura son aceptables para todos los CBR del terreno.

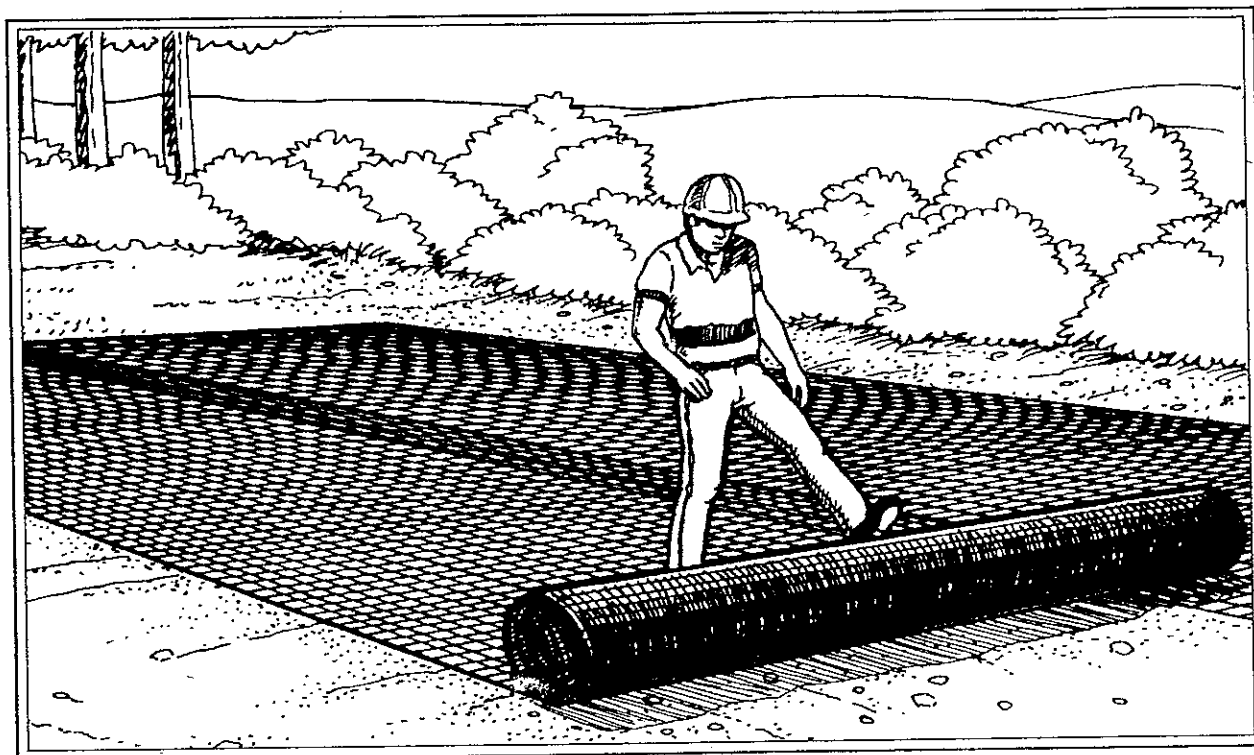


Figura 2 – Colocación de los Geosintéticos

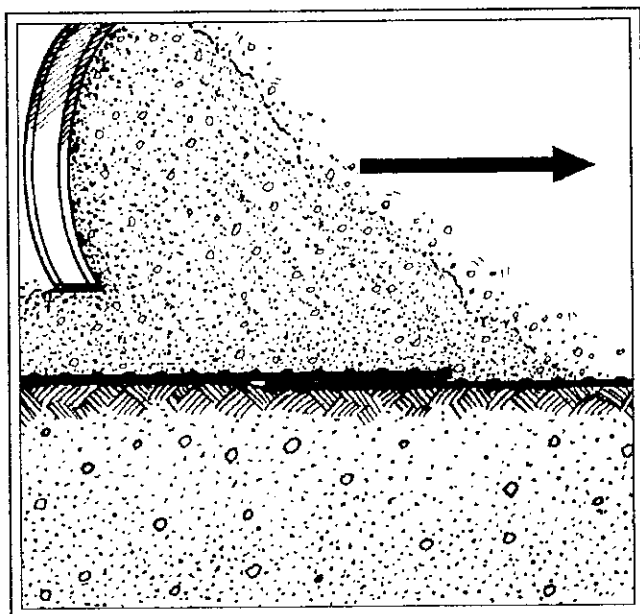


Figura 3 – Traslapes y Esparcimiento del Relleno

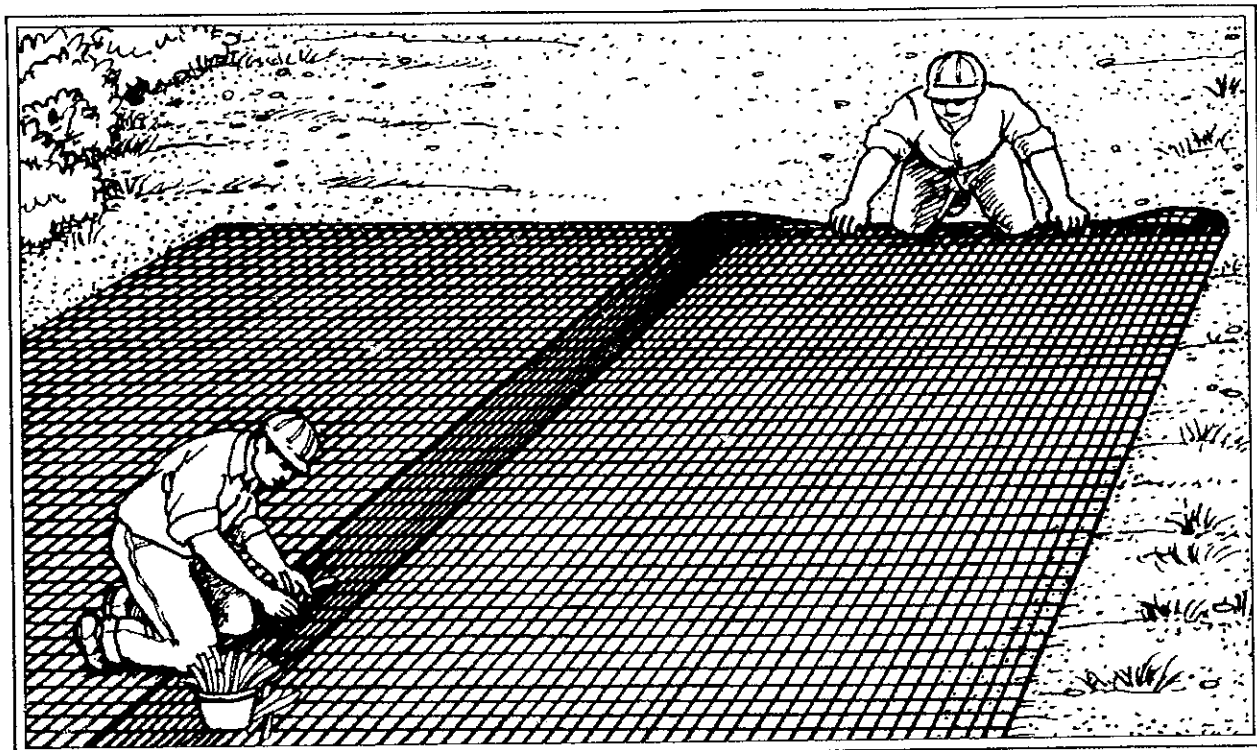


Figura 4 – Estiramiento y Fijación de Geosintéticos

### 3. Colocación y esparcimiento del relleno

El vaciado de material sobre suelos blandos no debe realizarse directamente encima del geosintético (Figura 5). Si se va a colocar material angular como base, es recomendable colocar de 0.15 m a 0.20 m de un material más fino sobre el geosintético. Debe colocarse a un costado del mismo o sobre capas ya compactadas, y esparcirse con maquinaria con ruedas de hule a velocidades muy bajas (5 km/h) para evitar paradas súbitas y cruces. Los vehículos de oruga no deben transitar por encima del geosintético, a menos que haya como mínimo 0.15 m de relleno por encima del mismo.

