



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**(INGENIERÍA CIVIL) – (GEOTECNIA)**

**INFLUENCIA DE GEOMALLAS EN LOS PARÁMETROS**  
**MECÁNICOS DE MATERIALES PARA VÍAS**  
**TERRESTRES**

**T E S I S**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**ELIAS CRUZ VARGAS**

**TUTOR PRINCIPAL**

**AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA, FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MÉXICO, D. F. Febrero del 2013**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Rigoberto Rivera Constantino

Secretario: Dr. Salvador Marín Córdova

Vocal: M.I. Agustín Deméneghi Colina

1<sup>ER</sup> Suplente: M.I Jorge Efraín Castilla Camacho

2<sup>do</sup> Suplente: M.I Germán López Rincón

***Lugar o lugares donde se realizó la tesis:***

Ciudad Universitaria México D.F.

Laboratorio en Puebla, Puebla.

***TUTOR DE TESIS:***

*M.I. AGUSTÍN DEMÉNEGHI COLINA*

-----  
***FIRMA***

## *AGRADECIMIENTOS*

### ***A quien me dio la vida.***

*Mi más grande agradecimiento, por ser una madre que con su paciencia, dedicación y esmero; me ha llevado a estas instancias de mi vida.*

### ***A mí familia.***

*Gracias por darme su apoyo, confianza y por creer en mis proyectos, que han hecho que pueda lograr muchas de las metas de mi vida.*

### ***A mí querida Gigi.***

*Por contar con su tiempo, cariño y amor, en este proceso de mi etapa como profesionista, por eso y mas te agradezco.*

### ***A mí tutor.***

*Por dedicar su intelecto, paciencia y profesionalismo, que ha sabido guiarme en mi camino de estudiante, y como profesionista mi profundo agradecimiento por concluir otro proyecto de mi vida.*

### ***A mis sinodales.***

*Mi respeto y admiración a ustedes por su profesionalismo que han hecho de mi estancia en este camino un mejor estudiante.*

### ***A la Universidad Nacional Autónoma de México***

*Por que en ella viví la mejor experiencia estudiantil, gracias por ser una fuente de creación y desarrollo de mejores hombres y mujeres.*

## **RESUMEN**

La construcción y mantenimiento de carreteras en México ha sido por largo tiempo un detalle característico, debido a que en su mayoría éstas se encuentran en condiciones desfavorables para un buen servicio a los usuarios. Con la llegada de nuevas tecnologías para favorecer las propiedades de los suelos que se utilizan en vías terrestres, es como surge este tema de investigación.

Con base en ello, una propuesta para realizar el mejoramiento mecánico de los materiales que se utilizan en la ejecución de dichos trabajos, es el uso de nuevos productos como son los geosintéticos.

Los materiales antes mencionados proporcionan en la actualidad una base muy atractiva y funcional para mejorar el diseño y la construcción de carreteras; teóricamente y comercialmente estos productos proporcionan un mejor comportamiento en los pavimentos y un aumento de la vida útil del mismo. Con la llegada a México de estos productos, es como surge la idea del estudio, estableciendo una hipótesis y realizando un análisis experimental, para llevar a cabo un análisis e identificar la forma en que afecta el uso de estos productos en los parámetros principales de resistencia de los materiales utilizados en construcción de terracerías y materiales para pavimentos.

Por sus características principales, los productos pueden ocuparse en diversas opciones en el ámbito de las vías terrestres, que van desde control de la erosión, el subdrenaje, muros con suelo armado, protección de taludes, filtros, refuerzo de estructuras de pavimento y estabilizaciones. En este trabajo nos ocuparemos de los dos últimos puntos, para verificar de forma hipotética la afectación del uso de estos sintéticos, en el desempeño mecánico de los materiales comúnmente usados en la ejecución de trabajos de terracerías y pavimentos.

Nos ocuparemos de explicar, qué es una geomalla, sus funciones, especificaciones, el control de calidad para aceptación de las mismas,

describiremos algunas investigaciones realizadas para comprender el tema, y realizaremos algunas pruebas que nos indiquen la afectación que tienen las mismas sobre los suelos que componen la estructura de un pavimento y sus terracerías; además de cómo afectan los parámetros de resistencia de los suelos; principal objetivo de este trabajo.

Por último nos ocuparemos del procedimiento constructivo de terracerías empleando este tipo de tecnologías, así como recomendaciones de construcción; y terminaremos el texto con las conclusiones generales.

## **C O N T E N I D O**

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1. Antecedentes .....	9
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Alcances.....	12
1.4. Justificación .....	13
<b>2. TEORÍA DE LOS GEOSINTÉTICOS. GEOTEXTILES, GEOMALLAS Y GEOMEMBRANAS.</b> .....	14
2.1. Definición Teórica de Geosintéticos .....	14
2.1.1. Propiedades de los Geosintéticos .....	15
2.1.2. Clasificación de Geosintéticos.....	16
2.2. Definición de Geotextil.....	16
2.2.1. Tipos de Geotextiles.....	17
2.2.2. Propiedades de los Geotextiles.....	17
2.3. Definición, Tipos y Características de Geomembranas .....	19
2.4. Definición, Tipos y Características de Geomallas .....	21
2.5. Definición, Tipos y Características de Geodrenes, Geomantas y Geoceldas .....	23
<b>3. ESPECIFICACIONES DE GEOMALLAS Y SUELOS DE ANÁLISIS</b> .....	26
3.1. Uso y Funciones de Geomallas.....	26
3.2. Clasificación de Geomallas .....	27
3.2.1. Geomallas según su Fabricación .....	27
3.2.2. Geomallas según su Flexibilidad .....	29
3.2.3. Geomallas según su Función.....	29
3.3. Características y Pruebas de Calidad en Geomallas.....	31
3.3.1. Geomallas Biaxiales.....	31
3.3.2. Geomallas Uniaxiales.....	31
3.3.3. Geomallas Triaxiales.....	32
3.3.4. Pruebas y Especificaciones en Geomallas .....	33
3.4. Especificaciones de Suelos de Análisis .....	37

3.4.1. Especificaciones de Terreno Natural.....	37
3.4.2. Suelos Blandos .....	38
3.4.3. Suelos Complementarios con Buena Calidad .....	38
3.4.4. Especificaciones de Suelos para Terraplén .....	38
3.4.5. Especificaciones de Suelos para Subrasante .....	39
3.4.6. Especificaciones de Suelos para Sub-base .....	40
<b>4. INVESTIGACIONES DESARROLLADAS Y</b>	
<b>ANÁLISIS EXPERIMENTAL. ....</b>	<b>42</b>
4.1. Geomallas como Refuerzo de Materiales para Terracerías .....	42
4.1.1. Beneficios Teóricos de Utilizar Geomallas .....	45
4.2. Diseño de Pavimentos Reforzados con Geomallas.....	46
4.2.1. Método de Diseño para Carreteras no Pavimentadas Reforzadas con Geomallas Tensar Desarrollado por el Dr. J.P. Giroud y el Dr. Jie Han .....	46
4.2.2. Método de Diseño para Carreteras Reforzadas con Geomallas de US Army Corps of Engineers. ETL-1110-1-189 .....	54
4.2.3. Geomallas Triaxiales (TRIAX TENSAR) .....	70
4.3. Análisis Experimental .....	94
4.3.1. Obtención de Muestras y Materiales Empleados .....	95
4.3.1.1. Identificación de los Materiales.....	95
4.3.2. Propiedades Índice de los Materiales.....	99
4.3.3. Propiedades Mecánicas de los Materiales. Calculo de CBR y Expansión .....	102
4.3.4. Geomallas a Utilizar .....	102
4.3.5. Hipótesis y Ensayos .....	102
4.3.5.1. Metodología Realizada .....	103
4.3.5.2. Procedimiento de Compactación para Pruebas con un Material .....	103
4.3.5.3. Procedimiento de Compactación para Pruebas con dos Materiales.....	106

4.3.5.4. Procedimiento de Compactación para Especímenes con Suelo Blando en la Parte Subyacente .....	107
4.3.6. Resultados y Análisis de las Pruebas .....	109
4.3.7. Conclusiones de Pruebas Realizadas.....	124
<b>5. FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON GEOMALLAS .....</b>	<b>127</b>
5.1. Fabricación de Geomallas .....	127
5.2. Almacenamiento y Transporte de Geomallas.....	128
5.3. Ejecución de Trabajos con Geomallas .....	129
5.4. Detalles de Colocación del Relleno .....	133
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>137</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>142</b>
<b>8. APÉNDICES .....</b>	<b>145</b>

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

La necesidad de desarrollar un tema de esta índole, dentro de una investigación como ésta, recae en el ímpetu por desarrollar un trabajo donde se den a conocer los aspectos fundamentales de una reciente aplicación; las geomallas como una forma de mejorar el comportamiento mecánico de los suelos.

El uso de geomallas como una forma de mejorar las propiedades mecánicas y realizar la estabilización de los suelos tiene cada vez mas aplicaciones; por ello aquí se explicará de forma detallada la afectación de éstas en los parámetros mecánicos; se da una pequeña, pero útil explicación de la etapa constructiva de este sistema que innova la forma de diseñar y construir terraplenes, y estructuras de pavimentos.

La aplicación de este tipo de productos sintéticos en México es relativamente nueva, debido a que es una tecnología que se ha venido integrando a nuestro medio, ya que en otros países se han ocupado con mayor frecuencia; lo que nos ha llevado a adoptar estas tendencias.

De tal modo, el presente trabajo trata del sistema de mejoramiento de suelos con el uso de geomallas como una forma eficaz de construir, estabilizar y reforzar las condiciones iniciales de un subsuelo.

### **1.1 Antecedentes.**

Por la importancia que tienen los pavimentos y carreteras en el desarrollo social y económico de una sociedad, y referente al uso de los suelos como su principal materia prima para la ejecución de estos trabajos; se desarrolla este tema para explicar la forma en que afecta el refuerzo de geomallas en las estructuras de pavimento de las carreteras.

El diseño y construcción de pavimentos en México ha evolucionado relativamente lento, debido a las necesidades que se presentan por los cambios notorios de los medios de transporte terrestre por carretera.

Desde que el hombre emprendió la construcción de obras civiles, tuvo que enfrentarse a los inconvenientes que se presentaban en algunos tipos de suelos de cimentación. Esto lo obligó a desarrollar técnicas de ingeniería que mejoraran las condiciones de dichos suelos.

La idea de colocar algún elemento sobre los suelos blandos para aumentar su capacidad de soporte no es nueva, ya que La vía Apia, construida en el año 312 A.C, fue empedrada con grandes losas poligonales de basalto que descansaban sobre ciertas plantas (la calluna vulgaris) y pieles de borrego. La eficiencia de esta solución ha sido demostrada con el tiempo, puesto que actualmente pueden circular libremente por la vía y con gran comodidad, toda clase de vehículos, exceptuando los de carga.

Lo anterior demuestra la inquietud que ha tenido el constructor para desarrollar una técnica basada en el uso de telas y sintéticos.

La aplicación de los geosintéticos en proyectos con suelos incluye, principalmente, estabilización de terrenos, drenajes subterráneos y protección de terraplenes.

Desde finales de los años cincuenta, cuando comenzaron a ser usados en Japón para la estabilización de suelos pobres, el uso de geosintéticos ha aumentado en cantidad y variedad en sus aplicaciones.

En Estados Unidos de America, los geosintéticos han venido siendo usados para la estabilización de carreteras en zonas pantanosas, cerca de la costa oriental. Las condiciones desfavorables que presentaba un sitio en la ciudad de Chicago para la construcción de una vía fueron mejoradas mediante el uso de geotextiles.

Otra utilización común era la rehabilitación de intersecciones entre carreteras y vías férreas, para minimizar los problemas de asentamientos diferenciales utilizando geomallas y geotextiles.

Un segundo uso de los geosintéticos en construcción y rehabilitación de vías ha sido la aplicación en drenajes subterráneos desde principios de 1970; se han usado en Estados Unidos, por ejemplo, en drenajes longitudinales a lo largo de las más grandes autopistas en Georgia, New Jersey e Illinois.

En cuanto al uso para controlar la erosión en terraplenes, su aplicación comenzó a mediados de los años 60, especialmente en diferentes partes de los Estados Unidos; incluyendo un proyecto en Carolina del Sur construido hace aproximadamente 10 años, donde fue necesaria la protección contra el Océano Atlántico.

En la actualidad las geomallas, como impulsor del buen comportamiento mecánico de suelos blandos y como refuerzo de pavimentos, ha sido desarrollado de manera general en Estados Unidos de América; donde se han realizado grandes proyectos con el uso de estos productos, algunos de ellos son:

De acuerdo a Tensar International; compañía que se dedica al desarrollo de geomallas: Desvío en Clarke Lake Road – British Columbia; Santa Mónica Blvd. – Los Ángeles, California, Vía de acceso a un puente – State Road, Florida, Broadway Plaza – Chula Vista, California entre muchos mas; en México ya se han dado incursiones en proyectos grandes, un ejemplo es la Autopista Circuito Exterior Mexiquense en el Estado de México, donde los planificadores de la autopista necesitaron construir un camino a través del lecho de un lago permanentemente saturado, decidieron construir un terraplén reforzado utilizando un geotextil no tejido, rellenos selectos y Geomallas BX Tensar. Esto les permitió crear un camino con una superficie más compacta, menos rellenos y menor impacto sobre el lago.

## **1.2 Objetivos.**

### **Objetivo general.**

El objetivo primordial de este trabajo es presentar de manera clara, explícita y experimental la teoría básica que le da sustento al uso de geomallas y sobre el impacto en el comportamiento mecánico de los suelos.

La hipótesis para el estudio es la siguiente “El uso de geomallas biaxiales y triaxiales mejora la capacidad portante (CBR) de los materiales de terracerías, empleados en la construcción de pavimentos; así como mejora las condiciones de compactación para materiales donde su subyacente es un suelo blando”.

### **Objetivos particulares.**

Generar una serie de pruebas para observar el efecto de las geomallas como refuerzo en suelos y comparar parámetros de resistencia sin el uso de las mismas.

Proporcionar el conocimiento necesario para procurar la aplicabilidad de geomallas como estabilizador de suelos.

Desarrollar una fuente bibliográfica, para proporcionar al lector un conocimiento exacto de la nueva tendencia en geomallas, y su utilidad en diferentes tipos de materiales para la ejecución de terracerías.

## **1.3 Alcances**

Para lograr los objetivos planteados dentro de nuestra investigación, ésta se enfocó esencialmente en el uso de geomallas y su afectación en materiales para terraplén y subrasante.

El capítulo II; muestra las definiciones del estudio a realizar, desde un geosintético, una geomalla y sus tipos, así como el uso de las mismas.

En el Capítulo III se toma en cuenta el control de calidad y las especificaciones que son útiles para el cuidado de geomallas y de los materiales a experimentar.

Capítulo IV; en él se desarrolla la parte central del tema de tesis, plantea algunas de las investigaciones de realce acerca de las geomallas, donde se explican métodos de diseño y pruebas realizadas con geomallas; se anuncia nuevamente nuestra hipótesis esencial de trabajo, realizaremos la comparativa y verificaremos el efecto sobre los materiales probados bajo las premisas supuestas.

En el capítulo V se presenta de forma sencilla, el procedimiento constructivo, la colocación, transporte y cuidados en la aplicación de geomallas, que son vitales para un buen funcionamiento de las mismas.

El Capítulo VI muestra las conclusiones y las recomendaciones oportunas a seguir para conocer el efecto de las geomallas, así como se mencionan algunas recomendaciones para que éstas funcionen de la mejor manera.

#### **1.4 Justificación**

¿Por qué este tema de investigación? La respuesta es sencilla, con este trabajo se pretende que el lector conozca de manera explícita cómo afecta el uso de geomallas el comportamiento mecánico de los suelos que se ocupan en la construcción de terracerías y pavimentos.

El desarrollo de este tema tendrá un valor importante como bibliografía, pues dentro de la misma, no se cuenta con una fuente que pueda detallar los aspectos relevantes de este tema.

Cabe señalar que la aplicación de estos productos en el futuro cercano será pauta de uso en la construcción de carreteras; de allí el desarrollo del tema, así como la importancia de conocer la ejecución idónea de los mismos.

## **CAPÍTULO II**

### **TEORÍA DE LOS GEOSINTÉTICOS**

#### **GEOTEXTILES, GEOMALLAS Y GEOMEMBRANAS**

##### **2.1 Definición Teórica de Geosintéticos.**

Los **geosintéticos** son un grupo de materiales fabricados mediante la transformación industrial de sustancias químicas denominadas polímeros, del tipo conocido genéricamente como “plásticos”, que de su forma elemental de polvos o gránulos, son convertidos mediante uno o más procesos, en láminas, fibras, perfiles, películas, tejidos, mallas, etc., o en compuestos de dos o más de ellos, existiendo también algunas combinaciones con materiales de origen vegetal.

Aunque en la naturaleza existen de manera natural sustancias poliméricas, como la seda y la celulosa, la diferencia con los geosintéticos, es que estos últimos son fabricados por el hombre, a partir de productos obtenidos de la refinación del petróleo.

Otra característica particular de los geosintéticos, es que su aplicación se relaciona con la actividad de la construcción, por lo que participan como parte integral de sistemas y estructuras que utilizan materiales de construcción tradicionales, como suelos, roca, agregados, asfaltos, concreto, etc.

Sus funciones dentro de tales estructuras son las de complementar, conservar, o bien mejorar el funcionamiento de los sistemas constructivos e inclusive, en algunos casos, sustituir por completo algunos materiales y procesos de la construcción tradicional.

### 2.1.1 Propiedades de los Geosintéticos.

Los plásticos son los componentes principales en los geosintéticos. En la actualidad muchas industrias sustituyen ventajosamente materiales tradicionales, como agregados, suelos, metal, vidrio, etc., por materiales de plástico, que poseen, en general, las siguientes propiedades:

- 1) Ligereza, existiendo materiales menos densos que el agua.
- 2) Ductilidad.
- 3) Maleabilidad.
- 4) Elevada elasticidad.
- 5) Resistencia mecánica.
- 6) Resistencia a agentes químicos, la cual varía dependiendo del material.
- 7) Posibilidad de mejorar sus propiedades mediante aditivos o procesos mecánico – térmicos.
- 8) Rangos variables de resistencia al intemperismo, existiendo algunos que deben ser protegidos y otros que pueden ser expuestos a la intemperie por lapsos largos, sin experimentar deterioro.
- 9) Baja absorción de agua.
- 10) Resistencia a la biodegradación, la cual varía según el material de que se trate.

La familia de los plásticos es muy extensa. Los productos de esta naturaleza que se utilizan para fabricar geosintéticos es apenas una pequeña fracción de los polímeros que se utilizan. En general, las propiedades específicas de un plástico dependen de la combinación de muchas variables, las cuales son, entre otras:

Naturaleza química: grupos funcionales, peso molecular, dispersión del peso molecular, ramificaciones de la cadena principal, incorporación química de componentes (copolímeros), incorporación física de aditivos, tipo de formulación, etc.

### 2.1.2 Clasificación de Geosintéticos

La siguiente clasificación muestra los distintos geosintéticos; de cada tipo existen distintas clases o subcategorías.

- ✓ Geotextiles.
- ✓ Geomembranas.
- ✓ Geomallas.
- ✓ Geodrenes.
- ✓ Geomantas.
- ✓ Geoceldas.
- ✓ Geocompuestos de Bentonita.

### 2.2 Definición de Geotextil.

Los **geotextiles** se pueden definir como un material textil plano, permeable y polimérico, que se emplea en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. Los polímeros utilizados en la fabricación de geotextiles suelen ser de origen sintético, debido a su mayor durabilidad frente a los naturales; los principales son las poliamidas, poliésteres y las poliolefinas (polietileno y polipropileno).

Los geotextiles son telas con diversas estructuras cuyos elementos individuales son fibras, filamentos, o cintas de plástico, que siguiendo diversos patrones de distribución de sus elementos individuales, se reúnen y entrelazan entre sí por medio de diversos procesos, que les someten a acciones mecánicas, térmicas, químicas, o varias de ellas, obteniendo así, estructuras continuas relativamente delgadas, porosas y permeables en forma de hojas, que tienen resistencia en su plano.

### 2.2.1 Tipos de Geotextil.

- Los tipos de geotextiles se clasifican, según el proceso de fabricación en:

Geotextiles no tejidos.

Geotextiles tejidos.

- Clasificación de geotextiles, según el polímero de su fabricación:

Geotextiles de poliéster.

Geotextiles de polipropileno.

### 2.2.2 Propiedades de Geotextiles.

Las propiedades de los geotextiles son el resultado de la combinación de su polímero base, de su estructura y de los procesos de acabado a que se sometió el material.

La estructura es el arreglo geométrico entre los elementos individuales del producto, ya sean fibras cortadas, filamentos o cintas, y del tipo de unión entre los mismos, factores que resultan en un material específico.

El grupo con un uso más extendido, tanto en cantidad de aplicaciones como en tipos de trabajo, es el de los geotextiles no tejidos, que se caracterizan porque las fibras que los componen se distribuyen en forma desordenada, en todas direcciones.

Dentro de este grupo, de los geotextiles no tejidos, los punzonados, son los de mayor uso; en ellos, la unión entre sus fibras se logra mediante entrelazamiento por la acción de agujas, con lo que se obtienen estructuras adaptables, pues sus fibras tienen una relativa libertad de movimiento entre sí, lo que genera una importante elongación inicial, antes de entrar en tensión.

Su comportamiento bajo tracción se caracteriza por una carga relativamente baja en tensión inicial, que corresponde a una elongación inicial relativamente alta (bajo

módulo inicial), lo que explica el alto grado de adaptabilidad de este tipo de geotextil, que le permite adaptarse a superficies irregulares, sin ser dañado.

Este tipo de geotextiles tienen, además, muy alta porosidad y permeabilidad, tanto en su plano como a través de su plano, siendo filtros muy eficientes. Son resistentes al bloqueo de sus poros con suelo bien graduado. El flujo a través de su estructura inicia con carga hidráulica muy baja.

Una manera muy común de clasificarlos, es por su masa por unidad de área, siendo los de uso más extendido desde 140 hasta 400 g/m<sup>2</sup>, aunque existen de mucha mayor masa, para aplicaciones especiales. Los más pesados y resistentes se utilizan para protección de geomembranas, estabilización y refuerzo.

Otro grupo importante de geotextiles son los tejidos, en los que su construcción sigue un patrón geométrico claramente definido, que se logra por medio del entrelazamiento de filamentos o cintas planas en dos direcciones mutuamente perpendiculares, mediante un proceso de urdido, por el cual es posible combinar diferentes tipos de filamentos en cualquiera de las direcciones del tejido, para obtener las propiedades de resistencia que se buscan, en las dos principales direcciones de fabricación; estos geotextiles son menos rígidos en el sentido diagonal.

Dentro de este grupo de materiales tejidos, son los geotextiles tejidos de cinta plana los de mayor volumen de uso; las cintas que los componen son planas, mejor conocidas como rafia; debido a que su resistencia se tiene principalmente en los sentidos de fabricación y en el transversal a éste, se someten a un proceso de acabado térmico para reducir el movimiento relativo de las cintas.

Su comportamiento bajo tracción muestra una carga en tensión inicial relativamente alta, con baja elongación (alto módulo inicial). Por ello su capacidad de adaptación a superficies con irregularidades filosas, como son subsuelos con presencia de roca, es baja. Su aplicación más exitosa es como refuerzo sobre estratos que experimentan asentamientos al construir, como son zonas de suelos saturados y pantanos, sin roca presente en la superficie, pues de este modo

pueden desarrollar su capacidad de refuerzo a la tensión y mantener su integridad; los tipos más usuales varían desde 140 hasta 280 g/m<sup>2</sup>.

### **2.3 Definición, Tipos y Características de Geomembranas.**

Las geomembranas son láminas de muy baja permeabilidad que se emplean como barreras hidráulicas; se fabrican en diversos espesores y se empacan en rollos que se unen entre sí mediante técnicas de termo-fusión, extrusión de soldadura, aplicación de adhesivos, solventes o mediante vulcanizado, según su naturaleza química.

Tipos de geomembranas, según el proceso de su fabricación:

- ✓ Geomembranas no reforzadas.
- ✓ Geomembranas reforzadas.

Tipos de geomembranas, según el polímero de su fabricación:

- ✓ Geomembranas de PVC plastificado.
- ✓ Geomembranas de polietileno de alta densidad.
- ✓ Geomembranas de polipropileno.
- ✓ Geomembranas de polietileno cloro sulfonado.
- ✓ Geomembranas de hules sintéticos.

Las geomembranas de mayor volumen de aplicación son las no reforzadas, de polietileno de alta densidad y de PVC plastificado.

Las geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD) se fabrican en rollos anchos, de 7.0m o más, y en esta presentación se embarcan al sitio de la obra, donde se unen unos con otros mediante equipo de termofusión y extrusión de soldadura del mismo polímero.