Cuando el suelo sea muy blando, hay que tomar ciertas consideraciones adicionales:

- Asegurarse que el suelo en donde se va a vaciar el material de relleno puede soportarlo.
- El grosor de las capas de relleno dependerá de la capacidad soporte del suelo. Se requerirá de maquinaria muy liviana y un mínimo de 0.30 m por capa de relleno a ser compactada.

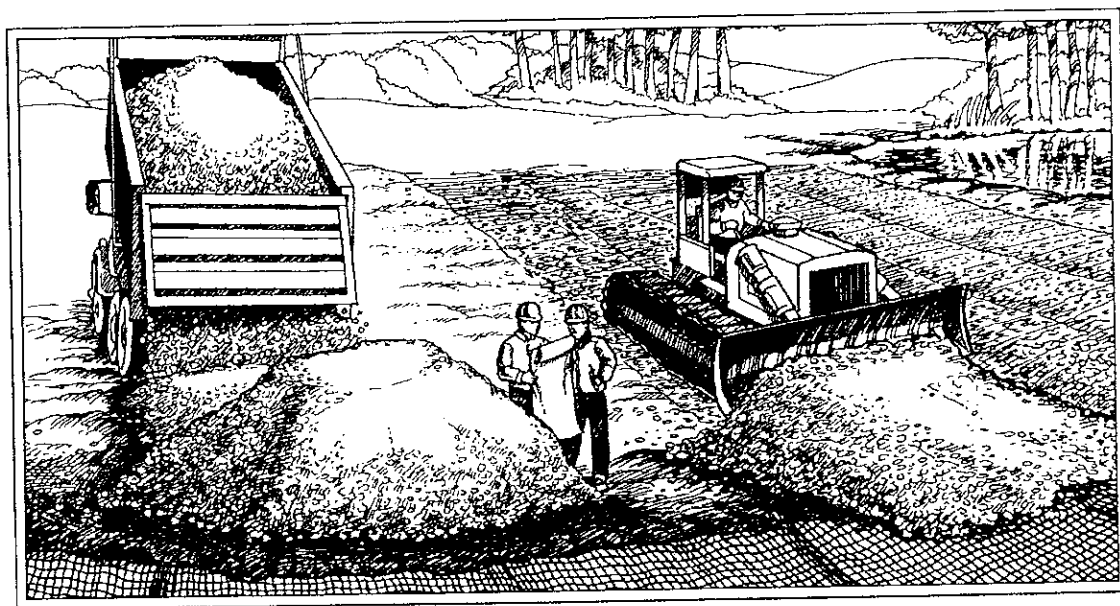


Figura 5 – Colocación del Relleno sobre Suelo Blando

## 4. Compactación

Compactar el suelo hasta alcanzar la densidad requerida. Utilizar únicamente equipo liviano para la primera capa de relleno cuando el material de la subrasante sea muy blando. Si es requerido, envolver las capas con las orillas del geosintético para mejorar las cualidades (Figura 6).

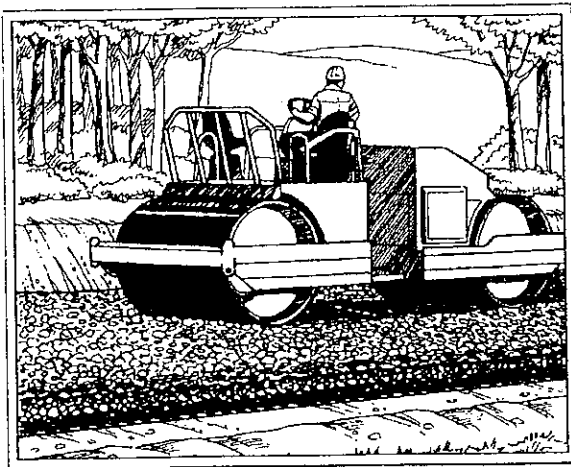


Figura 6 - Compactación

## 5. Consideraciones especiales

- Si el geosintético se daña durante la realización del trabajo, hay que retirar el material de relleno hasta dejar el área a reparar totalmente descubierta. Colocar después un parche de geosintético que tenga por lo menos 1.00 m de traslape en todas las direcciones.