Otro tipo muy usual de geomembranas, son las de PVC plastificado, las cuales se instalan mediante la unión en campo, de lienzos prefabricados en plantas industriales, según un despiece planeado, para luego unirse unos con otros en su sitio de ubicación final, a manera de rompecabezas. Esto es posible en las

geomembranas de PVC plastificado, porque los lienzos pueden ser doblados y empacados en forma de paquetes, sin causar daño al material, como podría ser en otro tipo de láminas que se agrietan al ser dobladas. Lo anterior resulta en instalaciones muy rápidas.

La selección del tipo de geomembrana para cada aplicación requiere del análisis de diversas variables:

- ✓ Compatibilidad química.
- ✓ Comportamiento mecánico requerido.
- ✓ Exposición al intemperismo.
- ✓ Eventual daño mecánico y reparaciones.

Las variables indicadas anteriormente no son, sin embargo, las únicas a considerar, requiriéndose generalmente de una evaluación más completa de la instalación que se trate, tomando en cuenta que existen situaciones que se requieren diseñar de manera más completa, no pudiendo depender exclusivamente de un producto (la geomembrana), para impedir el hecho de situaciones graves, como puede ser, por ejemplo, la fuga de sustancias peligrosas que pueden contaminar el ambiente y amenazar la salud pública, para lo cual se requiere construir sistemas impermeables, en vez de simplemente utilizar geomembranas.

Existen diversas ventajas, encontrándose las impermeabilizaciones por ejemplo; las ventajas entre geomembranas-arcilla compactada para impermeabilizaciones son:

- ✓ Continuidad.

Las capas de arcilla compactada contienen pequeños conductos en su masa, a través de los cuales se establece el flujo de líquidos. Estos conductos se presentan por agrietamiento, al perder humedad la arcilla. También se presentan conductos horizontales en la frontera entre las capas compactadas. La razón de esto es que las barreras de suelo no son

materiales continuos, sino el producto del acomodamiento y densificación de partículas por el proceso de compactación a que se deben someter.

- ✓ Muy bajo coeficiente de permeabilidad.

Esta propiedad es mucho menor que la correspondiente a arcillas compactadas. Se determina en forma indirecta con la medición de transmisión de vapor a través de la geomembrana. Esto trae como consecuencia que se pueden construir sistemas impermeables con espesores relativamente despreciables, en lugar de tener que compactar gruesas capas de arcilla.

- ✓ Ligereza.

Propiedad importante de las geomembranas desde el punto de vista logístico, ya que se puede lograr la impermeabilización sin grandes acarreo y en lapsos muy cortos.

#### **2.4 Definición, Tipos y Características de Geomallas.**

En este subtema abundaremos un poco mas en el capítulo 3; aquí hablaremos rápidamente de su definición y tipos únicamente. Las geomallas son elementos estructurales que se utilizan para distribuir la carga que transmiten terraplenes, cimentaciones y pavimentos, así como cargas vivas, sobre terrenos de baja capacidad portante, o bien como elementos de refuerzo a la tensión unidireccional, en muros de contención y taludes reforzados que se construyen por el método de suelo reforzado.

Por su funcionamiento, las geomallas son de dos tipos principales:

**Geomallas biaxiales**, que poseen resistencia a la tensión en el sentido de su fabricación (a lo largo de los rollos) y también en el sentido transversal al anterior.

**Geomallas uniaxiales**, que poseen resistencia a la tensión únicamente en el sentido de fabricación.

Por su Flexibilidad, se tienen dos tipos:

**Geomallas rígidas**, que se fabrican mediante procesos de pre-esfuerzo del polímero, primordialmente polipropileno y polietileno de alta densidad.

**Geomallas flexibles**, fabricadas mediante procesos de tejido de filamentos de alta tenacidad, que fueron previamente sometidos a un alto grado de orientación molecular; se fabrican de poliéster.

Dado que las geomallas uniaxiales se utilizan en estructuras cuyo comportamiento debe garantizarse por lapsos muy largos (de hasta 100 años), sus propiedades relevantes son:

- Resistencia a la tensión.
- Resistencia a largo plazo bajo carga sostenida.
- Coeficiente de fricción en contacto con el suelo que refuerza.
- Resistencia al daño mecánico.
- Resistencia a ataque químico y biológico.

Las geomallas biaxiales funcionan mediante mecanismos de interacción con el suelo y los agregados, que les permiten tomar parte de los esfuerzos inducidos durante la construcción, mediante fuerzas de tensión que se desarrollan en el plano del material.

Por ello, las propiedades principales de las geomallas biaxiales, directamente relacionadas con sus diversas aplicaciones, son:

- Tamaño de aberturas.
- Rigidez a la flexión.
- Estabilidad de aberturas.
- Módulo de tensión.
- Resistencia a la tensión.

## 2.5 Definición, Tipos y Características de Geodrenes, Geomantas y Geoceldas.

Los **geodrenes**; son drenes prefabricados elaborados mediante la combinación de núcleos de plástico con alta resistencia a la compresión y muy alta conductividad hidráulica, y cubiertas de un geotextil filtrante que impide la intrusión de suelo dentro de los vacíos disponibles para el flujo; su función es captar y conducir líquidos a través de su plano.

Son estructuras continuas y extremadamente delgadas, en comparación con las dimensiones requeridas para construir drenes a base de agregados y tuberías.

Tipos de geodrenes, según el polímero de su núcleo

- Núcleo de poliestireno de alto impacto.
- Núcleo de polietileno de alta densidad.

Tipos de geodrenes, según la forma de su núcleo.

- Núcleos en forma de canastilla.

Contienen una multitud de conos espaciadores que forman canales por los cuales se transporta el fluido captado. El ingreso de los fluidos al producto se realiza por ambas caras del núcleo, cuyo reverso es plano y tiene orificios.

- Núcleos en forma de malla.

Contienen en ambas caras, series de gruesos cordones de plástico, paralelos entre sí, que se superponen sobre otra serie de cordones del mismo tipo, formando ángulos agudos, teniendo apariencia de mallas tejidas, con alta proporción de áreas abiertas, uniformes en tamaño. El flujo del agua en el plano del material se establece a través de los canales resultantes.

La combinación con geotextiles como un medio filtrante generalmente es del tipo no tejido, aunque existen variantes para casos especiales en los que se usan geotextiles tejidos, por su alto módulo de tensión.

Los geodrenes más gruesos y con mayor capacidad de flujo se utilizan en los hombros de las carreteras para abatir el nivel freático y de este modo proteger el pavimento o bien para coleccionar y desalojar el agua captada por capas permeables del pavimento. Los más delgados se emplean en el respaldo de muros de contención, para cortar líneas de flujo procedentes de filtraciones en la parte superior del relleno contenido por el muro y así evitar la generación de empujes hidrostáticos sobre el mismo y también para interceptar flujos en laderas.

Las **geomantas**; son láminas relativamente gruesas formadas con filamentos cortos o largos de plástico, generalmente de polipropileno, polietileno o nailon, de sección rectangular o cónica, simplemente agrupados con ayuda de redcillas, aglutinantes o costuras muy sencillas, o bien fuertemente entrelazados entre sí, que pueden o no incluir capas de fibras de origen vegetal.

Se instalan sobre taludes para evitar su erosión, como elementos de protección permanente o temporal, y combinadas o no, con siembra de semilla.

Sus funciones son las de reducir la capacidad erosiva de los escurrimientos, proteger al suelo, acelerar la germinación de especies vegetales implantadas, reforzar las raíces, o varias de ellas.

Las geomantas se fabrican con diferentes propiedades pudiendo agruparse de la siguiente manera:

- Mallas sintéticas delgadas, con baja porosidad y resistencia mecánica limitada, que se utilizan únicamente como materiales de cubierta, para aplicaciones temporales.
- Mallas sintéticas gruesas, con estructura tridimensional, alta porosidad y suficiente resistencia para permitir el llenado de sus poros con suelo.

De este tipo existen dos categorías: Las mallas sintéticas gruesas, contienen capas de fibras vegetales, con estructura tridimensional, baja porosidad y suficiente resistencia para permitir el llenado de sus poros con suelo y mallas sintéticas gruesas con estructura tridimensional, alta porosidad y alta resistencia que además de permitir el llenado de sus poros con suelo, refuerzan el sistema radicular a largo plazo, una vez que se ha desarrollado la vegetación. La resistencia mecánica puede ser aportada por los mismos filamentos sintéticos que forman su estructura o por un elemento de refuerzo adicional. Igual al anterior, pero de menor porosidad por la inclusión en su estructura, de capas de fibras de coco.

Las **geoceldas**; son estructuras tridimensionales de gran peralte y forma romboide, que se utilizan para contener rellenos en taludes, con el objetivo de evitar su deslizamiento y erosión. También se utilizan para confinar materiales dentro de sus celdas y construir plataformas reforzadas, con mayor capacidad de distribución de la carga; en esta aplicación, el producto previene la falla por desplazamiento lateral del relleno bajo las cargas impuestas.

Se fabrican con diversos peraltes y tamaños de abertura de celda, en polietileno de alta densidad y polipropileno.

## **CAPÍTULO III**

# **ESPECIFICACIONES DE GEOMALLAS Y SUELOS DE ANÁLISIS**

Una vez que se trataron los aspectos de definiciones y se conocieron los tipos de geosintéticos y sus características, es tiempo de conocer algunas propiedades específicas de los materiales en estudio, como es el caso de las geomallas, sus tipos y especificaciones; mencionaremos diversos análisis que se realizan en la actualidad a dichos materiales. También abordaremos el tema concerniente a las especificaciones de los suelos que se llevarán a experimentar mas adelante.

### **3.1 Uso y Funciones de Geomallas.**

Las geomallas se pueden definir como un geosintético que consiste en un arreglo rectangular o triangular uniforme, conformando una estructura abierta que permite al suelo pasar a través del plano; el arreglo está conformado por tiras o costillas de material unidos en un punto llamado nodo, los principales materiales de fabricación son los polímeros derivados de refinación del petróleo; las geomallas se emplea en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil.

Los polímeros utilizados en la fabricación suelen ser de origen sintético debido a su mayor durabilidad frente a los naturales. Los principales son las poliamidas, poliésteres y las poliolefinas (polietileno y polipropileno).

Las geomallas se caracterizan por desarrollar varias funciones simultáneas una vez colocados en el terreno. Esta propiedad les garantiza una posición ventajosa frente a otros sistemas;

- Estructuras de suelo reforzado.
- Refuerzo de pavimentos.

- Mejoramiento de subrasante.
- Refuerzo de base.
- Muros de retención, MSE.
- Refuerzo de taludes.
- Refuerzo de cimentaciones.
- Protección costera y ribereña.

El empleo de estos productos en todo el mundo a lo largo de los últimos años se ha destacado por sus propiedades y características, entre las más importantes destacan:

- Facilidad de puesta en obra.
- Son económicos.
- Permiten ahorros en tiempos de ejecución.
- Posibilitan soluciones medioambientales correctas.
- Ofrecen muchas variantes y posibilidades de uso.

### **3.2. Clasificación de Geomallas.**

En esta sección hablaremos rápidamente como se clasifican las geomallas.

#### **3.2.1 Clasificación de Geomallas según su Fabricación.**

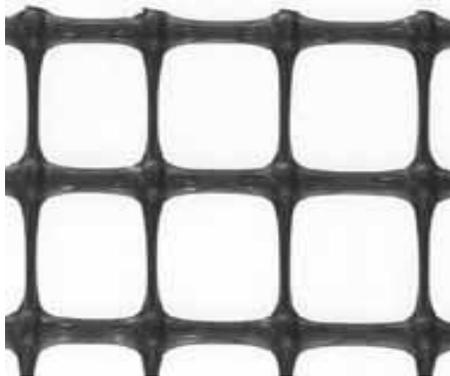
Las geomallas y productos relacionados con las mismas se fabrican utilizando diferentes procesos. Las geomallas son fabricadas con poliéster, polipropileno y polietileno de alta densidad. Existen tres tipos según su proceso de fabricación: soldadas, tejidas o extruidas.

- *Las geomallas soldadas* son generalmente fabricadas con hilos o tiras multifilamento de poliéster recubierto de un polímero que protege al material principal de la acción del ambiente (rayos UV principalmente) y cuyas costillas están unidas a través de termofusión. Generalmente logran resistencias muy altas.



**Figura 3.1** Malla soldada.

- *Las geomallas extruidas* son fabricadas en polipropileno o polietileno de alta densidad a través de la perforación de láminas de estos materiales lo que genera arreglos muy estables en su conformación.



**Figura 3.2** Geomalla biaxial extruida.

Este tipo de geomallas serán utilizadas para exponer la metodología del capítulo 4; geomallas biaxiales extruidas de polipropileno.

- *Las geomallas tejidas* están fabricadas con hilos o tiras multifilamento de poliéster recubiertas de un polímero protector (PVC normalmente) al igual que las soldadas, pero se conforman entrelazando los filamentos en arreglos perpendiculares en maquinas similares a telares, su ventaja radica en que el entrelazado genera puntos de falla menores que las demás geomallas.

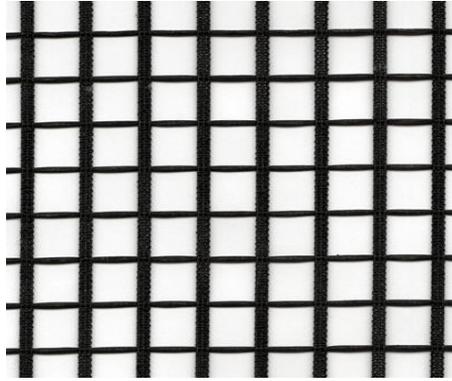


Figura 3.3 Geomalla biaxial tejida.

### 3.2.2 Clasificación de Geomallas según su Flexibilidad.

Por su Flexibilidad, se tienen dos tipos:

- *Geomallas rígidas*, que se fabrican mediante procesos de pre-esfuerzo del polímero, primordialmente polipropileno y polietileno de alta densidad.
- *Geomallas flexibles*, fabricadas mediante procesos de tejido de filamentos de alta tenacidad, que fueron previamente sometidos a un alto grado de orientación molecular; se fabrican de poliéster.

### 3.2.3 Clasificación de Geomallas según su Función.

Por su funcionamiento la geomallas se dividen en:

**Geomallas biaxiales**, que poseen resistencia a la tensión en el sentido de su fabricación (a lo largo de los rollos) y también en el sentido transversal al anterior.



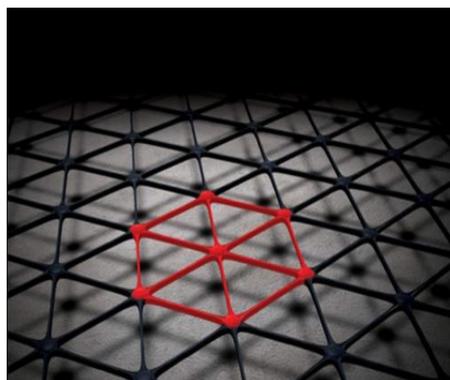
Figura 3.4 Geomalla biaxial.

- **Geomallas uniaxiales**, que poseen resistencia a la tensión únicamente en el sentido de fabricación.



**Figura 3.5** Geomalla uniaxial.

- **Geomallas multidireccionales o triaxial**, que poseen resistencia a la tensión en el sentido de su fabricación (a lo largo de los rollos) y también en el sentido transversal al anterior, además que puede ejercer resistencia en sentidos inclinados. Son las más recientes en el mercado.



**Figura 3.5** Geomalla triaxial.

### **3.3 Características y Pruebas de Calidad en Geomallas.**

A continuación se presentan algunas cuestiones teóricas de las geomallas en sus tres tipos según su función:

#### **3.3.1 Geomallas Biaxiales.**

La geomallas biaxiales presentan las siguientes características según Tensar Corporation. (Spectra Improvement System, 2012<sup>[13]</sup>)

- Rigidez.
  - Alta resistencia con bajas deformaciones.
  - Soporte de anclaje (soporte con protuberancias filosas)
- Geometría Abierta.
  - Aperturas uniformes.
  - Juntas fuertes.
  - Confina el relleno.

Algunas aplicaciones de la geomalla biaxial son:

- Mejoramiento de subrasante.
- Refuerzo de base.
- Refuerzo de balasto.
- Plataforma de transferencia de cargas.
- Mejoramiento de cimentación (zapatas).

#### **3.3.2 Geomallas Uniaxiales.**

Las geomallas uniaxiales tienen las siguientes características:

- Geometría abierta.
  - Mayor coeficiente de interacción.
  - Alta resistencia a la tensión.
- Derivadas de láminas de polietileno de alta densidad (PEAD).
- Compatibles con muchos tipos de relleno.

Las aplicaciones mas frecuentes son:

- Muros de contención.
- Taludes muy inclinados.
- Mejoramiento de cimentación, (terraplenes).
- Protección costera y ribereña, (colchones marinos).

### **3.3.3 Geomallas Triaxiales.**

Las características principales de las geomallas triaxiales son:

- Rigidez.
  - Alta resistencia con bajas deformaciones.
  - Juntas reforzadas.
  - Y la característica principal, es que distribuye esfuerzos en direcciones diagonales que favorecen la rigidez radial con bajas deformaciones.

Algunas aplicaciones de la geomalla triaxial son:

- Mejoramiento de subrasante.
- Refuerzo de base.
- Refuerzo de asfalto.

### 3.3.4 Pruebas y Especificaciones en Geomallas.

Aunque no es el tema principal, es necesario conocer algunas de las pruebas que se realizan a las geomallas, para que puedan ser de alta calidad y que cumplan con las expectativas para las que fueron producidas y diseñadas.

Para esta parte del trabajo nos enfocaremos en mencionar las pruebas en geomallas que se utilizan para lograr el reforzamiento de suelos en vías terrestres, pues es el tema principal de este trabajo, mencionaremos los principales ensayos para geomallas biaxiales; que más adelante se utilizarán para demostrar nuestra hipótesis.

Las pruebas y especificaciones que se mencionarán enseguida, son las necesarias para conocer las especificaciones que aparecen en las fichas técnicas de cualquier geomalla. La ASTM (American Society for Testing Materials) y EPA (Environmental Protection Agency); establecen las pruebas de acuerdo a procedimientos establecidos.

1.- En principio abordaremos la norma para poder muestrear un geosintético para lo cual nos referimos a **ASTM D4354**; esta práctica proporciona un medio por el cual las muestras de geosintéticos pueden ser seleccionadas para proporcionar una muestra estadísticamente válida, para la selección de muestras de ensayo sin previo conocimiento de la variabilidad que puede existir entre las unidades de producción.

Esta práctica cubre tres procedimientos para el muestreo de geosintéticos. La práctica proporciona las instrucciones sobre la toma de muestras de laboratorio y muestras de análisis.

El primer procedimiento describe el muestreo de las unidades de producción a efectos de control de calidad del fabricante (MQC).

El segundo procedimiento describe el muestreo de las unidades de producción, con el fin de garantizar la calidad del fabricante (MQA); prueba durante el proceso de fabricación.

El tercer procedimiento describe la división de muestras para los traslados de geosintéticos en lotes y la determinación del tamaño del lote, para las pruebas de conformidad de las especificaciones del comprador.

2.- A continuación hablaremos de la norma **ASTM D4759-02**; Práctica Estándar para Determinar el Cumplimiento de la Especificación de Geosintéticos; esta práctica cubre un procedimiento para determinar la conformidad de las propiedades de geosintéticos en las especificaciones estándar.

3.- La norma **ASTM D6637-11**; nos da el Método de Prueba Estándar para Determinar las Propiedades de Tracción de Geomallas; por el método de tracción simple o múltiple costilla (multiple rib). Nos determina la elongación a la tracción de geomallas; proporciona los valores de propiedades índice. Este método de ensayo se utiliza para el control de calidad y pruebas de aceptación de envíos comerciales de geomallas.

La norma proporciona el método de ensayo, cubre la determinación de las propiedades de resistencia a la tracción de geomallas, sometiendo tiras de anchura variable a carga de tracción.

Tres procedimientos alternativos se proporcionan para determinar la resistencia a la tracción, de la siguiente manera:

- Método A - Prueba de un solo nervio; geomalla en tensión (N ó lbf).
- Método B - Prueba de múltiples costillas; geomalla en tensión (kN /m ó lbf / pie).
- Método C - Prueba de múltiples capas de múltiples nervios de geomalla; en tensión (kN /m ó lbf / pie).

4.- Continuando, la norma del Instituto de Investigaciones Geosintéticas (GRI, por su sigla en inglés) **GRI-GG2-87**: Método de Prueba Estándar para la Resistencia de las Uniones de la Geomalla; nos facilita una prueba para conocer los valores de resistencia a rotación en los nodos. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. (USACE); nos da la especificación preliminar para la estabilidad de la

abertura de la malla por rotación planar; que mide la resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a esfuerzo mecánico, instalación en arena arcillosa (SC), así como arena bien graduada (SW), y suelos gruesos triturados clasificados como grava mal graduada (GP). De la geomalla se tomará muestra de acuerdo con ASTM D5818-06 y la capacidad de carga se determinará de acuerdo con ASTM D6637-01.

5.- Resistencia a la fuerza de flexión; determinada de acuerdo con **ASTM D5732-01**, usando especímenes de ancho de dos costillas, con costillas trasversales cortadas a ras de los bordes exteriores de las nervaduras longitudinales. (Como una "escalera"), y de longitud lo suficientemente largo para permitir la medición de la parte sobresaliente.

6.- La resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se someten a ambientes químicamente agresivos; se realiza de acuerdo con **EPA 9090 pruebas de inmersión**. (Environmental Protection Agency.)

7.- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta y medios agresivos a la intemperie, según la norma **ASTM D4355-05**.

Se han mencionado las principales pruebas sobre geomallas; con el fin de conocer como se obtienen los parámetros de las distintas especificaciones para evaluar sus características.

Según el Cuerpo de Ingenieros (USACE); en (ETL 1110-1-189; 2003<sup>[18]</sup>); en las tablas 3.1 y 3.2; aparecen las propiedades mas comunes y que son reportadas en fichas técnicas de los productores de geomallas.

<b>Propiedades de Geomallas Comúnmente Reportadas.</b>		
<b>Propiedades de ingeniería</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Unidades</b>
<b>Propiedades de refuerzo</b>		
2% o 5% Modulo secante	ASTM D 6637 <sup>1</sup>	kN / m
Coefficiente de interacción	GRI GG5	* <sup>2</sup>
Coefficiente de corte directo	ASTM D 5321	Grados
Apertura mm	Medida directa	Mm
Porcentaje de área abierta	COE CW-02215	%
<b>Los valores del índice de Supervivencia</b>		
Resistencia última a la tracción	ASTM D 6637 <sup>1</sup>	kN / m
Resistencia en los nodos	GRI GG2	%
Estabilidad ultravioleta	ASTM D 4356	%
<b>Propiedades experimentales<sup>3</sup></b>		
Rigidez a la flexión	Bajo desarrollo	*
Estabilidad de apertura	Bajo desarrollo	*

[1] Método de ensayo modificado para geomallas en sitio de ASTM D4595

[2] Propiedades adimensionales

[3] Las propiedades de rigidez a la flexión y estabilidad de apertura están siendo evaluadas

**Tabla 3.1** Propiedades comúnmente reportadas de geomallas (USACE <sup>[18]</sup>).

<b>Requisitos Mínimos de las Especificaciones para Geomalla Biaxial</b>		
<b>Propiedades de la Geomalla</b>	<b>Método de Ensayo ASTM</b>	<b>Especificación Mínima<sup>1</sup></b>
Masa por unidad de área (oz/yd <sup>2</sup> )	D 5261	9.0
Tamaño de apertura - dirección de máquina (pulg)	Medición directa	1.0
Tamaño de apertura- dirección transversal de la máquina (pulg)	Medición directa	1.3
Resistencia a la tracción en banda ancha (lb / Pies) / %:		
Resistencia al 5% de esfuerzo- En dirección de maquina.		700
Resistencia al 5% de esfuerzo- En dirección transversal de maquina	D 6637	1,200
Resistencia ultima-Dirección de la maquina		1,200
Resistencia ultima-Dirección transversal de la maquina		2,096
Proceso de Manufacturado	----	Extruidas

[1] Requerimientos mínimos para maquinado en dirección del plano y transversal basado en Webster (1993) <sup>[19]</sup>

**Tabla 3.2** Requerimientos mínimos de geomallas biaxiales (USACE).

### 3.4 Especificaciones de Suelos de Análisis.

En esta etapa se presentan las especificaciones de los suelos que serán objeto de análisis y que se van a comentar en el capítulo 4. Las especificaciones de suelos que se presentarán a continuación nos interesarán para conocer los valores y rangos existentes de parámetros importantes en materiales para terracerías.

Los parámetros que se evaluarán entre algunos otros son:

- Propiedades índices.
  - Granulometría).
  - Contenido de humedad.
  - Límites de consistencia.
  - Masa Volumétrica Suelta.
  - Densidad de suelos.
  
- Propiedades Mecánicas
  - CBR ó Valor Relativo de Soporte. (Valor de Soporte California).
  - Expansión
  - Grado de Compactación y Humedad Óptima.

Todas estas pruebas se realizarán mediante la normativa para la infraestructura del transporte emitida por el Instituto Mexicano del Transporte escrita para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y procedimientos ASTM. <sup>(9,31)</sup>.

El objeto de análisis y comparativa de este trabajo nos llevará a evaluar las propiedades mecánicas antes mencionadas, con el fin de evaluar según la hipótesis; el efecto de las geomallas en diferentes tipos de suelos.

#### 3.4.1 Especificaciones de Terreno Natural.

A los materiales de terreno natural; se les realizan pruebas con el objetivo de conocer sus propiedades índice y mecánicas; no existe una especificación pues es el material en estado natural; para este trabajo se realizarán pruebas a materiales que presentan dificultades para la construcción de terraplenes o para la estructura

de los pavimentos; cabe mencionar que cualquier diseño de pavimentos está basado en la capacidad portante que tenga el suelo de desplante; medido como CBR, resistencia al corte ó índice de cono.

#### **3.4.2 Suelos Blandos.**

Analizaremos suelos con consistencia blanda, que no cumplan con los requisitos mínimos para formar un material de terraplén o subyacente. Se realizarán pruebas a suelos puramente arcillosos que sean clasificados según el SUCS como CL ó CH que normalmente presentan las peores características para formar un cuerpo de terracerías.

#### **3.4.3 Suelos Complementarios con Buena Calidad.**

- ✓ Se analizarán también suelos que se clasifiquen como arenas, que representen un mejoramiento al superponerlos sobre materiales arcillosos.
- ✓ Por ultimo se analizaran materiales limosos que cumplan los requisitos de materiales de subrasante.

#### **3.4.4 Especificaciones de Suelos para Terraplén.**

Los suelos que son viables para material de terraplén, son suelos y fragmentos de roca producto de los cortes o extracción en banco, que se utilizan para formar el cuerpo de terraplén hasta alcanzar el nivel de desplante de la capa de subyacente o subrasante.

Los materiales que se utilizan para conformar terraplenes, tendrán que cumplir con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 3.3. En ningún caso se podrá utilizar materiales altamente orgánicos como turba (Pt), tampoco se debe utilizar materiales producto de despalme.

Los requisitos de calidad de materiales para terraplén son:

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Límite Líquido; % máximo	50
Valor Soporte California (CBR) <sup>[1]</sup> ; % mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación <sup>[2]</sup> , %	90 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta tabla.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba.

**Tabla 3.3** Requisitos de calidad para materiales de terraplén.  
(SCT N.CMT.1.01./02; IMT<sup>[9]</sup>)

### 3.4.5 Especificaciones de Suelos para Subrasante.

Los suelos que son viables para material que conformen la capa de subrasante son suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos. Estos materiales forman la capa que se coloca inmediatamente y por encima de la cama de los cortes, de la capa subyacente o del cuerpo de un terraplén. Cuando la capa de subyacente no se proyecta, sirve para realizar el desplante de la estructura del pavimento.

Los requisitos de calidad de los materiales que se utilicen para la formación de la capa de subrasante está en función de la intensidad de tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes 8,2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento. En ningún caso se podrá utilizar materiales altamente orgánicos como turba (Pt), tampoco se debe utilizar materiales producto de despalme.

La especificación del material se establece en la tabla 3.4.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Tamaño máximo; mm	76
Límite Líquido; % máximo	40
Índice plástico; % máximo	12
Valor Soporte California (CBR) <sup>[1]</sup> ; % mínimo	20
Expansión; %, máxima	2
Grado de compactación <sup>[2]</sup> ; %	100

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta tabla.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba.

**Tabla 3.4** Requisitos de calidad para materiales de subrasante.  
(SCT N.CMT.1.03./02; IMT<sup>[9]</sup>)

### 3.4.3 Especificaciones de Suelos para Sub-base.

Son materiales granulares, que se colocan normalmente sobre la subrasante, para formar una capa de apoyo para la base de pavimentos asfálticos. Los materiales pueden ser naturales: como son arenas, gravas y limos, así como rocas muy alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse.

También pueden ser materiales cribados; como son gravas, arenas y limos, rocas alteradas y fragmentadas sueltas. De igual manera pueden ser materiales parcialmente triturados, totalmente triturados o bien una mezcla.

Los requisitos de granulometría son los que se indican en la tabla 3.5, y los requisitos mecánicos para dicho material se indican en la tabla 3.6.

<b>Malla</b>		<b>Porcentaje que pasa<sup>[1]</sup></b>	
<b>Abertura mm</b>	<b>Designación</b>	$\sum L \leq 10^6$ <sup>[2]</sup>	$\sum L > 10^6$ <sup>[2]</sup>
75	3"	100	100
50	2"	85-100	85-100
37.5	1 1/2"	75-100	75-100
25	1"	62-100	62-100
19	3/4"	54-100	54-100
9.5	3/8"	40-100	40-100
4.75	Nº 4	30-100	30-80
2	Nº 10	21-100	21-60
0.85	Nº 20	13-92	13-45
0.425	Nº 40	8 - 75	8 - 33
0.25	Nº 60	5 - 60	5 - 26
0.15	Nº 100	3 - 45	3 - 20
0.075	Nº 200	0 - 25	0 - 15

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% de espesor de la subbase.

[2] Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 T, esperado durante la vida útil del pavimento.

**Tabla 3.5** Requisitos de granulometría para sub-base.

(SCT N.CMT.4.02.001./11) (IMT<sup>[9]</sup>)

<b>Características</b>	<b>Valor</b>	
	$\sum \leq 10^6$ <sup>[1]</sup>	$\sum > 10^6$ <sup>[1]</sup>
Límite Líquido; % máximo	30	25
Índice plástico; % máximo	10	6
Valor Soporte California (CBR) <sup>[3]</sup> ; % mínimo	50	60
Equivalente de arena <sup>[2]</sup> ; %, máxima	30	40
Desgaste los ángeles <sup>[2]</sup> , máximo	50	40
Grado de compactación <sup>[2,4]</sup> , % mínimo	100	100

[1] Número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 T, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada.

**Tabla 3.6** Requisitos de calidad para sub-base.

(SCT N.CMT.4.02.001./11; IMT<sup>[9]</sup>)

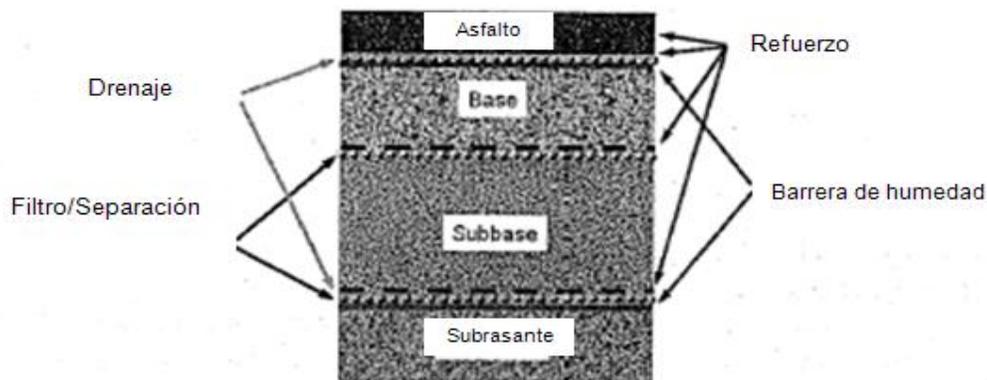
## CAPÍTULO IV

# INVESTIGACIONES DESARROLLADAS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En este capítulo se abordarán los objetivos principales de la investigación, se describirán tres investigaciones desarrolladas por la Tensar Corporation y USACE, relacionadas al refuerzo de suelos mediante el uso de geomallas, todo esto con el fin de conocer que se ha realizado referente a este tópico; una vez conocidas estas investigaciones se expondrá el análisis experimental que dio lugar a este desarrollo. Hablaremos de los materiales que serán empleados, las pruebas a realizar, explicaremos el procedimiento diferenciado de las pruebas comunes que se ejecutarán para nuestra experimentación, se visualizarán los resultados y se realizará un análisis de los mismos, así como se expondrán las conclusiones del análisis expuesto.

### 4.1 Geomallas como Refuerzo de Materiales para Terracerías.

En los geosintéticos, se ha encontrado una mejora importante en la construcción de pavimentos y en el desempeño de los mismos.



**Figura 4.1** Usos potenciales de los geosintéticos.  
(US FHA; 2008 <sup>[16]</sup>)

En la figura 4.1 se muestran las diferentes opciones del uso de los geosintéticos, de los cuales las geomallas pueden proporcionar una resistencia por fricción o trabazón desarrollado entre el agregado y los geosintéticos; puede servir de refuerzo entre la diferentes capas de la estructura del pavimento, y la terracería.

Según el US Army Corps of Engineers “USACE”, existen tres mecanismos de refuerzo, Los tres usos principales de una geomalla en un sistema de pavimento son: (a) servir como una ayuda en la construcción sobre terrenos blandos, (b) mejorar o prolongar la vida útil de servicio proyectada del pavimento, y (c) reducir la sección transversal estructural, para una vida de servicio dado. Las geomallas han sido exitosamente utilizadas para proporcionar una plataforma de construcción sobre superficies blandas (Cancelli en ETL 1110-1-189; 2003, <sup>[18]</sup>).

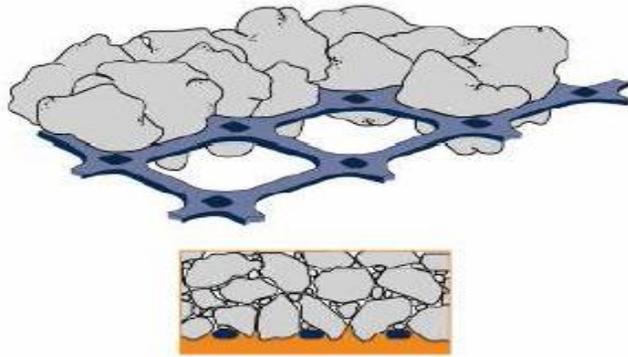
En esta aplicación, la geomalla mejora la capacidad portante para obtener la compactación de los agregados superpuestos, mientras que proporciona la reducción de la cantidad de material necesario para ser retirado y reemplazado. Numerosos programas de investigación tienen resultados donde documentan que la vida de servicio se extiende en las secciones de pavimento con geomallas en comparación con secciones similares sin geomallas.

La investigación ha demostrado que la base requerida para un espesor de diseño dado, puede reducirse cuando una geomalla está incluida en el diseño. Hay un consentimiento relativo de que existen sustanciales beneficios que se puede lograr a partir de la inclusión de las geomallas dentro de los sistemas de pavimentos, sin embargo, su cuantificación es relativa.

Por esta razón, este documento se basa principalmente en los resultados de investigaciones que han sido publicadas por institutos que han desarrollado temas de pavimentos. Los mecanismos de refuerzo fundamentales que implica el uso de geomallas para reforzar los materiales de pavimentos han sido identificados; (a) de sujeción lateral, (b) la capacidad de carga mejorada, y (c) tensado “efecto

membrana” (Perkins; 1999, <sup>[11]</sup>). Las geomallas se han utilizado tradicionalmente en tres aplicaciones de pavimento diferentes:

- (a) la estabilización mecánica de subrasante,
- (b) el refuerzo de base, y



**Figura 4.2** Esquema de interacción entre suelo granular y geomalla biaxial.  
(The Tensar Corporation; 2010<sup>[15]</sup>)

- (c) Refuerzo de concreto asfáltico.

Los geosintéticos tienen una historia de poco más de 30 años de uso, utilizados para la estabilización de subrasantes y terrenos con humedades muy altas y consistencias suaves. Las condiciones del subsuelo que se consideran como óptimas para utilizar geomallas en la construcción de carreteras son:

1. Suelos pobres

Tales como (CLASIFICACION SUCS)

SC, CL, CH, ML, MH, OL, OH AND PT

EN CLASIFICACIÓN AASHTO

A-5, A-6, A-7 Y A-7-6

2. Baja resistencia al corte sin drenaje.
3. Alto nivel freático.
4. Alta sensibilidad (suelos con contracción).

#### **4.1.1 Beneficios Teóricos de Utilizar Geomallas.**

Los beneficios que provocan las geomallas en costo y comportamiento mecánico son las siguientes: (US FHA; 2008, <sup>[16]</sup>).

- 1.- La reducción de la intensidad de la presión sobre la capa de apoyo. (Refuerzo).
- 2.- Prevenir que el agregado de base, penetre en terrenos suaves (Separación).
- 3.- La prevención de la migración de la subrasante hacia arriba en la base (separación y filtración).
- 4.- La reducción de la profundidad de excavación necesaria para la eliminación de materiales blandos, subrasantes y terrenos de cimentación inadecuados.
- 5.- Reducir el espesor del agregado (base) requerido para estabilizar las subrasantes suaves.
- 6.- Permite un aumento en la resistencia de subsuelos suaves con el tiempo.
- 7.- Proporciona un apoyo más uniforme, reduciendo el asentamiento diferencial de las carreteras construidas sobre las condiciones de subsuelos variables, lo que ayuda a mantener la integridad del pavimento y la uniformidad.
- 8.- Reduciendo el mantenimiento, se extiende la vida del sistema de pavimento, y mantiene la integridad en el tiempo de las de capas de base / sub-base; para proyectos de rehabilitación del pavimento en su superficie.

Las geomallas también pueden ayudar de manera significativa cuando se presentan subrasantes con suelos ligeramente pobres de resistencia con valor de

CBR entre 3 y 8 %; pero que contienen una gran cantidad de finos que son sensibles a las variables climáticas.

## **4.2. Diseño de Pavimentos Reforzados con Geomallas.**

A continuación presentamos dos métodos de diseño de pavimentos con refuerzo; el primero de Giroud & Han (J.P. Giroud y el Dr. Jie Han; 2001, <sup>[10]</sup>) para caminos con capa de rodadura de agregados (base); y el segundo para caminos pavimentados del Cuerpo de Ingenieros de Estado Unidos; (USACE; 2003, <sup>[18]</sup>); con el fin de conocer el efecto de las geomallas en la capa de desplante y como refuerzo efectivo de la capa de agregados; además presentamos la investigación que realizó conjuntamente la “USACE” con Tensar International Co (USACE; por Sarah R & Job S.; 2010, <sup>[20]</sup>); sobre el desarrollo de geomallas triaxiales “Triax” de la marca TENSAR.

### **4.2.1 Método de Diseño para Carreteras no Pavimentadas Reforzadas con Geomallas Tensar Desarrollado por el Dr. J.P. Giroud y el Dr. Jie Han**

Hasta hace muy poco tiempo, se venían usando dos métodos de diseño para determinar el espesor de la capa base en caminos no pavimentados y plataformas de trabajo de relleno granular. Giroud y Noiray (1981) desarrollaron el primero de estos métodos “clásicos”. Tensar Corporation (1986) desarrolló el otro. Ambos métodos emplean la teoría de distribución de esfuerzos para calcular la presión vertical sobre la subrasante ejercida por las cargas de ruedas en la superficie del camino. Se calcula el espesor del agregado de la base que hace falta para reducir la presión vertical impartida a la subrasante a un valor igual a su capacidad de carga estimada. El Método de Giroud y Noiray (G&N) supone que la presión del neumático se aplica sobre un área rectangular en la superficie y se distribuye de manera uniforme sobre áreas rectangulares progresivamente mayores con la profundidad.

Las áreas de distribución están definidas por líneas que descienden alejándose de los cuatro bordes de la carga superficial. La pendiente de estas líneas, desde la posición vertical, se llama ángulo de distribución de esfuerzos. El Método Tensar utiliza la teoría de distribución de esfuerzos de Boussinesq para calcular el esfuerzo vertical máximo bajo el centro de un área de carga circular. Ambos métodos consideran la carga por rueda, la presión del neumático y el esfuerzo de corte de la subrasante en los cálculos. Ambos también suponen que el refuerzo del geosintético aumenta efectivamente la capacidad de carga disponible de la subrasante, cambiando el modo de falla de capacidad de carga “local” a “general” Además, el método G&N considera el número de aplicaciones de carga y la profundidad de rodera aceptable.

Sin embargo, ninguno de los dos métodos considera otros factores de importancia, tales como las propiedades de los materiales de la capa base y el refuerzo. Desde principios hasta mediados de la década de 1980, había muy pocos datos de investigación y de campo para facilitar la calibración y la verificación de modelos más complejos que incorporarán estos parámetros. Aunque Giroud y Noiray, así como Tensar, estaban conscientes de la importancia de las propiedades de los materiales de la capa base y el refuerzo, ninguno de ellos tenía suficientes datos de investigación y de campo para permitir su incorporación en los modelos respectivos. En consecuencia, los diseñadores empleaban ambos métodos, aplicando un importante grado de cautela en la selección de los parámetros introducidos. Este enfoque lleva a un desempeño eficaz pero que no producía el diseño más eficiente.

A lo largo de las dos últimas décadas, el uso de geomallas en las aplicaciones para mejorar subrasantes se ha difundido ampliamente. Han sido estudiados en varios programas de investigación. Por lo tanto, hoy por hoy existe un conjunto de información mucho más amplio del que había en la década de 1990. Esta nueva información permitió a los doctores Giroud y Han desarrollar y verificar un método de diseño mejorado. El Método Giroud-Han incorpora la resistencia y el módulo del material del subsuelo (CBR), variaciones de los ángulos de distribución de

esfuerzos a través de la capa de apoyo y la propiedad del módulo de estabilidad de la abertura (rigidez) del refuerzo geosintético, además de todos los parámetros adicionales considerados por el Método G&N. En consecuencia, este método mejorado permite a los diseñadores introducir parámetros más precisos para predecir mejor su comportamiento. A su vez esto lleva a un uso más eficiente de los recursos de agregados, equipos de construcción, mano de obra y tiempo.

### **Fundamento del Método Giroud-Han.**

Al igual que los métodos clásicos de diseño de carreteras reforzadas, el Método Giroud-Han se basa en un modelo teórico. Sin embargo, Giroud y Han calibraron el modelo utilizando los resultados de un programa de investigación especialmente desarrollado por Gabr en 2001 y realizado en North Carolina State University. Este programa de investigación incorporó un número significativo de pruebas de carga de placas cíclicas a gran escala utilizando refuerzo con geomallas Tensar BX1100 y BX1200. La investigación proveyó datos en cuanto a la presión inducida en la subrasante y la deformación de la superficie como función del número de ciclos de carga para combinaciones múltiples del espesor de la base y el refuerzo. Se utilizaron estos datos para calcular el ángulo de distribución de la presión y para cuantificar los efectos del refuerzo y el espesor de la base, tanto en el ángulo de distribución de esfuerzos inicial como en los cambios de ángulo con aplicaciones de cargas acumuladas. Tras la calibración, se verificó el método utilizando los resultados de otros datos de investigación y de campo.

### **Resumen Derivado del Método Giroud-Han.**

El Método Giroud-Han supone un área de contacto circular equivalente a una rueda y un área de presión circular en la subrasante. Por lo tanto, la superficie de distribución de esfuerzos forma un cono en lugar del trapecoide supuesto por el Método G&N. La presión,  $p$ , a cualquier profundidad,  $h$ , es entonces:

$$p = \frac{P}{\pi(r + h \tan \alpha)^2} \quad \dots(\text{Ec. 1})$$

Donde:

P = carga por rueda, r = radio de la huella de rueda equivalente,  $\alpha$  ángulo de distribución de esfuerzos.

La profundidad requerida para distribuir la carga por rueda a una presión igual a la capacidad de carga de la subrasante,  $q = mc_u N_c$  es:

$$h = \frac{1}{\tan \alpha} \left( \sqrt{\frac{P}{\pi m c_u N_c}} - r \right) \quad \dots (\text{Ec. 2})$$

Donde;

$c_u$  = esfuerzo de corte no drenado de la subrasante,

$N_c$  = factor de capacidad de carga de la subrasante y

m = coeficiente de movilización de la capacidad de carga.

$N_c$  se toma como 3.3 para capas de base no reforzadas, 5.14 para las capas de base reforzadas con productos geotextiles, y 5.71 para capas base reforzadas con geomallas Tensar. La selección de los valores de  $N_c$  se basa en la teoría clásica de la capacidad de carga para cimientos superficiales que sugiere que: 1)  $N_c = 2.4$  para una falla de capacidad de carga “local” (modificado a 3.3 basado en resultados de pruebas de campo en capas con base no reforzadas); 2)  $N_c = 5.14$  para un fallo de capacidad de carga “general” donde hay una interfaz lisa (geotextil) entre el apoyo de la cimentación y el suelo; 3)  $N_c = 5.71$  para una falla de capacidad de carga “general” donde hay una interfaz áspera (geomalla Tensar) entre el apoyo de la cimentación y el suelo. El coeficiente de movilización de la capacidad de carga (m) da cuenta del hecho de que sólo parte de la capacidad de carga completa se desarrolla en cualquier profundidad de rodera especificada. Este coeficiente es una función de “r/h” y “s”, la profundidad de ahuellamiento. “m”

varía desde casi 1.0 para bases de agregado relativamente delgadas con una profundidad de ahuellamiento de 3 pulgadas. Es menos de 1.0 para bases de agregado gruesas y/o profundidades de ahuellamiento menores de 3 pulgadas. Se calibra la función utilizando datos de pruebas.

El ángulo de distribución de esfuerzos es mayor a través de una capa base de alto módulo que a través de un material de menor módulo. Giroud y Han relacionaron empíricamente el ángulo de distribución del esfuerzo inicial,  $\alpha_1$ , a través de una base rígida encima de una subrasante más blanda con el ángulo de distribución de esfuerzos,  $\alpha_0$ , a través de un material homogéneo y con la relación de los módulos (o CBR) de la base y la subrasante de la siguiente manera.

$$\tan \alpha_1 = \tan \alpha_0 \left[ 1 + 0.204 \left( \frac{E_{bc}}{E_{sg}} - 1 \right) \right] = \tan \alpha_0 \left[ 1 + 0.204 \left( \frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} - 1 \right) \right] \dots \text{(Ec. 3)}$$

Donde  $E_{bc}$  y  $E_{sg}$  = módulo de la capa base y la subrasante, respectivamente, y  $CBR_{bc}$  y  $CBR_{sg}$  = CBR de la capa base y la subrasante, respectivamente. Se utilizaron datos del programa de investigación de North Carolina State University; para correlacionar el ángulo de distribución de esfuerzos con el número de ciclos de carga,  $N$ , lo cual produjo:

$$\tan \alpha = \frac{\tan \alpha_1}{1 + k \log N} \dots \text{(Ec.4)}$$

Donde;  $k$  = es una constante derivada empíricamente según el espesor de la capa base y la propiedad de refuerzo de la geomalla;  $J$ , el módulo de estabilidad de apertura.

Se calibró el coeficiente de movilización de la capacidad de carga y se combinaron las ecuaciones para llegar a la ecuación 5; diseño para el mínimo espesor requerido de la capa base:

$$h = \frac{1.195 + (0.910 + 0.019J - 1.744J^2) \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5} \log N}{\left[1 + 0.204 \left(\frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} - 1\right)\right]} \left( \sqrt{\frac{P}{13.7 N_c \left(\frac{s}{3}\right) \left[1 - 0.9 \exp\left(-1.426 \left(\frac{r}{h}\right)^{1.5}\right)\right] CBR_{sg}}} - r \right)$$

(Ec. 5)

donde “s” es igual a profundidad de ahuellamiento en pulgadas, “P” es en libras, “h” y “r” son en pulgadas,  $N_c = 3.3$ ,  $J = 0$  para la capa base no reforzada;  $N_c = 5.14$ ,  $J = 0$  para la capa base con refuerzo geotextil;  $N_c = 5.71$ ,  $J = 0.32$  m-N/grado para la capa base reforzada con Tensar BX1100; y  $N_c = 5.71$ ,  $J = 0.65$  m-N/grado para la capa base reforzada con Tensar BX1200.

Basado en un estudio de campo de bases no reforzadas, en la aplicación del método Giroud-Han actualmente se sugiere limitar la relación del módulo  $E_{bc}/E_{sg}$  a un valor máximo de 5.0 para dar cuenta de la incapacidad para compactar el material de la capa base eficazmente sobre subrasantes muy blandas. Esto da el término  $3.48 CBR_{br}^{0.3} / CBR_{sg} \leq 5.0$ . Sin embargo, existe evidencia (Webster, 1993<sup>[19]</sup>) que sugiere que la introducción de un refuerzo rígido de geomallas permite una mejor compactación del material de la capa base.