- Los rellenos que presenten problemas de compactación debido a la graduación o al contenido de humedad no deberán ser utilizados.
- Si se llegaran a formar carrileras o lodo durante la instalación debido al tránsito de maquinaria, se deberá agregar más material para fortalecer la sección. Las carrileras siempre deberán ser rellenadas con suelo de relleno sin estabilizar.
- Si se van a colocar varias capas de geosintético, repetir los pasos anteriores.

## VII. Resultados

Del estudio de las principales características de los suelos, se puede determinar cuáles son las características más importantes de los suelos blandos. La granulometría es un factor determinante en la calidad del suelo. Los suelos de grano grueso generalmente son considerados de buena calidad como subrasante. Sin embargo los suelos de grano fino son los que presentan problema. La baja permeabilidad, la plasticidad, la relación de vacíos y la composición mineralógica de estos suelos son factores que influenciarán de manera importante el comportamiento del suelo en presencia de cargas o humedad. Por lo tanto, son suelos muy sensibles a los cambios de humedad, o muy pobres en resistencia. En cualquiera de los dos casos es necesario realizar una correcta estabilización para que la estructura de pavimento cumpla su función: soportar las cargas de los vehículos que transitarán en ella.

Los geosintéticos ofrecen un método muy efectivo y económico para proveer un sistema estructural sobre materiales blandos y es por eso que se están desarrollando rápidamente en este campo. Los geosintéticos son utilizados como separadores, como elementos de refuerzo o ambos. Cuando se está haciendo una plataforma de construcción sobre suelos blandos, permiten realizar una estabilización sin cambiar la estructura química o granulométrica del suelo. Si los materiales granulares son simplemente colocados sobre materiales de grano fino, estos serán extruidos entre el material de grano grueso del material granular. Esto resulta en una reducción de la permeabilidad y resistencia del material granular, y sus características deseadas serán seriamente degradadas. Si un geosintético apropiadamente seleccionado es colocado entre el material fino y el material granular, entonces esta migración se puede prevenir, y las características del suelo granular se mantienen. Si el material fino es además blando, entonces el geosintético proveerá también

un soporte significativo a los materiales colocados encima de éste. Esto extiende la vida útil de un pavimento.

Además proveen de un refuerzo estructural a la estructura del camino. Generalmente, el soporte se desarrolla debido a la tensión en el geosintético debido a la deflexión vertical en las capas superiores de material. Consecuentemente, esta acción de refuerzo se desarrollará únicamente en suelos que se deflecten lo suficiente como para movilizar la resistencia a la tensión del geosintético. Si el CBR del suelo es muy pequeño, esta capacidad de refuerzo a la tensión del geosintético es muy pronunciada, pero en materiales con mayor resistencia, éste servirá más como separador, que como refuerzo estructural.

La resistencia al esfuerzo de tensión en estos materiales compensará la poca resistencia al corte que posee el suelo. La masa de suelo "encerrada" dentro del geosintético no tendrá cambios en su estructura química o física, además de que estos materiales están constituidos por elementos inertes. Esto quiere decir que no reaccionarán ante muchos de los elementos que componen el suelo, lo que hará más predecible y más seguro el comportamiento. Lo que se logra con el aporte de resistencia es disminuir el grosor de las capas superiores del pavimento. Está comprobado que no importando el método de diseño de pavimentos, mientras menor sea la resistencia del suelo, mayor será el espesor del pavimento. El método de instalación es muy sencillo, sin embargo, se tienen que tomar ciertas precauciones para preservar la integridad física del geosintético, ya que de ello depende toda la estabilización. Como en cualquier caso de estabilización, hay que hacer análisis de calidad del suelo para determinar ciertas características que incidirán en el uso de estos materiales. La resistencia es el factor principal. De esto depende el producto que se va a utilizar, sin embargo, como existen muchos fabricantes de geotextiles y geomallas,