### Aplicabilidad del Método Giroud-Han.

En teoría, el método Giroud-Han se puede usar con todos los materiales geosintéticos en las aplicaciones para mejorar subrasantes. La validación con otras investigaciones y el desempeño en el campo indican que el método predice con precisión el desempeño de materiales geotextiles y geomallas cuyas propiedades tienen valores que están dentro de la gama utilizada para la calibración del método. No obstante, hay que aplicar una medida de cautela a los resultados obtenidos mediante la aplicación del método a las geomallas cuyas propiedades tienen valores que están fuera de los límites de calibración. Los siguientes párrafos proporcionan pautas en cuanto a propiedades importantes de

las geomallas y la gama de valores representada por las geomallas Tensar utilizadas en la calibración del modelo.

La eficacia de la geomalla en las aplicaciones para mejorar subrasantes depende de varios factores. La geomalla debe tener la capacidad de distribuir cargas eficazmente sobre la subrasante (de manera amplia y pareja). Esto refleja una interacción compleja de geomalla, suelo y base. Mediante una experiencia extensa con esta aplicación y de la investigación pasada (Webster,1993), Tensar ha llegado a la conclusión de que las siguientes propiedades (diagrama 4.1) tienen un impacto en la capacidad de la geomalla para mejorar la subrasante;

<b>Propiedad de la geomalla</b>	Observación	Gama de validación del Método Giroud-Han
<b>Tipo de geomalla</b>	Las geomallas de capa simple (extruidas y tejidas) se colocan fácilmente sin dañar las uniones ni separarse en capas. Los productos de capa simple tienen mejor desempeño que los productos de capas múltiples o tiras soldadas. Los productos de capas múltiples tienden a separarse durante la colocación. Las tiras soldadas tienden a separarse en las uniones durante la colocación.	El Método Giroud-Han fue validado con productos de capa simple.
<b>Módulo de estabilidad de la abertura</b>	La investigación indica fuertemente que esta propiedad captura eficazmente la interacción compleja del módulo de tracción inicial, la rigidez, el confinamiento y la estabilidad. Las geomallas con mayor estabilidad de abertura tienen mejor desempeño.	El Método Giroud-Han ha sido validado para valores de hasta 6.5 cm-kg/grado.
<b>Forma de las costillas</b>	Las costillas cuadradas o rectangulares proporcionan mejor interacción con el suelo y la subbase. Los productos con costillas cuadradas y rectangulares tienen mejor desempeño que los que tienen costillas redondeadas.	El Método Giroud-Han fue validado con productos que tienen costillas rectangulares.

<b>Espesor de las costillas</b>	Las costillas más gruesas proporcionan mejor interacción con el suelo y la base. Los productos con costillas más gruesas tienen mejor desempeño que los que tienen costillas más angostas.	El Método Giroud-Han fue validado con productos con un espesor de costilla igual o mayor a 0.03 pulgadas.
<b>Tamaño de las aberturas</b>	Las aberturas de las geomallas deben ser lo suficientemente grandes como para permitir que los agregados y el suelo penetren a través de ellas, pero lo suficientemente pequeñas como para proporcionar una trabazón eficaz. La investigación indica que una abertura de entre 0.9 y 1.5 pulgadas tiene el mejor desempeño con la mayor parte de las combinaciones de agregados y suelo de las bases para carreteras.	El Método Giroud-Han fue validado con productos cuyas aberturas tenían dimensiones de 0.9 a 1.5 pulgadas en ambos sentidos ( Maquina = MD y Transversal = CM )
<b>Eficiencia de las uniones</b>	La investigación indica que las uniones de las geomallas deben ser lo suficientemente fuertes como para confinar las partículas de la base eficazmente. Las geomallas con mayor eficiencia de unión tienen mejor desempeño.	El Método Giroud-Han fue validado con productos con una eficiencia de unión igual o mayor al 90% de la resistencia máxima a la tracción.

**Diagrama 4.1** Conclusiones de Tensar sobre el impacto de geomallas.

### **Resumen:**

El método Giroud-Han tiene base teórica y calibración empírica; y produce predicciones precisas del desempeño en el campo para condiciones de carga y propiedades de base y subrasante similares, así como para las geomallas específicas utilizadas en la calibración y validación del modelo.

#### **4.2.2 Método de Diseño para Carreteras Reforzadas con Geomallas US Army Corps of Engineers. ETL-1110-1-189.**

Las geomallas en carreteras pavimentadas pueden tener dos aplicaciones en ellas: estabilización de subrasante (subsuelo) y el refuerzo mecánico en la capa de agregados de la base. La aplicación es predeterminada por la resistencia del suelo de apoyo, el tipo de geosintético recomendado para construir sobre condiciones de terreno natural muy suave, por lo general sirven para estabilizar mecánicamente.

En las tablas 3.1 y 3.2 se establecen los requisitos mínimos para las especificaciones en geomallas biaxiales. A continuación describiremos el método reportado en el documento ETL-1110-1-189 de "USACE".

1.- El primer paso en el diseño de un sistema de pavimento reforzado eficaz, es determinar las propiedades de la subrasante o terreno natural, incluyendo la distribución de tamaño de partículas, límites de Atterberg, y en la resistencia al corte en situ, resistencia o capacidad de soporte. La resistencia al corte en situ se puede medir directamente usando dispositivos de corte (veleta) o indirectamente mediante correlaciones de capacidad de carga; California Bearing Ratio (Valor de Soporte California, CBR) ó pruebas de Cono Dinámicas Penetrómetro (DCP).

La resistencia de diseño de la subrasante se define como el esfuerzo a 18 pulgadas (45 cm) de la parte superior, en el 75% de la capa subrasante. El valor de la resistencia del 75%, se presenta cuando el 75% de las lecturas de resistencia reportadas del suelo son superiores a ese valor.

La Figura 4.3 puede ser usada para convertir resistencias de diseño de los valores de índice de cono y de CBR a esfuerzo cortante (C) en psi.

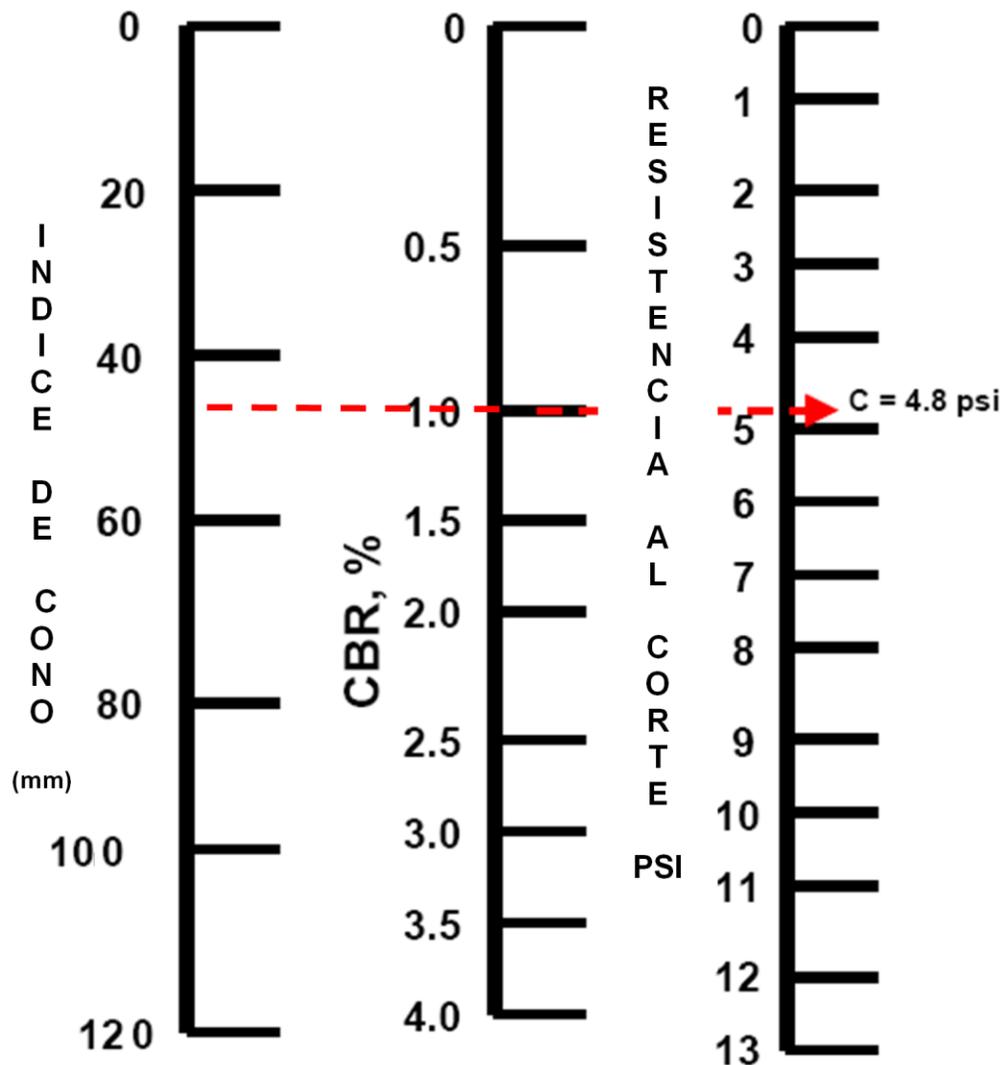


Figura 4.3 Relaciones entre índice de Cono, CBR y resistencia al corte (C).

### Evaluación de la aplicabilidad de geosintéticos en caminos no pavimentados.

- Terreno natural con CBR < 0.5. Para el diseño con CBR de 0.5 o menos, la principal aplicación es la estabilización mecánica. El uso de un geotextil no tejido se recomienda para la separación, y una geomalla biaxial se recomienda para el refuerzo en el subsuelo y en la subrasante. Con materiales de resistencias bajas, todo el espesor del relleno con agregado se debe utilizar y no se recomienda reducir el espesor de la capa de base.

Así, el diseño del espesor debe ser total y debe ser utilizado para resistencias de terrenos naturales con CBR de 0.5 ó menos. La tela no tejida, se coloca directamente sobre el suelo, seguido de la geomalla y luego el relleno de subrasante/sub-base/base. La plataforma de construcción diseñada sirve como un puente sobre el material muy blando, y es un agente coadyuvante a la compactación para la obtención de densidades mayores en las capas superiores y lograr una construcción conveniente.

- Terreno natural con  $0.5 < \text{CBR} < 2.0$ . Para el diseño con resistencias con CBR de 0.5 a 2.0, tanto la estabilización mecánica como el reforzamiento son útiles. Un geotextil no tejido se recomienda para la separación con resistencias de CBR de 2.0 o menos. El uso de una geomalla biaxial para el refuerzo también es generalmente rentable con CBR como estos, en términos de ahorro. Así, para este nivel de resistencia, tanto un geotextil y geomalla se recomienda en general, y el espesor total se puede reducir usando el apropiado factor de capacidad de soporte reforzado, presentado en el método de diseño de más adelante.
  
- Terreno natural con  $2.0 < \text{CBR} < 4.0$ . El uso de un geotextil no tejido para la separación es generalmente recomendado para las subrasantes de partículas finas y con terrenos naturales con valores de CBR mayor que 2 pero menor a 4. Un geotextil no tejido también se debe utilizar para la separación cuando el diseñador ha experimentado problemas de separación con los materiales de construcción durante los proyectos de ejecuciones anteriores. Para diseño con valores de CBR entre 2.0 y 4.0, la principal aplicación es el refuerzo en la subrasante o la base. Sin embargo, la relación costo-beneficio en la utilización de una geomalla en estas consistencias, debe ser determinada mediante la realización de un análisis del costo del ciclo de vida de la vialidad. La investigación ha indicado que la vida de servicio del pavimento se extiende con estas resistencias y un

gran potencial de reducir el espesor de la base en pavimentos de superficie asfáltica se puede dar. Sin embargo, existe escasa información para pavimentos reforzados con estas resistencias de terreno natural para definir con precisión los beneficios en espesores, así como un factor de capacidad. Por lo que se recomienda basado en la suposición, de que el geotextil sirve para separar los diferentes materiales de pavimento y proporciona un refuerzo ligero o nulo.

- Terreno natural con CBR > 4.0. La investigación ha indicado que existe un potencial significativo con el refuerzo en estos valores de resistencia, sin embargo cuantificar los beneficios aun no es concluyente. La principal aplicación de la geomalla en estos valores de resistencia es el refuerzo en capas de agregados, sub-bases y bases. Debe realizarse una investigación adicional que lleve a cabo un análisis de costo del ciclo de vida del pavimento, y así poder llevar a cabo la viabilidad económica con refuerzo de geomalla, y con ello utilizar los procedimientos de diseño descritos en este documento.

### **Procedimiento del diseño de caminos no pavimentados.**

1.- Determinación de la resistencia al corte del suelo (C). El primer paso esencial en el diseño de una superficie de agregados (camino sin pavimentar); es determinar las condiciones de diseño del terreno natural. Las condiciones de diseño del suelo de desplante, se pueden determinar usando ensayos de CBR de campo, ensayos de corte con veleta, ensayos de cono, o ensayos de CBR saturado en laboratorio.

Una vez que las condiciones de diseño del terreno han sido determinadas, una evaluación de la aplicabilidad de geosintéticos debe llevarse a cabo utilizando las indicaciones del apartado anterior y la resistencia del suelo. Si el uso de un geotextil y/o geomalla se justifican en base a la evaluación de la aplicabilidad, el siguiente procedimiento se puede utilizar para diseñar la carretera con superficie de agregados (capa de base), de lo contrario los procedimientos comunes deben utilizarse para diseñar la carretera no pavimentada. Si el uso de un geotextil y/o

geomalla se justifica, la resistencia del suelo debe ser convertido del CBR a la resistencia al corte (C). La resistencia al corte (C) se puede determinar utilizando la figura 4.3 con pruebas de índice de cono o CBR. La resistencia al corte (C) también se puede medir directamente usando dispositivos de corte, como veleta.

2.- Determinar tráfico de diseño. El siguiente paso es determinar el tráfico de diseño; el diseño de tráfico debe basarse en la configuración del vehículo más pesado de la composición del tránsito, ya sea que se defina como una carga de una sola rueda, una carga de doble rueda, o cargas de ruedas en tándem.

El peso combinado del mecanismo seleccionado, se utiliza como el peso del vehículo de diseño. Por ejemplo, utilizar la mitad de la carga del eje de una o dos ruedas de vehículos con un solo eje. Para vehículos de varios ejes, se usa un medio de la carga total sobre los dos ejes más cercanos y más pesados. La Tabla 4.1 proporciona valores típicos del tráfico de carga para vehículos del ejército de Estados Unidos de America. El espesor total de diseño presentado en este procedimiento se basa en el desarrollo de roderas de dos pulgadas (5 cm) después de 1,000 pasadas de un carga por eje equivalente de 18 Kips. (Kilo libras) El espesor total debe aumentar en un 10 por ciento para un diseño de 2,000 pasadas y 20 por ciento para diseño de 5,000 pasadas. Un aumento adicional del 10 por ciento en el diseño espesor total debe ser añadido para el tráfico HET (Transito Pesado de Construcción) para dar cuenta de la acción abrasiva de múltiples cargas por ruedas pesadas.

<b>Cargas de tránsito de vehículos militares típicas.</b>				
<b>Tipo de Vehículo</b>	<b>Peso total del vehículo Lb</b>	<b>Carga por Diseño de la Rueda <sup>1</sup>, Lb</b>		
		<b>Rueda sencilla</b>	<b>Rueda Dual</b>	<b>Tandem</b>
M54A2C, 6 x 6, 5-Ton Cargo Truck	40,200	5,000	--	16,000
M929A1, 6 x 6, 5-Ton Dump Truck	35,065	6,000	--	12,000
M1062, 4 x 4, Semitrailer Fuel Truck	64,600	--	--	34,000
M172A1, 4 x 4, 25-Ton Semitrailer	66,600	--	--	42,000
M872A1-3, 6 x 6, 34-Ton Semitrailer	86,440	--	--	57,000
M870, 6 x 6, 40-Ton Semitrailer	96,000	--	--	57,000
M747, 8 x 8, 60-Ton HET Semitrailer	152,000	--	--	27,000
M1000, 8 x 8, 70-Ton HET Semitrailer	190,400	--	--	37,000
621E, 14-18 cu. yd. Caterpillar Scraper	115,195	32,000	--	--
RTCH, 50,000 lb	166,800	69,000	--	--

[1] Cargas por diseño de ruedas para carreteras con refuerzo de geosintéticos. Utilice 1/2 del máximo de una sola rueda o rueda doble del eje de carga. Para ejes múltiples, utilice 1/2 del total de la carga más pesada sobre los 2 ejes adyacentes; y trate como una carga de ruedas en tándem.

**Tabla 4.1** Cargas de tránsito de vehículos típicos militares.

3.- Determinar el factor de capacidad portante reforzada (Nc). Tanto los factores de capacidad de soporte no reforzada y reforzada se determinaron utilizando datos empíricos de gran escala ERDC (Equipo de Carga Simulada) de secciones de prueba. El factor de capacidad portante NO reforzada (Nc) es de 2,8. El factor de capacidad con refuerzo utilizando solo geotextil es de 5,0. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que este factor debe ser reducido a aproximadamente 3,6 para diseños conservadores. El factor de capacidad Nc, cuando se usa un geotextil separador y geomalla de refuerzo es 5,8. No existen datos suficientes para determinar un valor de Nc; para refuerzo con solo geomalla. En ausencia de datos suficientes, una Nc de 5,8 se recomienda con base en criterios técnicos de observación de geotextiles y geomallas que refuerzan las secciones de pavimento. Esto supone que el geotextil sirve como un tejido de separación dando como beneficio poco refuerzo. Los factores de capacidad se resumen en la Tabla 4.2 de acuerdo a las condiciones del subsuelo.

**Factores de capacidad de carga reforzada,  $N_c^1$ , para pavimentos con superficie de agregados (BASE)**

**Paso 1: Determinar la resistencia de diseño del subsuelo y la aplicabilidad de los geosintéticos.**

<b>CBR ≤ 0.5</b>	<b>0,5 &lt; CBR ≤ 2.0</b>	<b>2,0 &lt; CBR ≤ 4.0</b>	<b>CBR &gt; 4.0</b>
Use un geotextil y una geomalla en la interfase del subsuelo y la base. La reducción del espesor de la base no se recomienda. Utilice TM 5-822-12 para el diseño de los espesores.	Tanto una geomalla y un geotextil son recomendados. Utilice este procedimiento de diseño para el cálculo del espesor total con reducción. <u>Geotextil</u> = 5.0 <sup>3</sup> <u>Geomalla</u> = 5.8 <u>Ambos</u> <sup>2</sup> = 5.8	Un geotextil se requiere para subsuelos finos. La geomalla también puede ser rentable. Llévase a cabo de análisis de costos. <u>Geotextil</u> = 5.0 <sup>3</sup> <u>Geomalla</u> = 5.8 <u>Ambos</u> = 5.8	Realizar un análisis de costos. Considere los beneficios "No establecidos". La escasez de datos NO está disponible para determinarlos.

[1] El factor de capacidad de soporte sin refuerzo,  $N_c$ , es 2,8.

[2] Tanto un geotextil y una geomalla se recomiendan. El geotextil sirve principalmente como una separación.

[3] Utilice un factor de 3,6 para diseños de pavimentos reforzados con geotextiles conservadores.

**Tabla 4.2** Resumen de valores de  $N_c$ ; para distintas situaciones de CBR.

4.- Por último, determinar el espesor total requerido, el espesor total se determina utilizando las figuras 4.4 a 4.6 para una sola rueda, rueda doble y equipo de ruedas de carga en tándem, respectivamente. La capacidad de soporte del subsuelo ( $CN_c$ ) se determina multiplicando la resistencia al corte (C) en psi por el factor de capacidad de soporte apropiado ( $N_c$ ). La curva de diseño apropiada, de las figuras 4.4. a 4.6, se introduce con la capacidad del terreno natural ( $CN_C$ ) del valor en el eje "X". Una línea vertical se traza desde la capacidad de soporte del terreno natural a la curva de diseño adecuado del peso. Una línea horizontal se proyecta desde ese punto de intersección con el espesor total requerido en pulgadas en el eje "Y". La suma requerida del espesor total de caminos sin pavimentar deberá redondearse a la pulgada más alta siguiente. El espesor requerido de agregado para la condición no reforzada siempre se determinará con  $N_c$  de 2.8 como una base para comparar los ahorros relativos de la propuesta de diseño reforzado. El diseño reforzado entonces debe calcularse utilizando el  $N_c$  apropiado dependiendo del tipo de refuerzo recomendado, como se muestra en la

Tabla 4.2. El espesor mínimo total es de 6 pulgadas recomendado para caminos sin pavimentar.

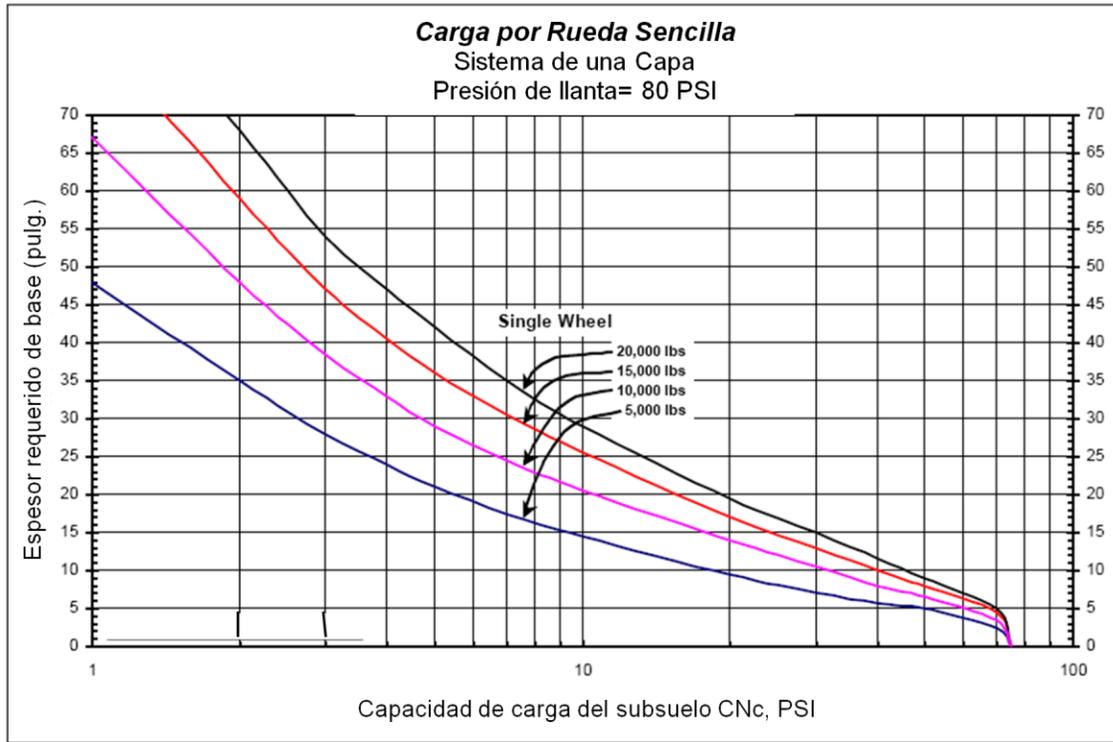


Figura 4.4 Diseño de pavimentos para cargas de rueda sencilla. (Capa de rodadura de base)

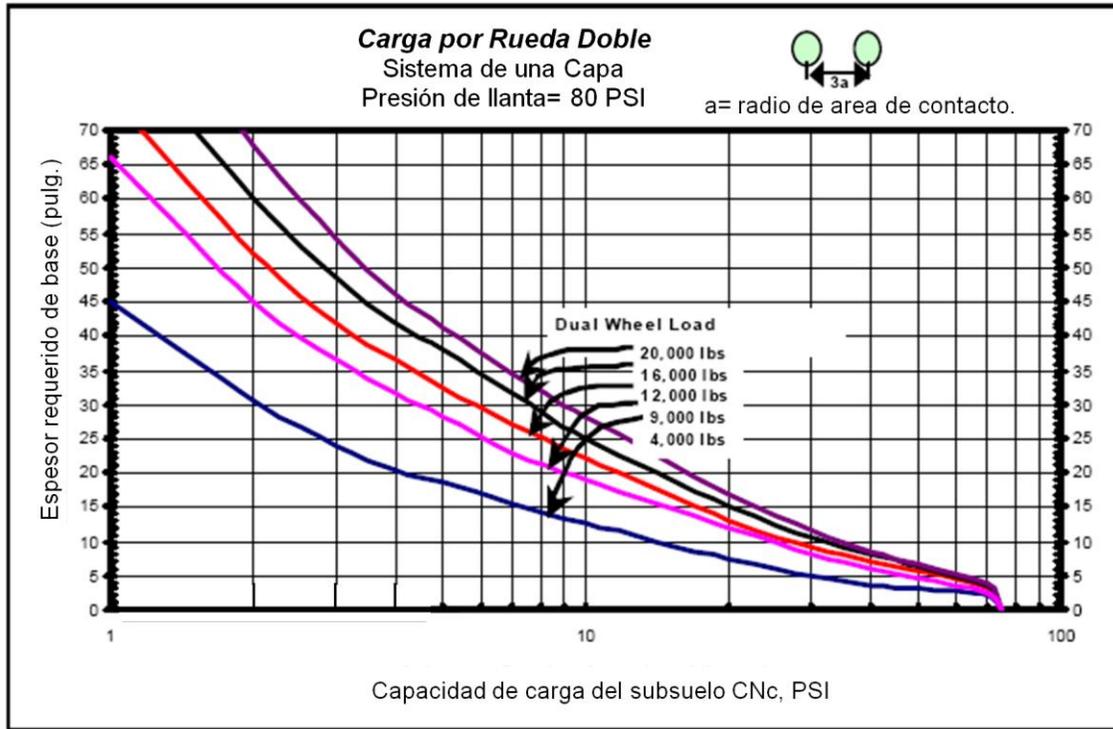


Figura 4.5 Diseño de pavimentos para cargas de rueda doble. (Capa de rodadura de base)

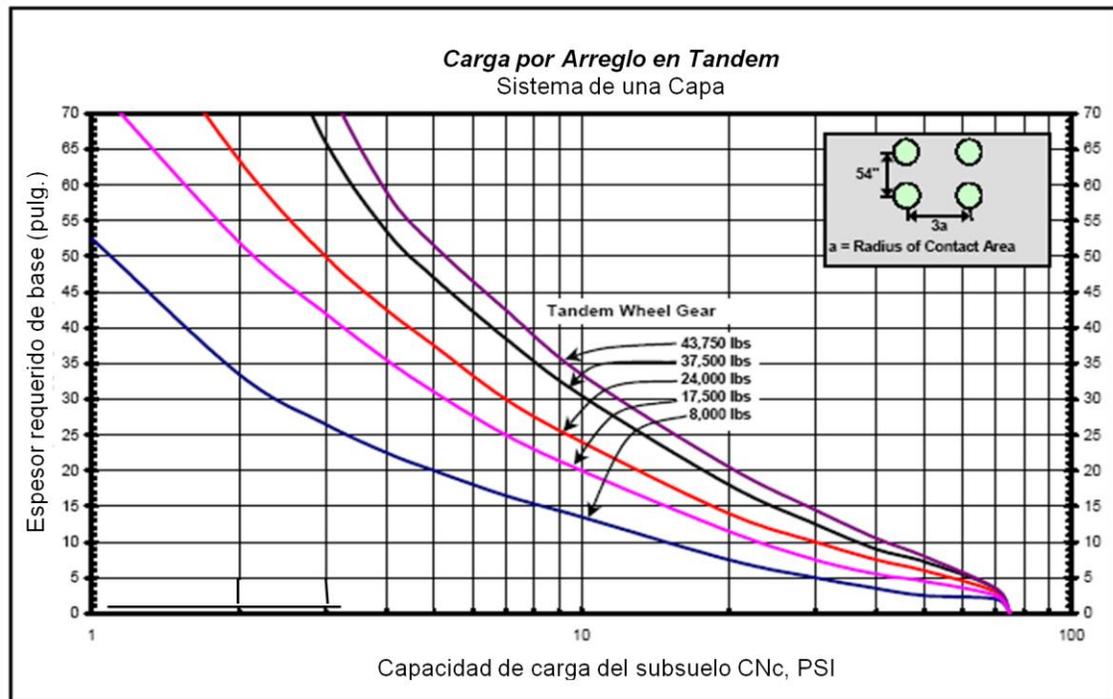


Figura 4.6 Diseño de pavimentos para cargas de ruedas en tándem. (Capa de rodadura de base)

### **Diseño de pavimentos flexibles con refuerzo de geomalla.**

Las geomallas pueden utilizarse para llevar a cabo tanto la estabilización mecánica en subrasante o terreno natural o bien como refuerzo de la capa de base en pavimentos flexibles. Al igual que el diseño del pavimento sin capa de rodadura, la aplicación suele ser predeterminada por la resistencia del suelo subrasante o terreno natural. Las diferentes combinaciones de geosintéticos son recomendados para su uso en pavimentos flexibles basados en las condiciones del suelo de desplante. Los geosintéticos utilizados para construir carreteras sobre condiciones de desplante con suelos muy blandos, típicamente sirven para estabilizar mecánicamente la subrasante. A medida que la subrasante aumenta su resistencia, la aplicación principal de los geosintéticos en su diseño, transita de la estabilización mecánica a la de refuerzo de la capa de base.

### **Evaluación de aplicabilidad de geosintéticos para diseño de pavimentos flexibles**

- Suelo de desplante con  $CBR < 0.5$ . La principal aplicación es la estabilización mecánica del suelo de desplante. Con estas resistencias, se recomienda que la plataforma de construcción este diseñada para facilitar la construcción del pavimento flexible. La plataforma de construcción debe ser diseñada usando los procedimientos descritos en la sección pasada; (Procedimiento del diseño de caminos no pavimentados). El diseño de la plataforma de construcción servirá como la base de apoyo para el sistema de pavimento flexible.
  
- Suelos de desplante  $0.5 < CBR < 4.0$ . Las aplicaciones de refuerzo y estabilización en base y terreno natural respectivamente son viables. Un geotextil no tejido se recomienda para la separación de las sub-bases o subrasantes con suelos de desplante con CBR menor a 4.0; y el uso de una geomalla de refuerzo debe ser considerado. Así, para este nivel de resistencia en los suelos de desplante tanto un geotextil y una geomalla pueden ser justificados, y el espesor del material de agregados de la capa

de base puede ser reducido utilizando empíricamente la equivalencia de pavimento reforzado del gráfico de Webster (Figura 4.7); que se presenta en la sección de diseño del procedimiento siguiente.

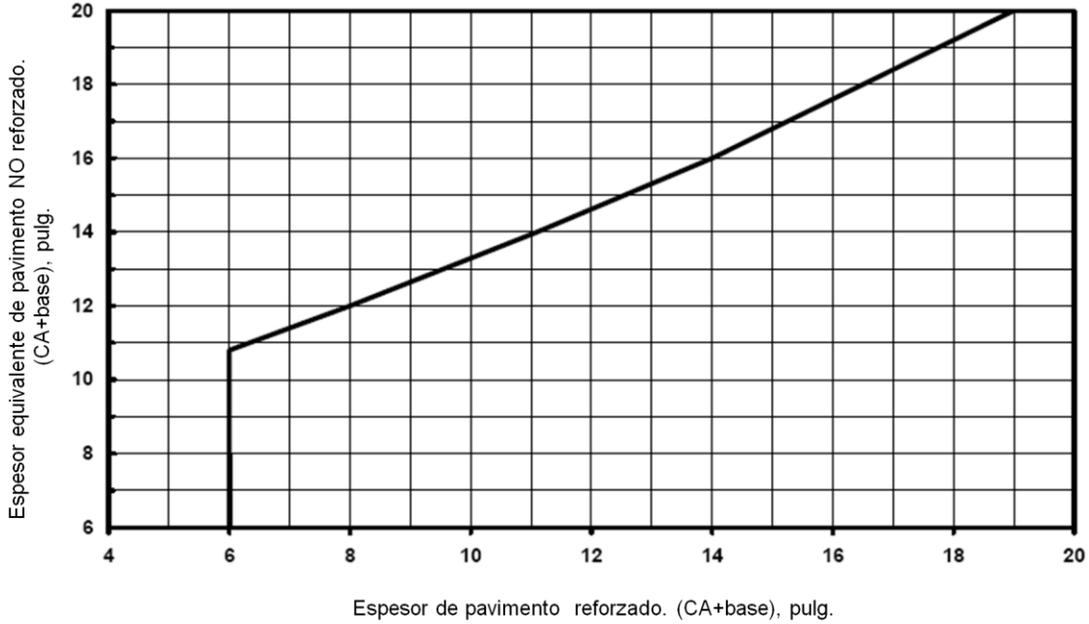
- Suelos de desplante con  $4.0 < \text{CBR} < 8.0$ . Un geotextil separador no es recomendable a menos que el diseñador haya tenido problemas con la separación de materiales de construcción durante la ejecución de los trabajos. Para el diseño con CBR entre 4.0 y 8.0, la principal aplicación de la geomalla es de refuerzo de la base. La investigación tiene indicados extensiones considerables en la vida de servicio del pavimento; y un gran potencial para reducir el espesor de la base. Por lo tanto, el diseñador debe utilizar el espesor del pavimento reforzado Webster; con la tabla de equivalencia de la Figura 4.7; para determinar el espesor requerido del pavimento armado. Un análisis de costo del ciclo de vida se debe realizar para determinar la rentabilidad de la inclusión de la geomalla como refuerzo.
- Suelos de desplante con  $\text{CBR} > 8.0$ . Un separador de geotextil no es recomendable a menos que antes se hayan observado problemas con la separación de los materiales de construcción específicos. La principal aplicación de la geomalla es el refuerzo. Estos suelos de desplante con resistencias tales, se encuentran fuera de la base de datos utilizada para desarrollar el espesor del pavimento reforzado de Webster.

El procedimiento alternativo de diseño reforzado consiste en los resultados de unas secciones de prueba. Esto se puede lograr definiendo el factor de reducción de la base o en inglés (BASE COURSE REDUCTION “BCR”); esto es, el espesor de la base reforzada dividida por el espesor de la base no reforzada para un nivel de tráfico dado. El espesor requerido de agregados reforzados de la base es calculada usando la ecuación 6; con el espesor de la carpeta asfáltica (CA).

$$t_{(base\ reforzada)} = t_{(basenoreforzada)} * BCR \dots\dots\dots (Ec. 6)$$

Este factor BCR se determina empleando los materiales y las condiciones frecuentes de la construcción de pavimentos.

**Diseño de Pavimentos Reforzados de Webster**



**Figura 4.7** Grafico de espesor de equivalencia reforzado de Webster.

**Paso 1: Determinar la resistencia de diseño del subsuelo y la aplicabilidad de los geosintéticos.**

CBR ≤ 0.5	0.5 < CBR ≤ 4.0	4.0 < CBR ≤ 8.0	CBR > 8.0
Use un geotextil y una geomalla en la interfase del subsuelo y la base. La reducción del espesor de la base no se recomienda.	Un geotextil se requiere para subsuelos finos. La geomalla también puede ser rentable. La geomalla puede ser evaluada con diseño reforzado.	Un geotextil no se recomienda a menos que la experiencia previa haya observado problemas de separación. Diseñar con y sin refuerzo.	La resistencia del subsuelo excede la base de datos existente. No utilice este procedimiento de diseño. Considere el uso de un factor de reducción de base (BCR).

**Tabla 4.3** Aplicabilidad de geosintéticos usados en pavimentos flexibles.

### **Procedimiento de diseño para pavimentos flexibles.**

1.- Determinar las propiedades de las capas del pavimento. El primer paso en el diseño de un pavimento flexible reforzado es determinar las condiciones del terreno de desplante como se indica en la sección pasada de este mismo punto. Una vez que las condiciones de diseño se han determinado, una evaluación de la aplicabilidad de los geosintéticos debe llevarse a cabo utilizando la orientación que se expuso anteriormente, y que se resume en la tabla 4.3. Si el uso de un geotextil y/o geomalla se justifica en base a la evaluación de la aplicabilidad, el siguiente procedimiento se puede utilizar para diseñar el pavimento flexible reforzado, de lo contrario los procedimientos descritos como el Manual Técnico TM 5-822-5 de la USACE <sup>[17]</sup>, debe ser utilizado para diseñar un pavimento flexible no reforzado (en México cualquier otro método). El CBR del suelo de desplante se puede determinar utilizando la figura 4.3 en base a cualquiera de los dos índices de cono o resistencia al corte (C). La resistencia al corte (C) se puede medir directamente usando dispositivos de corte.

Cada capa de agregado, base y subbase (si se utiliza), en el sistema de pavimento flexible debe cumplir requisitos de resistencia y granulometría definidos en la Norma TM 5-822-5. Los requisitos de materiales para la superficie de asfalto se definen en la Norma TM 5-822-8 de la USACE <sup>[17]</sup>.

2.- Determinar el tráfico de diseño. El siguiente paso es determinar el valor del tráfico de diseño. El diseño del tráfico debe ser determinado de acuerdo con el Manual TM 5-822-5 de USACE <sup>[17]</sup>, lo que resulta en un índice de diseño (DI). El índice de diseño combina el efecto del promedio de las cargas de los ejes de los vehículos y el volumen de tráfico previsto expresado por clasificación de las carreteras. El índice de diseño va de 1 a 10 con el fin de aumentar tráfico de carga y volúmenes. El índice de diseño se selecciona utilizando la Tabla 4.4.

<b>Índice del diseño del pavimento <sup>1</sup></b>						
<b>Categoría del tránsito. <sup>2</sup></b>	<b>Índice de diseño por clase de carretera</b>					
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
I	2	2	1	1	1	1
II	3	2	2	2	2	1
III	4	4	3	3	3	2
IV	5	5	4	4	4	3
IVA	6	6	5	5	5	4
V (60 kilolibras (kip) Vehículos de caminos ó 15-Kip montacargas.	7	7	7	7	7	-- 4
500 /día	6	6	6	6	6	-- 4
200 /día	6	6	6	6	6	6
100 /día	6	6	6	5	5	5
40 /día	5	5	5	5	5	5
10 /día	5	5	5	5	4	4
1 /día	5	5	5	4	4	4
VI (90-Kip vehículos de caminos ó 25-Kip montacargas.						
200 /día	9	9	9	9	9	-- 4
100 /día	8	8	8	8	8	8
40 /día	7	7	7	7	7	7
10 /día	6	6	6	6	6	6
4 /día	6	6	6	6	6	6
1 /día	5	5	5	5	5	5
1/semana	5	5	5	4	4	4
VII (120-kip vehículos de caminos						
100 /día	10	10	10	10	10	0
40 /día	9	9	9	9	9	9
10 /día	8	8	8	8	8	8
4 / día	7	7	7	7	7	7
1 día	5	6	6	6	6	6
1/semana	5	5	5	5	5	5

[1] Tabla 3-1 extraído de TM 5-822-5 para mayor claridad.

[2] Categoría de tránsito definido en TM 5-822-5, Capítulo 3.

[3] Clase de camino definido en TM 5-822-2, Capítulo 5.

[4] Tránsito limitado a 100 vehículos por día.

**Tabla 4.4** Índice de tráfico para diseño de pavimentos.

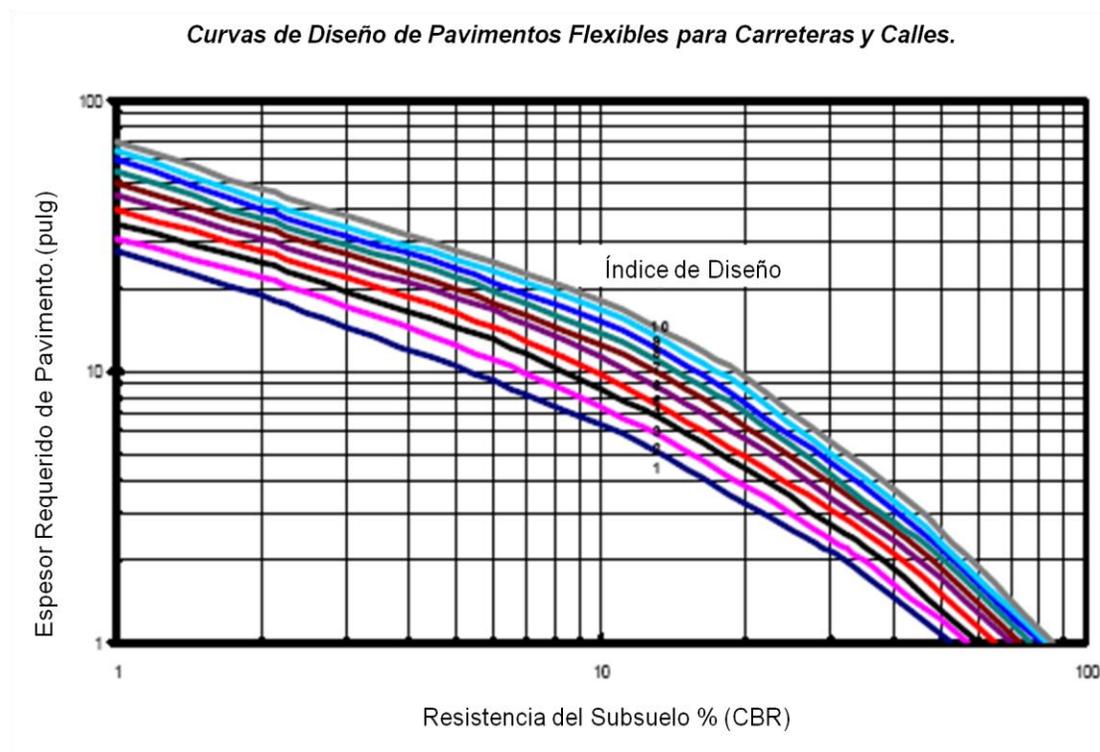
3.-Determinar los espesores requeridos de las capas. El siguiente paso es el diseño de un pavimento flexible NO reforzado para las condiciones dadas del suelo de desplante. El CBR de diseño es determinado de acuerdo con los métodos presentados anteriormente. En la figura 4.8; se introduce el apropiado CBR de la capa de soporte, ya sea la resistencia de la capa de terreno natural (suelo de desplante) o en su caso la subrasante.

El espesor del pavimento requerido por encima de la capa de soporte se determina trazando una línea vertical, desde la resistencia en el eje “X”; hasta la intersección del índice de diseño. Se traza una línea horizontal y se proyecta desde la intersección; el espesor requerido del pavimento esta dado en el eje “Y”.

El espesor del pavimento requerido debe ser redondeado a los próximos 0.5 pulgadas, constante para construcción de pavimentos flexibles. La Tabla 4.5 presenta los valores mínimos del espesor de la superficie del concreto asfáltico y de la base. En general, un espesor de asfalto de 3 pulgadas o menos es apropiado para el índice de diseño con valores de 7 o menos. El espesor mínimo requerido de la capa de base es 4 pulgadas. La estructura del pavimento definitivo se determina usando el mínimo espesor de la carpeta asfáltica; para la resistencia del agregado disponible como se indica en la Tabla 4.5. La diferencia entre el espesor del pavimento total requerido por encima del suelo de desplante, subrasante (determinado a partir de la Figura 4.8) y el espesor mínimo de la carpeta (determinado a partir de la Tabla 4.5) es la diseño del espesor del agregado del pavimento flexible.

El espesor de la base reforzada se determina usando el diagrama de Webster; para los espesores de pavimento de la tabla de equivalencia que se muestra en la Figura 4.7. Entrando en el gráfico con el espesor del pavimento flexible sin refuerzo, se traza una línea hasta la intersección de la curva de equivalencia. Una segunda línea se dibuja desde la intersección con la curva de equivalencia al espesor del pavimento flexible reforzado con geomalla. El espesor de la base reforzada, se determina restando el espesor mínimo de CA en la Tabla 4.5; del espesor equivalente del pavimento flexible reforzado.

Por último, el espesor de la capa de base reforzada reemplaza el espesor de la base de diseño de pavimentos no reforzada. Todos los demás espesores son los mismos. Tenga en cuenta que la Figura 4.7 sólo es válido para valores de espesor de capa de CA de 3 pulgadas o menos. La geomalla es colocada en la interfaz subrasante/base ó suelo de desplante/base para espesores de base menores de 14 pulgadas y en el medio de la capa de base con espesor mayor a 14 pulgadas.



**Figura 4.8** Curvas de diseño de pavimentos flexibles para carreteras y calles.

<b>Espesor mínimo de capas de pavimento<sup>1</sup></b>									
<b>CBR MÍNIMO DE LA BASE</b>									
	<b>100</b>			<b>80</b>			<b>50<sup>2</sup></b>		
<b>Índice de diseño</b>	<b>Pavimento (pulg.)</b>	<b>Base (pulg.)</b>	<b>Total (pulg.)</b>	<b>Pavimento (pulg.)</b>	<b>Base (pulg.)</b>	<b>Total (pulg.)</b>	<b>Pavimento (pulg.)</b>	<b>Base (pulg.)</b>	<b>Total (pulg.)</b>
1	ST <sup>3</sup>	4	4.5 <sup>5</sup>	MST <sup>4</sup>	4	4.5 <sup>5</sup>	2	4	6
2	MST <sup>4</sup>	4	5 <sup>5</sup>	1.5	4	5.5 <sup>5</sup>	2.5	4	6.5
3	1.5	4	5.5 <sup>5</sup>	1.5	4	5.5 <sup>5</sup>	2.5	4	6.5
4	1.5	4	5.5 <sup>5</sup>	2	4	6	3	4	7
5	2	4	6	2.5	4	6.5	3.5	4	7.5
6	2.5	4	6.5	3	4	7	4	4	8
7	2.5	4	6.5	3	4	7	4	4	8
8	3	4	7	3.5	4	7.5	4.5	4	8.5
9	3	4	7	3.5	4	7.5	4.5	4	8.5
10	3.5	4	7.5	4	4	8	5	4	9

[1] Tabla 6-1 extraída de TM 5-822-5, Capítulo 6.

[2] En general, las capas de base con 50 de CBR se utilizan solamente para carretera clases E y F.\*

[3] Tratamientos superficiales con asfalto (aplicación de spray).

[4] Tratamientos de superficie múltiples con asfalto.

[5] Esesor total mínimo de pavimento de carretera clases A a D\* es de 6 in.

\* Tipo de carreteras del manual TM 5-822-5<sup>[17]</sup>

**Tabla 4.5** Espesores mínimos de capas de pavimento.

### **4.2.3 Geomallas Triaxiales (TRIAX TENSAR).**

De la publicación “Pruebas aceleradas a escala real” de Pavimentos de asfalto delgados reforzados con geomalla. Fase 1, Informe Provisional de US ARMY CORPS por Sarah R. Jersey, and Jeb S Tingle; (USACE; 2010, <sup>[20]</sup>); Donde se expone una investigación de pruebas sobre las nuevas geomallas triaxiales de la marca Tensar.

Esta investigación sirve para dos propósitos principales, (1) la obtención de datos de la respuesta del pavimento, y (2) la cuantificación de los beneficios de refuerzo de la geomalla en la interfase base/subrasante en una estructura de pavimento con superficie de asfalto. Como parte del estudio, los datos del mecanismo de respuesta se obtuvieron a partir de secciones de pavimento, incluyendo diversos elementos de ensayo con secciones no reforzadas y reforzadas, para la validación de modelos de rendimiento y modelos de diseño desarrollados por Tensar Corporation; para sus productos de geomalla. La fase 1 del estudio fue diseñado para proporcionar una validación del comportamiento del rendimiento de geomalla Tensar TriAx relativo a dos secciones de control no reforzada, y puede servir como validación del protocolo de diseño desarrollado y utilizado por Tensar International Corporation; para el diseño de pavimento con geomalla TriAx.

Además, dos prototipos de geomallas adicionales fueron probados en este estudio. Para lograr esto, una sección de ensayo a gran escala fue construida, conteniendo cinco elementos de prueba diferentes. Todos los elementos de ensayo representan una estructura de pavimento diferente. Cada tema se trata con el tráfico de camiones, simulada y aplicada a través de la ERDC (Equipo de Carga Simulada); Simulador de Vehículos Pesados (HVS).

#### **Plan de pruebas y diseño de sección de pruebas.**

La sección de ensayos constaba de cinco elementos de prueba diferentes. Cada elemento de la prueba fue de 50 pies de largo y 8 pies de ancho. Una vista en planta de la sección de prueba se muestra en la figura 4.9. Los elementos de prueba fueron construidos al mismo tiempo y con amplias medidas de control de

calidad para minimizar variabilidad entre y/o dentro de los distintos elementos de la prueba.

El diseño estructural de la sección de prueba se ha desarrollado siguiendo las pautas establecidas en la guía de diseño AASHTO 1993 (AASHTO; 1993, [2]). El diseño fue desarrollado utilizando las herramientas y las tablas proporcionadas en la 2ª edición de Análisis y Diseño de Pavimentos de Huang del 2004, en USACE; 2010<sup>[20]</sup>. El diseño estructural del pavimento se basa en un número representativo estructural de 2.0 para un pavimento no reforzado de bajo volumen.

Estos cálculos suponen una fiabilidad para caminos de bajo volumen de 50%, y un cambio en la capacidad de servicio de 2.2. La baja fiabilidad representa un 50% de probabilidad de fallo en el nivel de carga de diseño, que es deseable en el diseño de una sección de ensayo. Es crítico que el diseño del pavimento no sea conservador para asegurar el fallo del pavimento dentro de un número razonable de ciclos de carga, que proporciona datos útiles de desempeño. Un cambio en la vida de servicio es de 2.2 asumido un índice de servicio inicial de 4.2, de acuerdo con las condiciones iniciales para un pavimento flexible, y una capacidad de servicio terminal de 2.0, como se sugiere por la AASHTO para vías de volumen bajos.