cada uno tiene productos con características y materiales diferentes que incidirán en el diseño final. Pero la resistencia del suelo no es el único factor, es cierto que esto determina el tipo de material a utilizar para que toda la estructura soporte después las cargas de diseño, pero como se mencionó anteriormente, de la integridad física de la tela depende todo. Por lo tanto, el tipo de maquinaria, el nivel de supervisión, el estado físico del suelo y otros factores mencionados anteriormente determinarán otras características que se deben tomar en cuenta.

## **A. Evaluación del método de estabilización**

La evaluación de la estabilización de suelo con geosintéticos se hará por medio de una comparación con los demás métodos. A continuación se exponen las ventajas y desventajas de cada uno:

Ventajas de la estabilización mecánica:

- El suelo producido puede tener las características que uno quiera.

Desventajas de la estabilización mecánica:

- Puede ser excesivamente caro traer los suelos a la obra.
- Pueden haber limitaciones en cuanto a las profundidades de excavación.
- Se requiere de maquinaria pesada y puede que el suelo no la soporte.
- Se requiere de mucho tiempo y mano de obra.
- Hay que remover suelo y las distancias al botadero pueden ser largas.

#### Ventajas de la estabilización con cal:

- Reduce la plasticidad del suelo limitando los cambios de volumen causados por las variaciones en el contenido de humedad.
- Incrementa la resistencia del suelo.
- Reduce la proporción de granos finos por adherencia de las partículas de arcilla.

#### Desventajas de la estabilización con cal:

- Los cambios de temperatura afectan la resistencia del suelo, y el mal clima afecta el proceso de mezcla.
- La filtración de agua puede reducir la proporción de cal y reducir así la resistencia del suelo.
- Requiere un tiempo de curación y podría necesitar aditivos para lograr que esta se lleve a cabo satisfactoriamente.
- Puede reaccionar con algunos elementos del suelo y causar efectos impredecibles y que no se pueden detener.
- Si hay que estabilizar grandes cantidades de material se puede llegar a necesitar maquinaria especializada y puede que el suelo del lugar no las soporte.
- La materia orgánica aumenta las proporciones de cal.
- Si no hay minerales de arcilla, la cal no reacciona con el suelo.
- El manipuleo produce mucho polvo.
- Es difícil mantener el porcentaje de diseño en el campo.
- Se necesita de una supervisión constante.
- El tiempo de mezcla, la maquinaria, la supervisión y los imprevistos aumentan el costo de la estabilización.

#### Ventajas de la estabilización con cemento:

- No necesita una contribución química del suelo.
- El suelo gana más resistencia que con la cal.
- El suelo se vuelve menos permeable.
- Limita los cambios de volumen en el suelo.

#### Desventajas de la estabilización con cemento:

- Tiene los mismos problemas que la cal con los sulfatos, la materia orgánica y el porcentaje de diseño.
- Necesita de un tiempo de curado y tal vez de aditivos para el mismo.
- Los suelos de grano fino ganan menos resistencia que los granulares.
- Se pueden producir grietas por contracción.
- Se puede requerir maquinaria especializada para la mezcla de materiales.
- Es necesario mezclar y colocar rápidamente la mezcla por los tiempos de curado del cemento.
- El mal clima afecta el proceso.
- El tiempo de mezcla, la maquinaria, la supervisión y los imprevistos aumentan el costo de la estabilización.

#### Ventajas de la estabilización con asfalto:

- Provee una acción ligante que produce cohesión en el suelo.
- Vuelve más impermeable el suelo, lo que reduce el riesgo de saturación.

#### Desventajas de la estabilización con asfalto:

- Funciona bien sólo con suelos granulares.