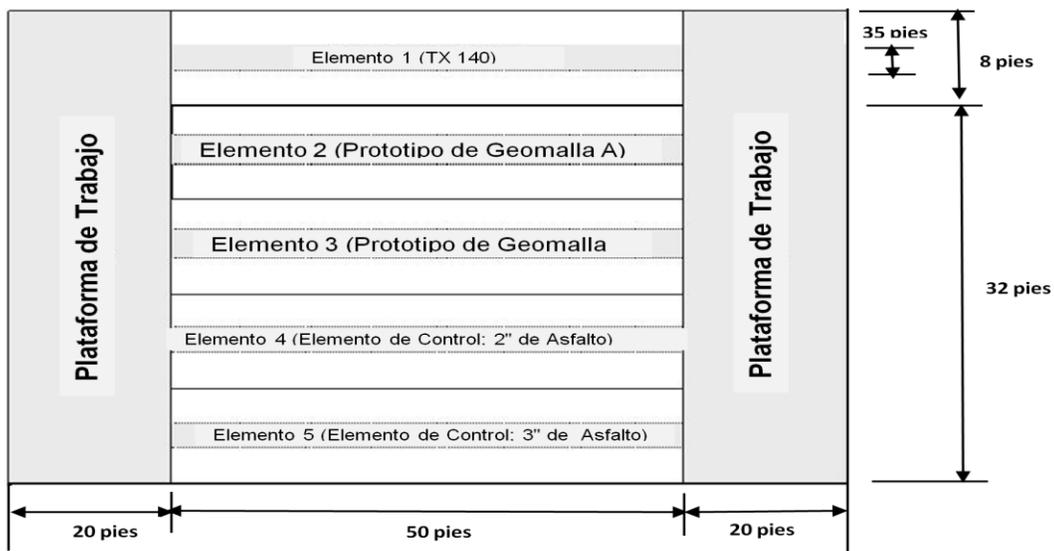
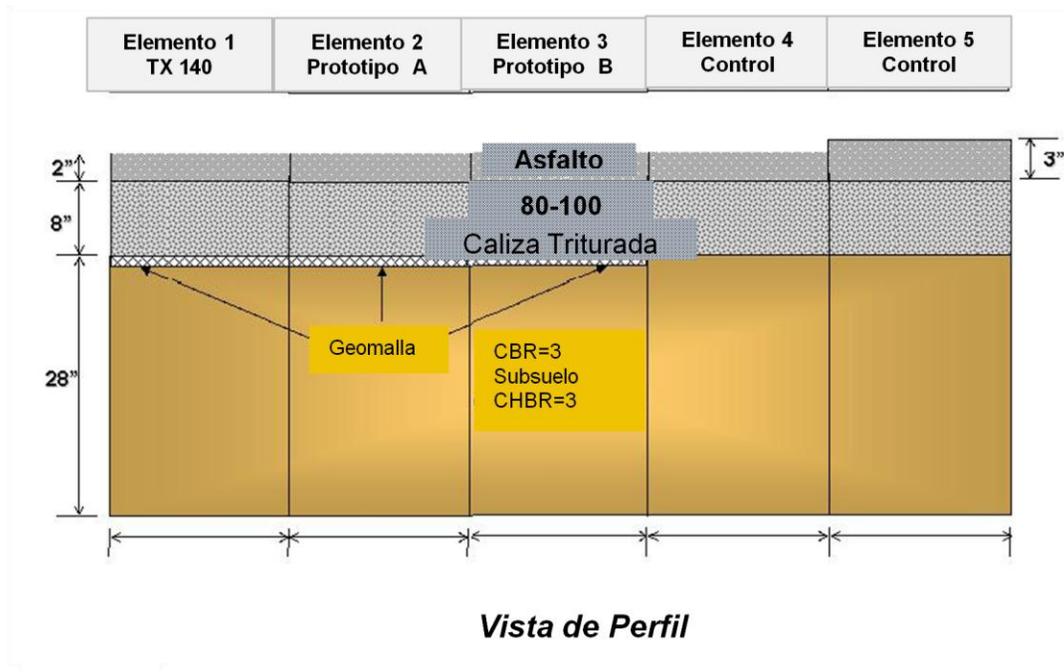


Figura 4.9 Vista en planta de los elementos de control.

Este pavimento fue diseñado para un nivel de tráfico de 125 vehículos por día, en base a los niveles de tráfico típicos de caminos de bajo volumen. Un factor de camión de 0.30, se aplicó. Esto corresponde a un factor de camión típico en un camino colector rural. Se asumió que los camiones constituyen el 15% de la mezcla de tráfico total, consistente con una calzada Categoría III del manual TM 5-82-5. Sobre la base de estos supuestos, el tráfico de diseño durante un período de ejecución de 20 años fue ESALs (número de ejes equivalentes de 8.2 Ton) 41,000 para la condición de subrasante con valor de CBR de 3%.

Los módulos elásticos se estimaron utilizando el CBR de diseño de la base y el subsuelo. Estas condiciones se usaron para desarrollar el número representativo estructural de 2.0. Al nivel del tráfico proyectado, un espesor de asfalto mínimo de 2 pulgadas es necesario. Un coeficiente estructural de 0.44 fue asignado a la capa de asfalto, mientras que un coeficiente estructural de 0.14 fue asignado a la base granular. Estos valores son consistentes con los coeficientes estructurales de la prueba de carretera AASTHO. Basado en estos valores, un espesor de la base mínimo resulto de 7,8 pulgadas. La estructura de pavimento final se construyó con un espesor de capa de base de diseño de 8 pulgadas para facilitar la construcción. Una vista de perfil del diseño estructural del pavimento se muestra en la Figura 4.10.

Todos los elementos de ensayo se construyeron con 28 pulgadas de arcilla de alta plasticidad como el material de subsuelo. Al subsuelo se superpone con capa de base gruesa que consiste en caliza triturada de 8 pulgadas. La piedra caliza fue cubierta con una delgada capa de rodadura de asfalto. Los elementos de prueba fueron construidos simultáneamente en el Hangar N<sup>o</sup> 4 Servicios de pavimento de ensayo a Vicksburg ERDC, en la ubicación MS. El hangar No abierto minimiza el efecto perjudicial de la lluvia a las aceras de la prueba. Un drenaje fue instalado a lo largo de la parte norte de la sección de prueba para evitar la intrusión de la humedad debido al drenaje potencial del 4to Hangar exterior.



**Figura 4.10** Vista de perfil de las secciones de ensayo.

### **Caracterización de materiales.**

Los materiales usados durante la construcción de las secciones de prueba se describen en esta sección. El subsuelo, la base y materiales de concreto asfáltico se sometieron a una serie de pruebas de laboratorio antes de la construcción de la sección de prueba. Los resultados de estas pruebas se resumen en esta sección.

### **Subsuelo.**

El subsuelo se construyó utilizando arcilla disponible localmente, conocido como Clay Buckshot Vicksburg. El suelo está compuesto de 98% de finos que pasan el tamiz # 200. El límite líquido, límite plástico e índice plástico se determinó que eran 83, 29 y 54, respectivamente, siguiendo los procedimientos descritos en la norma ASTM C 856-02-07. El suelo clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH), en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y un A-7-6 (63), según el procedimiento AASHTO.

Cuando se procesa a una humedad uniforme y condición de densidad, el material CH produce un perfil de esfuerzo uniforme. La capacidad de permeabilidad

reducida y la humedad del material nos da una relación entre el contenido de humedad de la CH y la resistencia. Basándose en esta relación, un contenido de humedad de aproximadamente 41.0% es necesario para obtener la resistencia de un CBR de tres; requerida para la resistencia del suelo de desplante. Pruebas Proctor Modificadas se realizaron de conformidad con la norma ASTM D 1557-07, Método A. Para el contenido de humedad del 41.0%, la densidad seca máxima fue de 78.4 libras por pie cúbico.

### **Base**

La capa de base se construye con piedra caliza triturada. Este material es considerado un agregado típico de alta calidad para la construcción en carreteras de Mississippi. El suelo se compone de grava 61%, 32% de arena, y finos 7% que pasaron el tamiz # 200 con finos de consistencia no plásticos. Los coeficientes de curvatura (Cc), y de uniformidad (Cu) fueron 3.55 y 49.33, respectivamente. El suelo está clasificado como grava mal graduada con limos (GP-GM) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y A-1-a de acuerdo con el procedimiento AASHTO.

La prueba Proctor modificada se realizó de acuerdo con ASTM D.1557-07, Método C Modificado; el contenido óptimo de humedad de 4.3%, la densidad seca máxima es de 148.9 libras por pie cúbico.

### **Asfalto**

El asfalto utilizado como material de superficie en la sección de ensayo se seleccionó como representante de una mezcla de carretera para Mississippi. Las pruebas de laboratorio se realizaron para caracterizar el asfalto. La granulometría del agregado se midió utilizando el método de tamizado en húmedo (AASHTO T 27). Los valores recomendados para el diseño de la mezcla Marshall para una carretera de volumen medio (10,000-1,000,000 ESALs); fueron satisfactorios con la mezcla utilizada en esta prueba y que cumplen con la orientación de Asphalt Institute.

## **Instrumentación**

Los sensores de instrumentación fueron colocados en el concreto asfáltico, la base de agregado, el subsuelo, y en la superficie de geomalla para obtener medidas de respuesta con el pavimento bajo carga de tráfico. Sensores dinámicos incluyen celdas de empuje (EPCs), deflectómetros de profundidad simple (SDDs), medidores de deformación del asfalto (ASGs), y medidores de deformación de geomalla (GGs) fueron instalados. La figura 4.11 muestra las ubicaciones de los sensores en una vista de perfil. Todos los instrumentos se centraron horizontalmente dentro de la vía de circulación. Sensores ambientales fueron colocados en el subsuelo para supervisar parámetros ambientales, como se muestra en la Figura 4.12. Estos sensores fueron colocados para proporcionar medidas de los cambios en la humedad del suelo, temperatura y presión de poro en la capa de desplante. Además, sensores fueron colocados en el concreto asfáltico y en la cámara de HVS para controlar la temperatura en esos lugares durante la prueba de tráfico.

Todos los instrumentos se colocaron después de las respectivas capas de pavimento que fueron construidos, excepto los medidores de tensión de geomalla y los instrumentos de medición de temperatura del asfalto. Los medidores de deformación de geomalla se adjuntan a la misma antes de la instalación en la superficie del subsuelo, mientras que los medidores de temperatura de asfalto fueron instalados después de que el pavimento fue construido, antes de la prueba de tráfico.

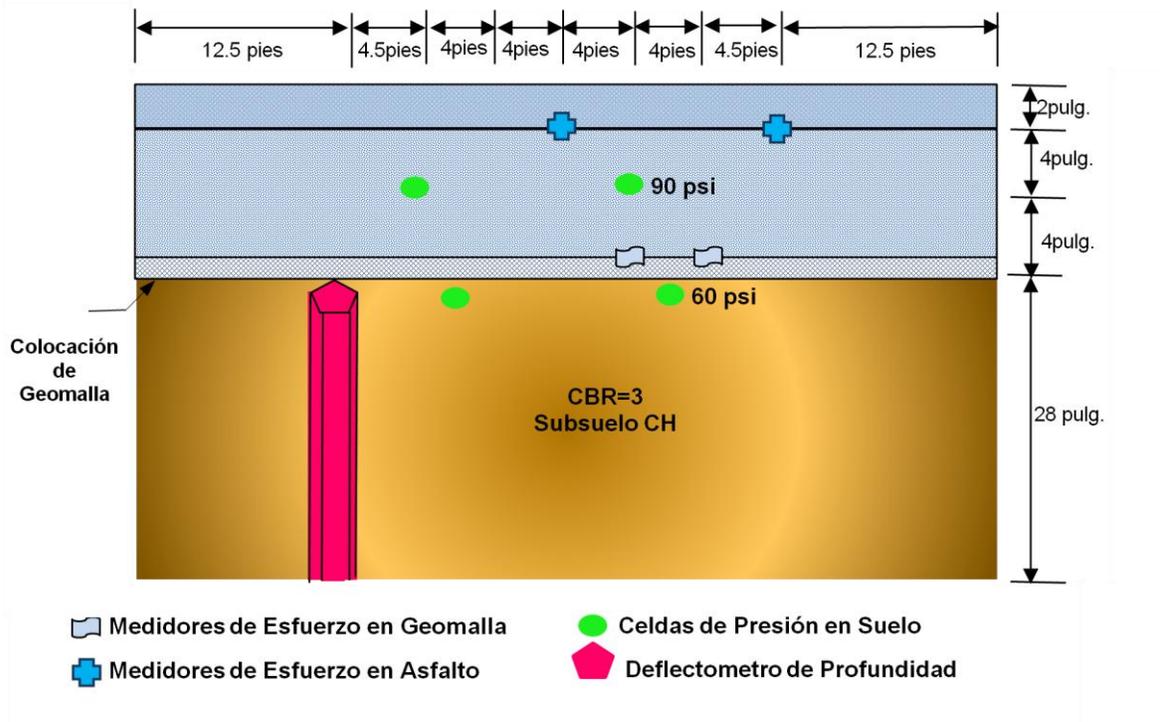


Figura 4.11 Vista de perfil sensores dinámicos.

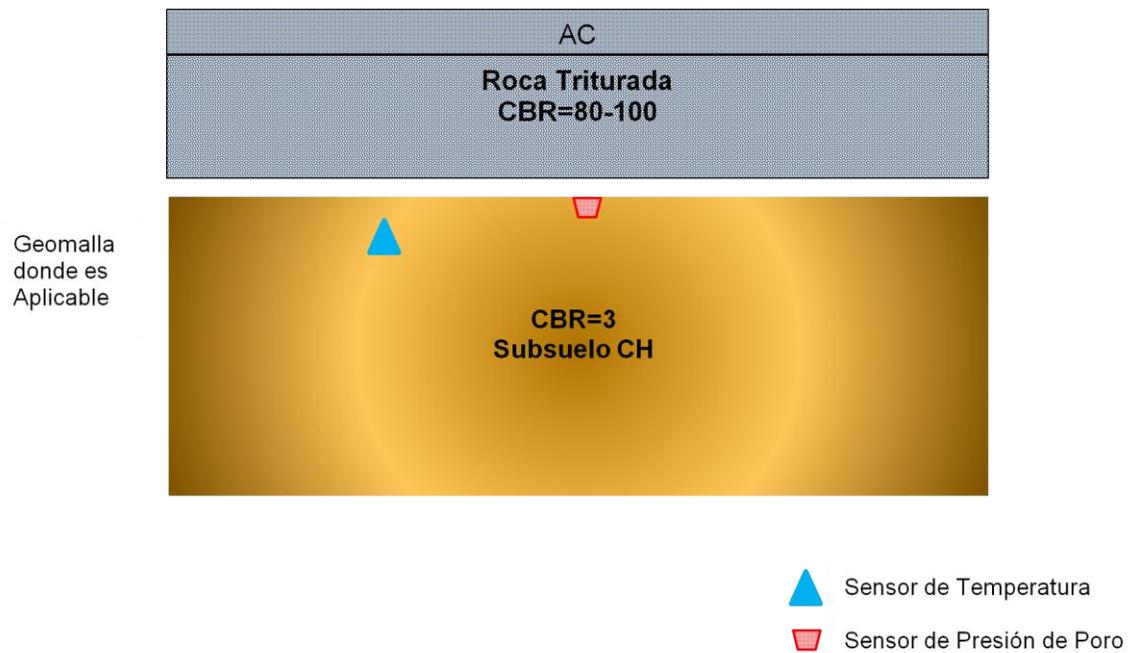


Figura 4.12 Vista de perfil de sensores de ambiente.

## Las celdas de presión

Los esfuerzos verticales se midieron utilizando una serie de celdas de presión (EPCs) de 9 pulgadas de diámetro. Las lecturas de las EPCs proporcionan una medida cuantitativa de la distribución vertical de las tensiones en los diferentes elementos de prueba. Los pavimentos con geomalla de los refuerzo deben distribuir la carga del neumático sobre un área más amplia que la de control no reforzada. Debido al incremento de la rigidez de la capa de base. Dos celdas de presión con un rango máximo de 58 psi se colocaron a dos pulgadas por debajo de la interfaz de la base/subsuelo en cada elemento de prueba. Un segundo par de Modelo 3500 EPCs se colocó en el centro de la base. Las EPCs en la base tienen un rango de presión máxima de 87 psi. La presión máxima requerida para los EPCs se especifica sobre la predicción de que la base trabaja en el rango elástico lineal a estas profundidades en el sistema de pavimento. Foto 1 muestra la instalación de un EPC justo debajo de la interfaz base/subsuelo.



**Foto 1** Colocación de EPC en el centro de la base.

### **Medidores de esfuerzo de asfalto.**

El esfuerzo en la parte inferior de la capa de rodadura asfáltica se midió utilizando medidores de deformación de asfalto (ASGs). EL esfuerzo de tracción en la parte inferior de una capa de asfalto proporciona una medida de la respuesta del pavimento y del aumento de la tensión acumulada o plástica, hasta la falla del pavimento. La medida de la tensión en esta ubicación se puede utilizar para estimar la longevidad a la fatiga de la capa de superficie de asfalto de la calzada.

Dos pares de ASG-152 Modelo CTL, con una gama de 1500 microesfuerzos se colocaron en cada elemento de ensayo. Cada par consistió en un ASG situado en el centro de la vía de circulación alineado de forma que se midió la tensión longitudinal y un segundo ASG alineado en el centro del carril de tráfico para medir la deformación transversal en la parte inferior de la capa asfáltica. El medidor se centró en la estación mostrada en la Figura 4.12. El indicador longitudinal se centró alrededor de 2 metros al norte del indicador transversal. El diseño de estos indicadores antes de pavimento asfáltico se muestra en la foto 2.



**Foto 2** Colocación de medidores de esfuerzo en carpeta asfáltica.

### **Medidores de tensión en geomalla.**

Un número de medidores de deformación se colocaron directamente sobre las geomallas antes de la instalación de las mismas y en la capa de base. Estos medidores de deformación proporcionan un medio para medir el nivel de esfuerzo a lo largo de un nervio de la geomalla. Uno de los principales mecanismos por los cuales se sospecha que la geomalla de refuerzo funciona es mediante la restricción lateral de la capa de base. A fin de que la geomalla pueda realizar su trabajo de manera adecuada, una cierta cantidad de tensión debe ser absorbida esencialmente por el bloqueo de la geomalla y el agregado en una subcapa dura en la parte inferior de la capa de base. Mediciones de tensión a lo largo de la geomalla proporcionan un medio para cuantificar la forma en que trabaja la geomalla.

Los medidores de deformación se colocaron en los productos de geomalla en dos ubicaciones por elemento de prueba. Calibradores fueron instalados por Ables Electronics, Inc. Vichay Micro-Measurements; un EP-08-500 GB-120 y un EP-08-120-230 DS-120, (dependiendo de las dimensiones de la geomalla) fueron instalados en los nervios de la geomalla. La instalación consistió en colocar con cuidado el medidor a la red y recortarla a la medida. Los medidores de deformación se cubrieron entonces con Aqua-Seal para evitar daños por humedad. Por último, una capa de epoxi se aplicó para proporcionar protección adicional a los medidores de deformación. La Foto 3, muestra los medidores instalados.

Medidores se aplicaron a las costillas individuales (entre los nodos de una sola costilla) de las geomallas. El cableado se colocó en una zanja en el subsuelo por debajo de la geomalla para evitar daños durante la instalación de la base. Los soportes de madera se retiraron y los extensómetros fueron cubiertos con arena para evitar daños que se pudieran presentar debido a la construcción de la base (agregados gruesos ver foto 4).



**Foto 3** Medidores instalados en la geomalla.



**Foto 4** Medidores instalados fueron cubiertos con arena para evitar daños.

### **Deflectómetros de profundidad.**

Debido a la superficie de asfalto delgada y a la resistencia del subsuelo relativamente baja, se espera que la falla de pavimento durante esta prueba sea el

resultado de insuficiencia en el subsuelo (ahuellamiento) y no debido a una falla por fatiga de la capa de asfalto. La cuantificación del desplazamiento de la superficie de la subrasante puede validar el mecanismo de falla. Las mediciones de las deformaciones en la capa de desplante también se pueden utilizar para cuantificar los beneficios del refuerzo de una geomalla. Las reducciones en los esfuerzos verticales en el subsuelo se reflejan también en la deformación. El pavimento reforzado con geomalla debe mostrar desviaciones menores que el pavimento no reforzado a un nivel de tráfico dado.

Las deflexiones verticales en el subsuelo se midieron utilizando una sola profundidad del deflectómetro (SDDs). Un SDD fue colocado en el extremo sur de cada elemento de prueba. El SDD se colocó de manera que el eje estaba anclado a una profundidad de 9 pies, un transductor de velocidad de desplazamiento lineal (LVDT) con una pulgada de rango se colocó en la carcasa de tal manera que estuviera en contacto tanto con la varilla de anclaje como con la placa de superficie (Foto 5). Así, el LVDT midió el movimiento de la placa 2 pulgadas por debajo de la interfaz de base-subsuelo con respecto al punto de control situado a una profundidad de 9 pies.



**Foto 5** Medidores instalados de deformación a profundidad.

### Caracterización del pavimento.

Una serie de pruebas se realizaron para caracterizar las propiedades construidas de los materiales de pavimento. Durante la construcción, se obtuvieron los valores del California Bearing Ratio (CBR), densidad seca, y el contenido de humedad; se obtuvieron para cada elemento del pavimento. En el campo los valores de CBR se obtuvieron siguiendo las normas establecidas en la norma ASTM D4429-04, mientras que el contenido de humedad y la densidad se obtuvieron siguiendo la norma ASTM D 3017-04. Estos valores proporcionan un medio para evaluar la uniformidad de las capas construidas, así como el valor comparativo de las diferentes capas del pavimento. Las propiedades del subsuelo conforme fueron construidos se resumen en la Tabla 4.6, mientras que las propiedades de base se resumen en la Tabla 4.7. La variabilidad mostrada durante la construcción de estos pavimentos es bastante bajo.

	<b>Elemento 1</b>	<b>Elemento 2</b>	<b>Elemento 3</b>	<b>Elemento 4</b>	<b>Elemento 5</b>
<b>Tratamiento</b>	<b>TX 140</b>	<b>GGA</b>	<b>GGB</b>	<b>Control</b>	<b>3 pulg. CA</b>
Densidad Húmeda (lb/pie <sup>3</sup> )	113.8	113.8	113.8	114	112.9
Densidad seca (lb/pie <sup>3</sup> )	83.6	83.3	83.8	83.5	83.0
Húmedad (%)	36.1	36.3	36.2	36.1	36.2
Húmedad secada en horno (%)	37	38.2	28.2	37.9	38.9
CBR (%)	3.1	3	3.1	2.9	2.8
Veleta de cortante in situ (lb/pulg <sup>2</sup> )	15.2	16.1	15.5	15.5	15.9

**Tabla 4.6** Resumen de las propiedades índice de CH.

	<b>Elemento 1</b>	<b>Elemento 2</b>	<b>Elemento 3</b>	<b>Elemento 4</b>	<b>Elemento 5</b>
<b>Tratamiento</b>	<b>TX 140</b>	<b>GGA</b>	<b>GGB</b>	<b>Control</b>	<b>3 in. CA</b>
Densidad Húmeda (lb/pie <sup>3</sup> )	153.2	152.7	154.7	153.8	154.6
Densidad seca (lb/pie <sup>3</sup> )	148.8	148.5	150.5	149.7	150.1
Húmedad (%)	2.9	2.8	2.8	2.7	3
Húmedad secada en horno (%)	2.3	1.8	2	2.1	1.4
CBR (%)	90.5	100 +	100 +	100 +	100 +
Espesor (pulg.)	7.42	7.97	7.88	8.09	7.90

**Tabla 4.7** Resumen de las propiedades índice de capa de base (caliza triturada).

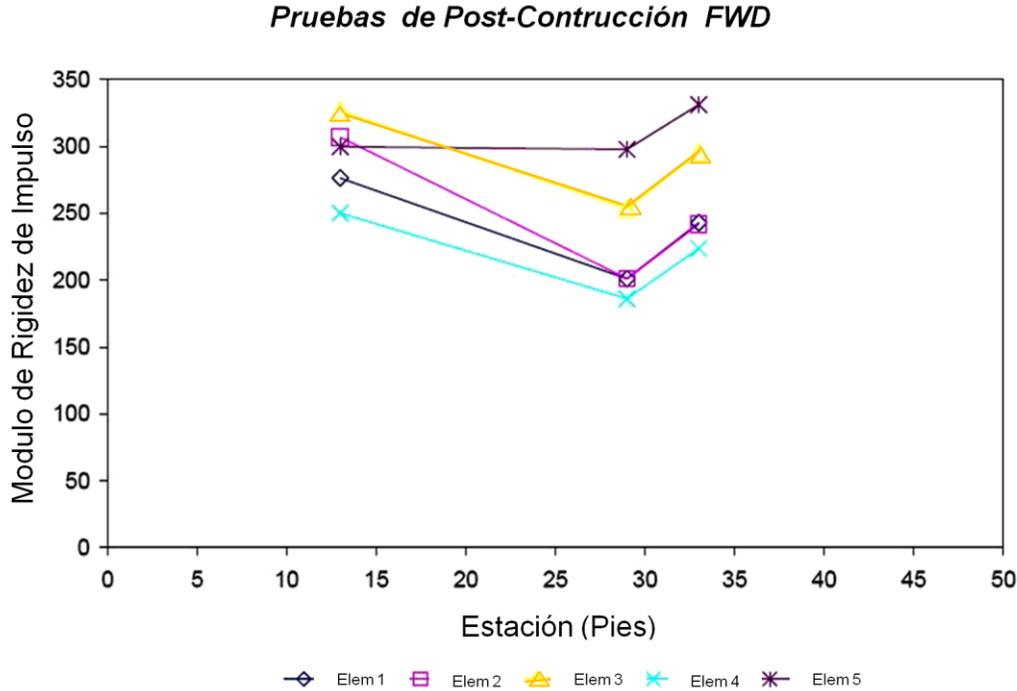
### **Penetrómetro de cono dinámico.**

Una serie de pruebas se realizaron con el penetrómetro de cono dinámico (DCP) para caracterizar la resistencia de las capas del pavimento. Las pruebas DCP se llevaron a cabo después de la construcción de la base y las capas de subsuelo, siguiendo los procedimientos descritos por la norma ASTM D 6951-09. Los valores de medición del índice de DCP (milímetros de penetración por golpe de martillo) se convirtieron a la fuerza CBR utilizando la relación desarrollada por Webster, en los puntos 1 a 5 se presentaron resistencias del subsuelo que están entre de 3,5 a 4 del CBR. El aumento de la resistencia a profundidades superiores a 12 pulgadas son típicos de la arcilla de alta plasticidad (CH) utilizado para la construcción del subsuelo. Este fenómeno conocido como escalera paso a paso, refleja la adhesión de los materiales de arcilla para la varilla de DCP. Pruebas de campo y ensayos de CBR y veleta se realizaron después de la construcción del subsuelo. Los resultados de estos ensayos se resumen en la Tabla 4.6 y 4.7. Los resultados de las pruebas realizadas con DCP después de la construcción de la capa de base, demuestran que la base de piedra caliza de alta calidad se construyó con resistencias de CBR de 100. La transición desde la base hasta el subsuelo se observó en torno a una profundidad de 8 pulgadas para los tres elementos de la prueba.

### **Deflectómetro de caída de peso.**

Pruebas de tracción delantera FWD se realizaron en cada elemento de la prueba, después de la colocación de las superficies de base y concreto asfáltico (CA). Los resultados de FWD han sido analizados en términos rigidez transversal de impulso (ISM). El ISM se calcula dividiendo la carga aplicada por la deflexión de la carga de placa. Un valor alto de un mecanismo de apoyo representa un pavimento rígido, mientras que un valor bajo representa un pavimento débil. La Figura 4.13 muestra los perfiles de ISM obtenidos para los 5 elementos de ensayo antes de la iniciación de pruebas de tráfico. Una parte de la variabilidad observada en los resultados es debido a la naturaleza heterogénea de materiales de pavimento; como fueron la capa de subsuelo de arcilla blanda y la base de agregados triturada. Sin embargo, una parte de la variabilidad se debe a las diferencias estructurales como fueron construidos los elementos de ensayo.

La figura 4.13 indica que antes de la prueba de tráfico, el elemento 4 exhibió los valores más bajos del ISM. Los valores obtenidos ISM en los puntos 3 y 5 fueron ligeramente más altos que los observados en los puntos 1 y 2. Se espera que en el punto 5 se muestren notablemente más altos los valores del ISM, ya que este elemento de prueba tiene una superficie de CA mas gruesa, proporcionando más capacidad de carga. Los valores de incremento de la rigidez de los elementos 1, 2 y 3 en relación con el elemento 4 de control no reforzado pueden explicarse por la heterogeneidad de los materiales del pavimento, así como la presencia de materiales de refuerzo; la geomalla en la interfaz base/subsuelo. Es hipotético que la geomalla pueda incrementar la rigidez durante la compactación, la reducción de la cantidad de mezcla durante la construcción de base/subsuelo y la mejora de las propiedades del material de la capa de base (densidad, resistencia, y rigidez). En general, los valores calculados ISM son relativamente consistentes en comparación con la variabilidad observada normalmente en las secciones de pavimento de asfalto.



**Figura 4.13** Resultados FWD en lugares seleccionados antes de la aparición de las pruebas de tráfico.

### Pruebas de tráfico.

Las pruebas de tráfico de los elementos, se realizaron utilizando el vehículo pesado ERDC Simulador (HVS-A). El HVS-A es capaz de aplicar las cargas de tráfico entre 10,000 y 100,000 libras. La configuración de los ejes por los cuales las cargas de las ruedas se aplican al pavimento pueden ser configurados para las especificaciones del usuario. Las variables incluyen el neumático, el número de neumáticos, y la carga aplicada. La comprobación del tráfico del elemento 4 de control, se llevó a cabo utilizando un solo eje de carga de doble rueda, a una carga nominal de 10,000 libras. Este eje se muestra en la foto 6; la comprobación del tráfico de los elementos de ensayo restantes se efectuó usando un eje de carga con doble rueda en tándem; a una carga nominal de 20,000 libras (Foto 7). Para acelerar el tiempo requerido para el tráfico. El eje tándem proporciona el doble de la cobertura de tráfico en una sola pasada del carro de carga. Los efectos

adversos asociados con el tráfico utilizando doble eje en lugar del eje simple se consideran nominales.



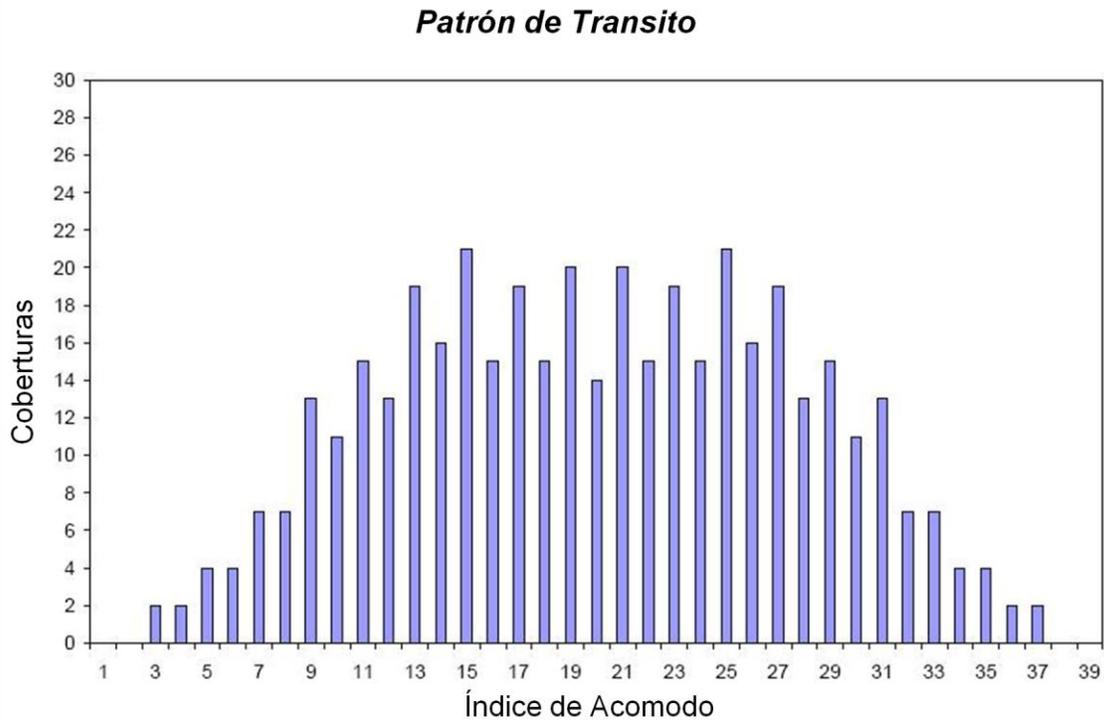
**Foto 6** Aplicación de carga con eje sencillo dual.



**Foto 7** Aplicación de carga con eje tándem.

Los elementos de ensayo se sometieron a una carga de tráfico distribuido uniformemente, tal como se muestra en la Figura 4.14. Los índices de

desplazamiento lateral se refieren a 1 pulgada, incrementos a lo largo de la cual la rueda se desplaza longitudinalmente. Por lo tanto, la medida de fluctuación del recorrido lateral de este modelo de tráfico es aproximadamente de 3 pies. Esto representa el recorrido en un carril de tráfico normal, según lo observado en caminos. El tráfico de carga se aplicó sobre una longitud de 50 pies a lo largo de cada elemento de prueba. La corrida de datos se realizó a lo largo del interior de 40 pies de la sección de la vía de circulación para evitar las estaciones en la zona de transición adyacentes al extremo de la línea de inspección.



**Figura 4.14** Patrón de desplazamiento lateral utilizado para la aplicación de tráfico.

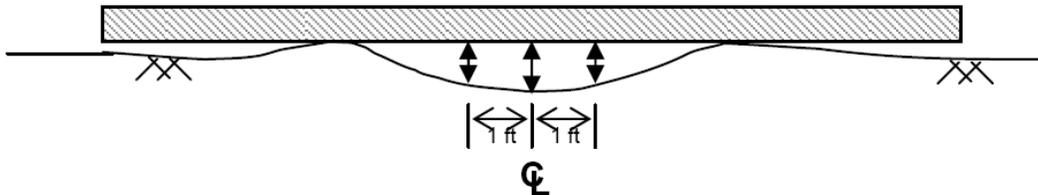
A intervalos de tráfico seleccionados, los datos han sido recopilados, incluyendo la deformación de superficie permanente y los datos de instrumentación de respuesta. El criterio de falla de estos pavimentos era una pulgada de rodera en la superficie, incluyendo cualquier perturbación. Cada elemento de la prueba se transito más allá de ese nivel, para asegurar una respuesta del pavimento adecuada y así asegurar la obtención de los datos de rendimiento.

### Los resultados preliminares.

En esta sección se incluye un resumen y análisis de los datos recolectados de algunos elementos; incluyendo datos de la investigación en la superficie del pavimento, los primeros resultados de los puntos 1, 4 y 5 están disponibles en este escrito.

### Deformaciones de superficie.

Las roderas se midieron en cinco ubicaciones longitudinales a lo largo de cada elemento de prueba (Estaciones 9, 12.5, 25, 37.5, y 43 pies) a intervalos de tráfico seleccionadas a través de pruebas de tráfico. Las roderas se midieron en tres lugares transversales en cada estación, como se muestra en la Figura 4.15. El promedio de estos valores se utilizan para calcular la profundidad del surco en la estación.

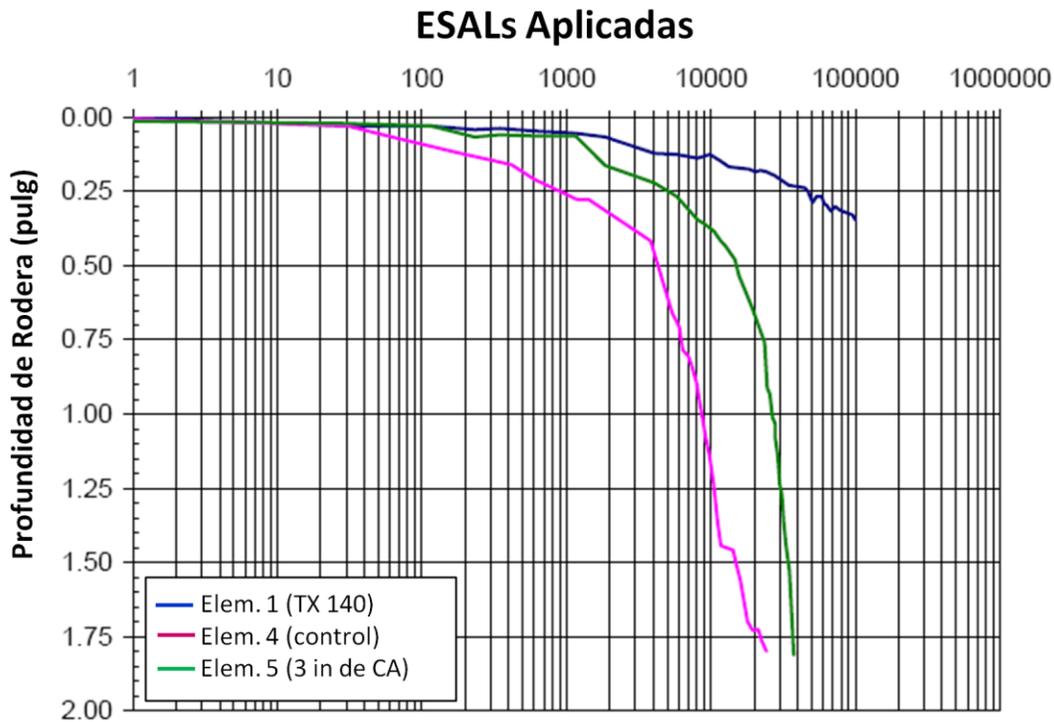


**Figura 4.15** Esquema de disposición de medición de profundidad de rodera.

El ahuellamiento promedio medido en estas estaciones se muestra en la Figura 4.16 para los elementos 1, 4, y 5. Esta cifra indica que el inicio de la rodera ocurrió anticipadamente en los puntos 4 y 5 (los elementos no reforzados), que en el pavimento reforzado con geomalla, punto 1. Además, estos datos indican que la vida útil del pavimento producto del ensayo reforzado con geomalla es superior a la de los elementos de prueba no reforzadas.

Cabe señalar que el elemento 1; se detuvo a 100.000 ESALs debido a la contaminación del material por inundación. En los análisis de los datos de prueba

de la sección, un elemento de prueba se considerará que ha fallado al 50% del elemento de ensayo si superó una depresión con profundidad de 1 pulgada; Esto es consistente con una fiabilidad del 50% utilizado en las hipótesis iniciales de diseño del pavimento. Los niveles de tráfico en el que los elementos de prueba han fallado se resumen en la Tabla 4.8. Esta tabla también incluye los niveles de tráfico en la que varios niveles de rodera se han alcanzado. Este análisis se basa en 3 de las 5 estaciones. Estos datos apoyan las observaciones discutidas anteriormente: el elemento de control 4 ofreció el menor tráfico, seguido por el asfalto del punto 5, y luego TX140 del (punto 1).



**Figura 4.16** Acumulación de roderas en lugares seleccionados.

Además de las mediciones de formación de roderas en lugares seleccionados, el perfil longitudinal del pavimento fue examinado en un número de niveles de tráfico durante las pruebas. Estas curvas proporcionan un método más robusto de la comparación de los diversos temas, ya que proporcionan un indicador global del

comportamiento del pavimento a través de los elementos de ensayo de 50 pies de largo.

En estos perfiles se eliminan algunas de las discontinuidades asociadas con las mediciones de roderas discretas que pueden corresponder a puntos débiles, o fuertes de la estación a lo largo de la sección de pavimento. Los valores del perfil de pavimento no representan la misma medida que la profundidad del surco, y no representa la deformación permanente de la línea central con relación a las condiciones iniciales antes del inicio de las pruebas de tráfico. Por lo tanto, las perturbaciones, no están incluidas en estas profundidades. Las figuras 4.17, 4.18 y 4.19; muestran los perfiles de la línea central para los elementos 1, 4, y 5, respectivamente, a intervalos seleccionados. Las tres figuras muestran que las deformaciones comenzaron a aumentar rápidamente en uno o más lugares en cada elemento de ensayo. Estas localizaciones corresponden a los puntos más débiles del sistema de pavimento.

La falla del pavimento se propaga hacia el exterior de los lugares iniciales, induciendo a falla en las áreas adyacentes a un ritmo acelerado. Este tipo de comportamiento es típico para las pruebas de tráfico de pavimentos de asfalto delgado, sin embargo, el efecto se hace más pronunciado en ensayos acelerados de firmes debido al control hidráulico de la HVS "Un carro de carga". Durante las pruebas de tráfico, las celdas de carga presentarán una disminución fuerte de la carga cuando el auto se mueve sobre el punto débil. El HVS luego intenta compensar la pérdida de carga, lo que conduce a una sobrecarga leve del pavimento adyacente al punto débil.

La Tabla 4.9 resume los niveles de tráfico a las deformaciones superficiales acumuladas, a lo largo de la línea central del perfil que superan un número de umbrales a lo largo de 50% de fiabilidad, en los perfiles de prueba de los elementos. Los perfiles de superficie fueron registrados a intervalos de un pie, proporcionando una mejor medida de la variabilidad lineal de la formación de roderas y velocidad de propagación de la falla en lugares débiles de todos los elementos de ensayo. Sin embargo, como se señaló anteriormente, este método

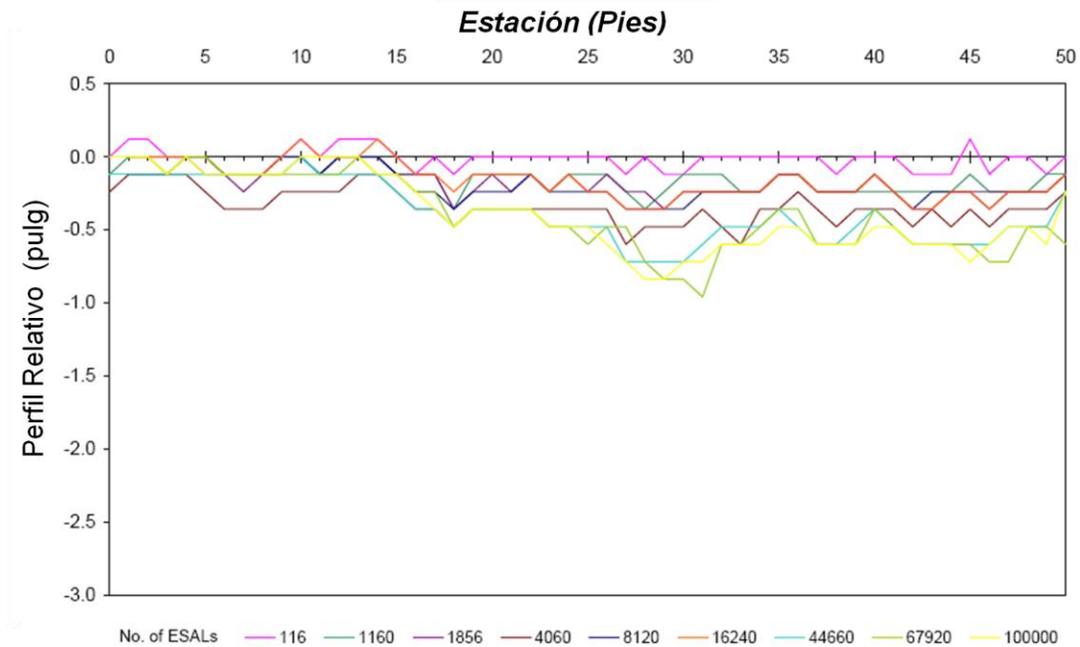
no incorpora el levantamiento utilizado para medir la profundidad del surco. Estos resultados siguen la misma tendencia que las profundidades de rodera en cuanto a la clasificación de los diversos tratamientos basados en el tráfico.

<b>Elemento de prueba</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>0.25 pulg.</b>	<b>0.50 pulg.</b>	<b>0.75 pulg.</b>	<b>1.0 pulg.</b>
1	TX 140	24360	100000+	100000+	100000+
4	Control	1,200	5,400	11,780	19,500
5	3 in de CA	3,060	12,640	19,140	26,800

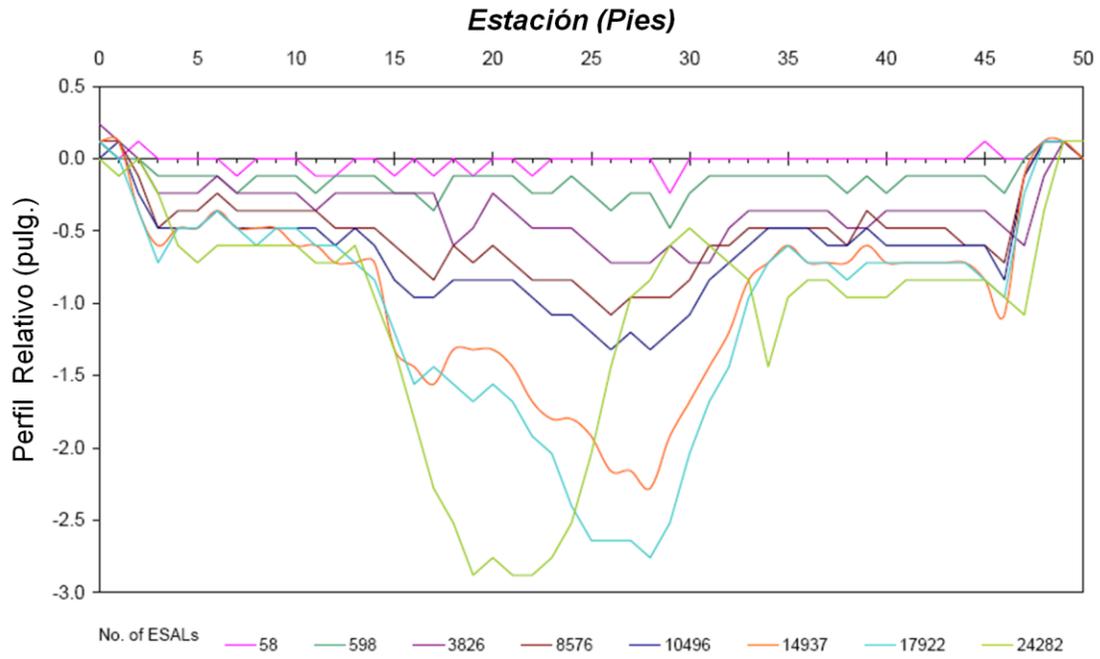
**Tabla 4.8** Resumen de los niveles de tráfico para profundidades de roderas seleccionadas a lo largo del 50% del elemento de ensayo

<b>Elemento de prueba</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>0.25 pulg.</b>	<b>0.50 pulg.</b>	<b>0.75 pulg.</b>	<b>1.0 pulg.</b>
1	TX 140	44,600	100000+	100000+	100000+
4	Control	3,290	9,200	20,193	24,282+
5	3 in de CA	7,170	15,700	25,200	33,000

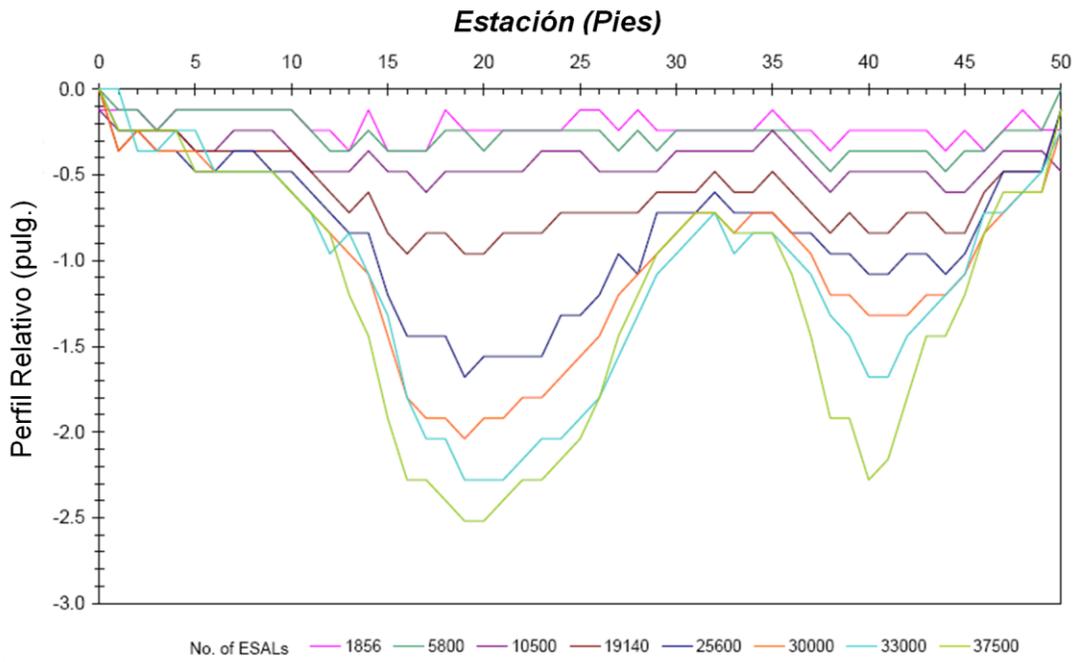
**Tabla 4.9** Resumen de los niveles de tráfico para deformaciones acumuladas, seleccionadas a lo largo del 50% del elemento de ensayo



**Figura 4.17** Perfil central en los intervalos seleccionados; elemento 1 TX 140.



**Figura 4.18** Perfil central en los intervalos seleccionados; elemento 4 (control).



**Figura 4.19** Perfil central en los intervalos seleccionados; elemento 5 (3 pulg. de AC).

## Resistencia del pavimento.

Posteriores a la prueba de tránsito, para los elementos 1, 4 y 5; se realizó la excavación de pozos en campo para obtener el CBR. El concreto asfáltico se eliminó en 3 pies de largo en la sección en las estaciones 12 y 30. Las pruebas en la superficie de capa de base incluidas son; CBR in situ, DCP, la densidad, y los ensayos de humedad.