- El suelo gana poca resistencia.
- Los suelos que se utilizan tienen limitaciones de plasticidad.
- Las altas temperaturas reducen la resistencia del suelo.
- Los vapores que emanan los solventes cuando se evaporan son perjudiciales para el ambiente.
- Puede ser necesario el uso de maquinaria especializada.
- Las filtraciones de agua pueden reducir la adherencia entre el suelo y el asfalto.
- La mezcla producida puede volverse poco maniobrable.
- El tiempo de mezcla, la maquinaria, la supervisión y los imprevistos aumentan el costo de la estabilización.

## **1. Ventajas de la estabilización con geosintéticos**

- Se evita el uso de maquinaria pesada para la instalación, ya que puede ser instalado por trabajadores (sólo consiste en desenrollar).
- Los geosintéticos se pueden utilizar con cualquier tipo de suelo.
- Las dos anotaciones anteriores implican menos tiempo, menos mano de obra y por lo tanto menor costo.
- Los geosintéticos no reaccionan químicamente con el suelo ya que están hechos de materiales inertes, que además no son biodegradables. Esto hace que se conserven intactos por mucho tiempo sin perder sus cualidades, además no afectan el medio ambiente y son reciclables.

- El diseño con geosintéticos es sencillo y preciso ya que la calidad del material es controlada en una fábrica, no hay que mezclar nada y el suelo a utilizar es el del lugar.
- El paso del agua no afecta las características del agente estabilizador ya que tanto los geotextiles como las geomallas permiten el paso del agua.
- Se disminuye el grosor del pavimento, lo que lleva a utilizar menos material, reduce el costo y acelera los trabajos. El refuerzo que proveen distribuye las cargas en un área más grande de suelo, disipando las mismas. Esto requeriría que en condiciones sin refuerzo, se utilizaran espesores más grandes en las capas del pavimento.
- El pavimento tiene una mayor vida útil al evitar que se mezclen los suelos de la subrasante y la base o sub-base. Esto controla la migración de los finos de un suelo de subrasante hacia el suelo que conforma la base (generalmente granular) y afectan el ángulo de fricción de este último produciendo una pérdida de resistencia en la estructura del camino. También evita que por las cargas a las que está sometida la estructura, el suelo granular de la base se incruste en el suelo débil de la subrasante. En cualquiera de los dos casos se reducen los espesores efectivos de las capas.
- Permite que el agua que drena de la capa de base pase por el geosintético y salga de la estructura.
- La instalación es fácil y rápida. No requiere de mano de obra especializada.
- Las capas superiores se pueden construir inmediatamente ya que no se necesita ningún curado de la subrasante. Esto agiliza la construcción y por lo tanto reduce costos.
- Los cambios de temperatura no afectan el material y por lo tanto la estabilización.
- El costo-beneficio de la estabilización con geosintéticos se presenta cuando se suman todos los factores anteriores. Aunque tiene un costo inicial relativamente alto, el ahorro en tiempo de ejecución, mano de obra, maquinaria y equipo, calidad y vida útil

de la obra hacen que al finalizar los trabajos se haya logrado una reducción en los costos.

## **2. Desventajas de la estabilización con geosintéticos**

- No siempre se dispone de geosintéticos cerca del área donde se va a trabajar.
- Los rayos ultravioleta, la acidez y los álcalis pueden llegar a degradar ciertos geosintéticos si no están protegidos contra estos agentes.
- Permiten el paso del agua, lo que puede afectar el suelo subyacente.
- Hay que tener muy en cuenta las características de la maquinaria a utilizar para que no dañe el material.
- Puede requerir el diseño de un filtro o drenaje especial para proteger la estructura.

## **VIII. Conclusiones y Recomendaciones**

El método de estabilización de suelos por medio de geosintéticos no es nuevo. Ya en Estados Unidos y Europa ha probado ser de gran eficacia, tanto técnica como económicamente desde finales de la década de los años 60. En Guatemala está teniendo una moderada aceptación, y según los buenos resultados obtenidos en los casos en los que ha sido utilizado, va a tener mucho más éxito en los años que viene.

Todos los sistemas de estabilización tienen sus ventajas, y la mayoría han sido probados en infinidad de situaciones. Resultado de esto es que hay disponible tanta información al respecto, sin embargo, los avances que la ciencia de los materiales ha tenido en las aplicaciones de la Ingeniería Civil y la Geotecnia, nos enseñan que hay nuevos productos que se basan en los resultados obtenidos por los anteriores.

Prueba de esto es que muchas de las desventajas que tienen otros agentes estabilizadores se han ido dejando en el pasado, dando lugar a nuevos productos que son fortalecidos con las ventajas de estos.

Los geosintéticos han probado ser una muy buena alternativa en el refuerzo estructural de caminos: los resultados son buenos, tienen pocas desventajas, y un factor muy importante en todo proyecto es que la instalación es rápida y de bajo costo.

A razón de que estos materiales tienen mucho éxito en otros países, han surgido muchos fabricantes y proveedores. Siempre es bueno avocarse con compañías serias y que

puedan brindar respaldo al producto que promocionan. La gran variedad de productos en el mercado, con diversidad de características, dificulta el hecho de seleccionar un geotextil o una geomalla diseñada con resultados ajenos a las normas del fabricante. Por eso es que cada uno tiene sus métodos de selección y un modelo para cada aplicación.

Sin embargo, el diseño de pavimentos se ve muy beneficiado con el uso de los materiales geosintéticos, y los métodos para hacerlo están disponibles.

## IX. Bibliografía

Carter m., Bentley S.P. (1991) **Correlations of Soil Properties**. Londres: Pentech Press Limited.

Department of the Army (1994) **Field Manual N° 5-430-00-1: Planning And Design of Roads, Airfields and Heliports in the Theater of Operations – Roads Design**. Washington: Department of the Air Force

Dirección General de Caminos. (1975). **Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes**. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción.

<http://geo.rmc.ca/igs/index.html>

<http://geotech.civen.okstate.edu/sssVL/Sheil3.htm>

Hunt R.E. (1986) **Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation**. Nueva York: Editorial McGraw-Hill.

Ingold T.S. y Miller K.S. (1988). **Geotextiles Handbook**. Londres: Editorial Thomas Telford.

Merritt F.S. (1992). **Manual del Ingeniero Civil**. México: Editorial McGraw-Hill / Interamericana de Editores.

Peck R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H. (1999) **Ingeniería de Cimentaciones**. México: Editorial Limusa.

Rollings M.P. y Rollings R.S. (1996). **Geotechnical Materials in Construction**. Nueva York: Editorial McGraw-Hill.

Sowers G.B. y Sowers G.F. (1994). **Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones**. México: Editorial Limusa.

Tensar Earth Technologies, Inc. (1994) **TTN:BR5, Design Guideline for Subgrade Improvement Under Dynamic Loading With Tensar Geogrids**. Atlanta: The Tensar Corporation.

Tensar Earth Technologies, Inc. (1996) **TP:SI1, Subgrade Improvement Technical Memorandum Equivalency**. Atlanta: The Tensar Corporation.

Tensar Earth Technologies, Inc. (1997) **TTN:BR96, Design Guideline for Flexible Pavements With Tensar Geogrid Reinforced Base Layers**. Atlanta: The Tensar Corporation.

Tensar Earth Technologies, Inc. (1998) **TTN:BR10, Chemical and Mechanical Stabilization of Subgrades and Flexible Pavement Sections**. Atlanta: The Tensar Corporation.

Tensar Earth Technologies, Inc. (1998) **TTN:BR11, A Review of Geosynthetics Functions and Applications in Paved and Unpaved Roads**. Atlanta: The Tensar Corporation.

Wright P.H. y Paquete R.J. (1993) **Ingeniería de Carreteras**. México: Editorial Limusa.

[www.adtdl.army.mil](http://www.adtdl.army.mil)

[www.nilex.com/maingeog.html](http://www.nilex.com/maingeog.html)

[www.tenax.net](http://www.tenax.net)

[www.tensarcorp.com](http://www.tensarcorp.com)