La base granular y la geomalla fueron excavados. Se realizaron pruebas de la superficie en la parte superior de la capa de desplante, CBR, DCP, densidad, contenido de humedad, y ensayos con veleta de corte. Los resultados de estos ensayos se resumen en la Tablas 4.10 a 4.12.

En general, no hubo un aumento significativo en la densidad de la capa de apoyo. La variabilidad entre las mediciones de densidad seca obtenida antes del tráfico y en post-pruebas no presenta tendencias discernibles.

En general, la densidad de los materiales de base sufrió reducción en los niveles medidos antes de la aparición de tráfico. Esto fue particularmente prominente en las áreas donde el flujo de cortante había iniciado. Del mismo modo, la resistencia de la base en el hombro se redujo respecto a los medidos durante la construcción en áreas fundamentales donde el flujo cortante había iniciado. La medición de las roderas y sus resultados en estas estaciones fueron significativamente diferentes.

	<i>Orbita de la rueda</i>			<i>Hombros</i>		
	<i>CBR (%)</i>	<i>Densidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>	<i>CBR (%)</i>	<i>Densidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>
	<b>Base</b>					
Estación 12	74.9	137.7	2.6	73.4	141.8	2.5
Estación 30	100+	145.3	3.1	100+	144.6	3.3
	<b>Subsuelo</b>					
Estación 12	2.1	84.4	35.6	2.2	80.8	37.3
Estación 30	2.5	84.1	35.4	2	84.7	34.2

**Tabla 4.10** Resumen de resultados de pruebas post-tráfico. (Elemento 1).

<i>Orbita de la rueda</i>			<i>Hombros</i>		
<i>CBR (%)</i>	<i>Desidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>	<i>CBR (%)</i>	<i>Desidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>
<b>Base</b>					
93	146.8	3.1	65	143.5	3.2
100+	152.5	2.8	47	146	3
<b>Subsuelo</b>					
3.0	85.8	33.3	2.1	84.2	34.9
2.5	79.1	41.4	2	79.7	39.5

**Tabla 4.11** Resumen de resultados de pruebas post-tráfico. (Elemento 4).

	<i>Orbita de la rueda</i>			<i>Hombros</i>		
	<i>CBR (%)</i>	<i>Desidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>	<i>CBR (%)</i>	<i>Desidad seca (pfc)</i>	<i>Contenido de humedad</i>
<b>Base</b>						
Estación 12	100+	150	3	70	139.2	3.9
Estación 30	100+	150.1	2.9	53	143.7	3.5
<b>Subsuelo</b>						
Estación 12	3.4	82.5	39.7	3.4	78.3	40.9
Estación 30	3.5	85.1	34.1	2.6	84.6	34.9

**Tabla 4.12** Resumen de resultados de pruebas post-tráfico. (Elemento 5).

### 4.3 Análisis Experimental.

Una vez que se conocieron las principales investigaciones desarrolladas, así como los métodos para desarrollar un diseño de pavimento reforzado con geomalla; nos enfocaremos en explicar los ensayos a realizar; con el fin de establecer la forma en que afectan las geomallas el comportamiento mecánico de los suelos que se utilizan en la construcción de terracerías para vías terrestres.

Los estudios que se realizarán son empíricos en parte y siguen una teoría ya establecida; más adelante se explicaran los supuestos para poder establecer los resultados de las pruebas. Los ensayos de laboratorio para obtener estas variantes son sencillos, pero serán muy representativos del fenómeno que ocurre en los suelos al colocarles una geomalla como refuerzo. Como es conocido en México; en la practica común y con el fin de que este trabajo pueda ser consultado

conociendo la mayoría de las normas de referencia, se realizaron las pruebas principales sobre los materiales y en conjunto con las geomallas, con normas de la Infraestructura del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT <sup>[9]</sup>); publicadas para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), así como los estándares de la ASTM <sup>[3]</sup>.

Basados en ello, a continuación explicaremos la metodología y anunciaremos nuevamente la hipótesis; así como veremos las evidencias para poder Rechazar o No la misma.

#### **4.3.1 Obtención de Muestras y Materiales Empleados.**

Las muestras de los tres materiales empleados para este trabajo, se obtuvieron y se manejaron mediante el procedimiento de la norma M-MMP-1-01/03, (IMT <sup>[9]</sup>); Todas las muestras fueron del tipo alteradas, ya que las pruebas a realizar no contemplan necesario recurrir a muestras inalteradas, ya que no es necesario contar con la estructura natural del suelo.

##### **4.3.1.1 Identificación de los Materiales.**

Como parte de nuestros ensayos se obtuvieron tres materiales diferentes, a fin de conocer en diversos tipos de suelos el efecto de colocarles un refuerzo con geomalla.

A continuación identificaremos los suelos; pues es importante reconocer algunas características específicas de ellos, tales como su color, tamaño de las partícula, textura superficial, plasticidad de finos, estructura, resistencia en estado seco, presencia de materia orgánica, forma de partículas, reacción al agitado, cementantes, entre otros. La metodología, los parámetros y terminología empleada para esta parte, es la que se especifica en la norma ASTM D2488-90

Standar Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual procedure).

Las características de los suelos bajo el análisis son los siguientes:

**Suelo “A”. (Arcilla)**

Para esta parte de la prueba se emplearon los procedimientos pertenecientes a la clasificación de suelos finos, y se identificaron las características siguientes del material:

Color-- En estado seco----café muy oscuro. En estado húmedo---negro.

Textura superficial----- Jabonosa.

Reacción al agitado---- (Dilatación). Lenta.

Plasticidad de finos----- De media a alta.

Tenacidad en el límite plástico----- Media a alta.

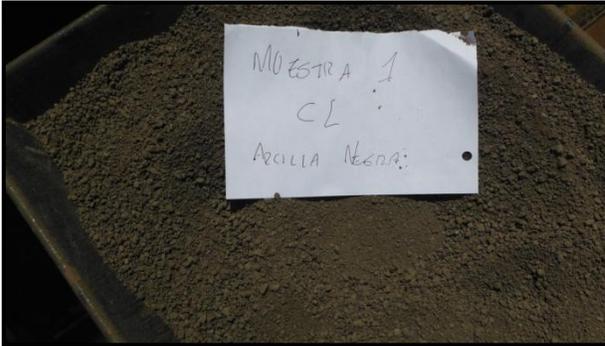
Resistencia en estado seco----- Alta.

Cementante----- Natural medio no presenta reacción a ácido clorhídrico.

**Observaciones:** En la prueba de sensación y contracción, se pudo observar, que al llevarse a cabo el secado de la muestra, se presentaba una contracción notable además se presentó absorción en la mano lo que significa presencia de arcillas.

Suelo obtenido en el tramo previo a la construcción de una vialidad. Material de terreno natural.

**Clasificación SUCS:** CL ó CH (Arcilla de mediana a alta plasticidad.) a simple vista.



(8)



(9)

**Material arcilloso**

**Foto 8** Material de arcilla en estado seco.

**Foto 9** Muestras en estado seco del suelo A.

**Suelo “B” (Limo).**

Para esta parte de la prueba se empleó el procedimiento perteneciente a la clasificación de suelos finos, y se identificaron las características siguientes del material:

Color----- En estado seco---café. En estado húmedo ----café claro.

Textura superficial----- Harinosa con partículas que presentan trabazón entre sí.

Reacción al agitado---- (Dilatación).-----Muy rápida.

Plasticidad de finos----- Baja.

Tenacidad en el límite plástico----- Baja

Resistencia en estado seco----- Baja

Cementante---- Cementante natural casi nulo; no presenta reacción a ácido clorhídrico.

**Observaciones:** En la prueba de sensación se percibe rugosidad (presencia de arenas).

Suelo obtenido en el segundo estrato de terreno natural para la construcción de una vialidad.

**Clasificación SUCS:** ML (Limo de Baja plasticidad) a simple vista.



(10)

**Material Limo-arenoso**

**En Foto 10** Material Limo-arenoso en estado seco.

**En Foto 11** Resistencia en estado seco del suelo B.



(11)

**Suelo "C" (Arena).**

Para esta parte de la prueba, la clasificación de suelos gruesos se realizó, identificando para el tercer material lo siguiente:

Al trabajar esta muestra se encontraron masas de suelos semejantes a arenas de un tamaño no superior al centímetro; lo que caracterizaba a esta muestra, es que poseía en su estructura arenas de color café-rojizo; finalmente se identificaron las siguientes características:

Grupo de suelo: Arena gruesa

Resistencia al estado seco: Muy baja

Color: Café rojizo

Tamaño y graduación de partículas: Presencia de tamaños variables, presencia de finos y arenas. "Arenas gruesas y medias."

Forma de partícula: Sub- angulosa.

Textura superficial: Rugosa

**Clasificación SUCS:** SP (Arena mal graduada) a simple vista.



**En Foto 12** Material Arenoso  
Muestra de suelo "C".

(12)

#### 4.3.2 Propiedades Índice de los Materiales.

De los tres materiales en estudio se realizó el secado, disgregado y el cuarteo de las muestras de materiales de acuerdo a la norma M-MMP-1-03/07 (Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras). Se tomaron muestras para elaborar las distintas pruebas, para establecer los valores índice de los materiales a experimentar.

Las muestras se trasladaron al laboratorio y de cada uno de los suelos se determinaron los valores principales mediante las pruebas que a continuación se anuncian:

**Preparación de la muestra.** M-MMP-1-03/07 (SCT Secado, Disgregado y Cuarteo de Muestras).

**Masa Volumétrica Seca Suelta** M-MMP-1-08/07 (SCT Masa Volumétrica y Coeficientes de Variación Volumétrica).

**Contenido de Humedad.** M-MMP-1-04/07 (SCT Contenido de Agua).

**Densidad Relativa.** M-MMP-1-05/07 (SCT Densidad Relativa y Absorción).

**Granulometría** M-MMP-1-06/07 (SCT Granulometría para Materiales Compactables para Terracerías).

**Límites de Consistencia** M-MMP-1-07/07(SCT Límites de Consistencia).

**Clasificación SUCS Y ASTM**

**Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima** M-MMP-1-09/07 (SCT Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima).

Para cada suelo analizado se describen los resultados de las pruebas a continuación:

✓ **Suelo “A”. (Arcilla de alta plasticidad).**

Como se enuncio en la parte de clasificación de suelos visual; el suelo “A”; es un material de características finas y sus resultados se presentan a continuación.

**Masa Volumétrica Seca Suelta=** 972 kg/m<sup>3</sup>.

**Contenido de Humedad=** 35.14 %.

**Granulometría=** GRAVAS 0% - ARENAS 7.3% - FINOS 92.7%.

**Límites de Consistencia.** LI= 68. ; Lp= 11. Ip= 58.

**Clasificación SUCS.** CH (Arcilla de alta plasticidad); **ASTM** CH (Arcilla densa)

**Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima.** 1310 kg/m<sup>3</sup> --- 29%.

✓ **Suelo “B”. (Limo arenoso).**

Como se comentó en la parte de clasificación de suelos visual; el suelo “B”; es un suelo de características finas y sus resultados se presentan a continuación.

**Masa Volumétrica Seca Suelto=** 1086 kg/m<sup>3</sup>.

**Contenido de Humedad=** 14.7%.

**Granulometría= GRAVAS 0 % - ARENAS 48.8% - FINOS 51.2%.**

**Límites de Consistencia. LI= 32 Lp= 28 Ip= 4.**

**Clasificación SUCS.** ML (limo de baja plasticidad); **ASTM ML** (limo arenoso).

**Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima.** 1687 kg/m<sup>3</sup> --- 17%.

✓ **Suelo “C” (Arena).**

Como se mencionó en la parte de clasificación de suelos visual; el suelo “C”; es un suelo de características gruesas y sus resultados se presentan a continuación:

**Masa Volumétrica Seca Suelta=** 1175 kg/m<sup>3</sup>.

**Contenido de Humedad=** 5.1%

**Granulometría= GRAVAS 12.4% - ARENAS 81.8% - FINOS 5.72%. Cu=9 Cc=0.79**

**Límites de Consistencia. LI= NA\*; Lp= NA; Ip= NA.**

**Clasificación SUCS.** SP-SM (Arena mal graduada con limo) **ASTM SP-SM**

**Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima.** 1727 kg/m<sup>3</sup> --- 6.5%.

[\*] **NA;** Los límites no se establecen por el método, debido a que el ensaye con la copa de Casagrande no permitió colocar al menos 25 golpes.

### 4.3.3 Propiedades Mecánicas de los Materiales. Cálculo de CBR y Expansión.

A los tres materiales en estudio se les realizó el ensaye de CBR y expansión según la norma M-MMP-1-11/07. (SCT Valor de Soporte California y Expansión en %, en Laboratorio, IMT <sup>[9]</sup>).

Los resultados de las pruebas para obtener los parámetros de resistencia mecánica se indican a continuación en la Tabla 4.13.

VALOR / SUELO	SUELO A (CL)	SUELO B (ML)	SUELO C (SP)
CBR <sup>[1]</sup> %	1.25%	13.80%	58%
EXPANSIÓN %	1.39%	0.03%	0.01%

[1] Espécimen compactado dinámicamente de acuerdo a la Norma M-MMP-01-11/11; con humedad óptima según M-MMP-1-09/07.

**Tabla 4.13** Resultados de CBR y Expansión para los 3 suelos sin refuerzo.

La humedad con la que se compactaron los especímenes de suelo en sus tres tipos, fue la humedad óptima siendo 29%, 17% y 6.5 % para los suelos “A” (CH),”B” (ML),”C” (SP-SM) respectivamente.

### 4.3.4 Geomallas a Utilizar.

Las geomallas ensayadas en conjunto con los suelos en laboratorio, fueron elegidas por su fácil adquisición en el mercado; las geomallas que se utilizaron en el desarrollo de estas pruebas fueron la geomalla Tensar BX 1500 y la geomalla Triax TX 140 de la misma marca. En el Apéndice A se ubican algunas fichas técnicas de geomallas tensar incluyendo las fichas de las geomallas que fueron utilizadas para este proyecto.

### 4.3.5 Hipótesis y Ensayos.

Una vez conocidas las características índices y mecánicas de los tres materiales ensayados, se anuncia nuevamente la hipótesis de investigación; “El uso de geomallas biaxiales y triaxiales mejora la capacidad portante (CBR) de los

materiales de terracerías, empleados en la construcción de pavimentos; así como mejora las condiciones de compactación para materiales donde su subyacente es un suelo blando”;

Para rechazar o no la hipótesis antes mencionada, realizaremos algunas modificaciones a pruebas establecidas y con ello obtendremos los resultados de los parámetros mecánicos de los materiales, utilizando geomallas en conjunto como refuerzo.

Las pruebas que se realizaron siguen la metodología de las pruebas de CBR en laboratorio mediante el procedimiento M-MMP-1-11 y ASTM D-1883; que fueron modificadas mediante la inclusión de geomallas.

#### **4.3.5.1 Metodología Realizada.**

El procedimiento requerido para realizar las pruebas a los suelos con geomallas de refuerzo esta basado estrictamente en la prueba del calculo del CBR y Expansión según M-MMP-1-11/07 de IMT; El equipo, dispositivos, moldes, discos espaciadores, placas son exactamente los mismos que lo que marca la norma antes mencionada.

La variante para realizar las pruebas se basa únicamente en la compactación de los materiales ocupados, así como la colocación de la geomalla como se menciona detalladamente en los párrafos siguientes; cabe señalar que los resultados de los parámetros de CBR y expansión fueron obtenidos de manera similar a la norma mencionada en el párrafo anterior; a menos que se indique la norma ASTM D-1883.

#### **4.3.5.2 Procedimiento de Compactación para Pruebas con un Material.**

Una vez que se preparan los materiales como se indica en la sección E de la norma M-MMP-1-11/07; la humedad de compactación para este trabajo es la humedad óptima, obtenida en la prueba de compactación donde se obtuvo el

contenido de humedad óptimo de cada material (M-MMP-1-09/07; SCT Masa Volumétrica Seca Máxima y Humedad Óptima); una vez realizado esto, se utilizaron tres especímenes para realizar la compactación con tres energías diferentes de acuerdo a la tabla siguiente, según la norma referida anteriormente; y que se expresa en la tabla 4.14.

<i>Material para</i>	<i>No. De Especimen</i>	<i>Energía de compactación Kg.cm/cm<sup>3</sup></i>	<i>Número de golpes</i>	
			<i>Pisón de 2.59 kg</i>	<i>Pisón de 4.54 kg</i>
Terraplén	1	6.03	56	--
	2	2.69	25	--
	3	1.08	10	--
Subyacente	1	6.03	56	--
	2	2.69	25	--
	3	1.08	10	--
Subrasante	1	27.42	--	56 <sup>[1]</sup>
	2	6.03	25	--
	3	2.69	10	--

[1] En el caso de que sólo se disponga de pisón de 2.59 kg, al primer espécimen de material para subrasante se le aplicará 153 golpes por capa con este pisón.

**Tabla 4.14** Energías de compactación de acuerdo al tipo de material que se trate.

Cabe señalar que en el estudio en cuestión, identificaremos la afectación del refuerzo en las terracerías de un pavimento; por lo que dará lugar a realizar las compactaciones para un material de terraplén en el caso del suelo “A” y Subrasante en el Caso del Suelo “B” y “C”.

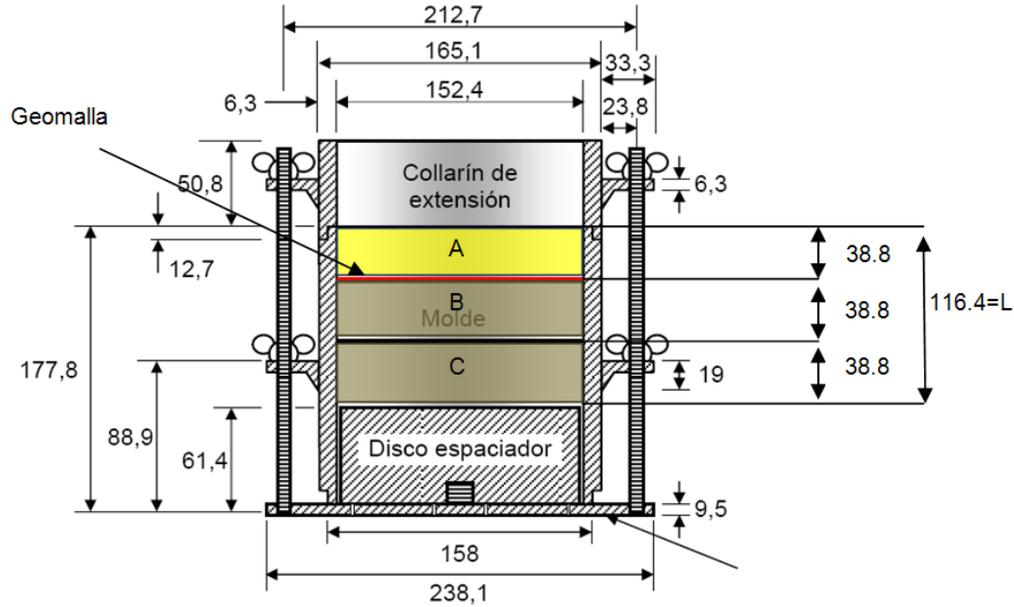
Los pasos para iniciar la compactación en los especímenes de un solo suelo con la geomalla colocada como refuerzo es el siguiente:

1. Se ensambla un molde con collarín de extensión a la placa base sin perforaciones, se coloca el disco espaciador dentro del molde, se coloca el papel filtro con el fin de que el material no se adhiera a él y se coloca en una base cubica rígida.

2. Una vez colocado el molde en la base cubica, se toma una de las fracciones del material que se suponga ocupe un tercio del molde, y se compacta con el pisón aplicando los golpes uniformemente repartidos en la superficie de la capa del material, el número de golpes indicado en la tabla 4.14.
3. Una vez compactada la primera capa, se verifica mediante el uso del vernier medido en 4 puntos del molde, con aproximación de 0.1 mm si la capa esta al tercio del molde; la tolerancia establecida para este trabajo es de  $\pm 2$  mm. En caso de no encontrarse en dicho límite se procede a repetir el paso 1 y 2 hasta que se establezca lo mencionado en este punto.
4. Ya que se cumplió el paso tres, se realiza una escarificación a la superficie, inmediatamente se coloca la geomalla (en su caso) en forma circular y al tamaño exacto del molde,
5. El siguiente paso es colocar dos capas adicionales de la forma como se realizó la primera; hasta llenar el molde.
6. Una vez terminada la compactación de las tres capas, se retira el collarín de extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del molde en un espesor de 15mm como máximo; de no ser así se debe realizar nuevamente la compactación del espécimen.
7. Si el material no sobresalió en 15 mm, se enrasa cuidadosamente el material con una regla metálica, con el material excedente se toma el contenido de humedad ( $w$  %); mediante la norma M-MMP-1-04/07; para revisar que este cumpla con la humedad establecida de compactación con aproximación de  $\pm 0.25$  %.
8. Se rellenan todas las oquedades con material fino producto del enrase, ya en el espécimen compactado se desprende de la placa base el molde con el material, se retira del disco espaciador y se determina la masa del molde mas el espécimen, que se registra para futuros cálculos.
9. Así se procede a llenar los tres moldes con las diferentes energías de compactación.

Los pasos siguientes y el cálculo de los parámetros se realiza como se indican en el manual para la obtención del CBR y Expansión (M-MMP-1-11; IMT).

Es así como calculamos el CBR del material con la incrustación de la geomalla al tercio de la capa del material. En la figura 4.20 se observa como queda configurado el suelo para la prueba de CBR.



**Imagen 4.20** Configuración final del material en el molde para de CBR y Expansión;

\*Medidas en mm.

#### 4.3.5.3 Procedimiento de Compactación para Pruebas con dos Materiales.

La metodología para la compactación de los especímenes que tienen dos materiales distintos es estrictamente igual que la explicada en la sección 4.3.5.2.

Los pasos 1,2,3,4 son similares, la diferencia se encuentra en el paso 5; allí al espécimen se le incorpora el segundo material en las dos capas siguientes, la configuración final queda como en la figura 4.20; por lo que el molde al momento de llevarlo a saturar y después probarlo, queda con dos capas inferiores de un material y la capa superior con uno distinto a éste.

En la figura 4.20, la parte A quedará con un suelo distinto al de las partes B y C.

Una vez realizado lo anterior, los pasos 6 al 9 son idénticos que en la sección 4.3.5.2.

Para este procedimiento y por tratarse de dos materiales, cada material se compacta con su humedad óptima; de los moldes que se llevarán a carga solo se obtendrá una curva Penetración-Carga; con el fin de observar el comportamiento de un conjunto de materiales (un suelo subyacente con CBR menor que el CBR del suelo superspuesto). De acuerdo a la figura 4.20, las secciones quedarían de la siguiente forma: la sección "A" con resistencia menor que el que ocupa la sección "B" y "C"; ( $CBR_A < CBR_{BC}$ ).

#### **4.3.5.4 Procedimiento de Compactación para Especímenes con Suelo Blando en la Parte Subyacente.**

La metodología para la compactación de los especímenes que tienen dos materiales y que se emplearan para obtener la variabilidad de compactación sobre suelos blandos es como a continuación se señala:

1. Se ensambla el molde con collarín de extensión a la placa base sin perforaciones, se coloca el disco espaciador dentro del molde, se coloca el papel filtro con el fin de que el material no se adhiera a él y se coloca en una base cubica rígida.
2. Una vez colocado el molde en la base cubica, se toma una de las fracciones del material de consistencia blanda, que se suponga ocupe un cuarto del molde, y se compacta con el pisón, aplicando 56 golpes con el pisón de 2.50 kg.
3. Inmediatamente, se escarifica la superficie para incorporar una segunda capa del mismo material hasta alcanzar un medio del molde. Se verifica mediante el uso del vernier medido en 4 puntos del molde, con aproximación de 0.1 mm, para verificar que la superficie se encuentra a un medio del molde; la tolerancia establecida para este trabajo es de  $\pm 2$  mm. En caso de no encontrarse en

dicho límite se procede a repetir el paso 1 y 2 hasta que se establezca lo mencionado en este punto.

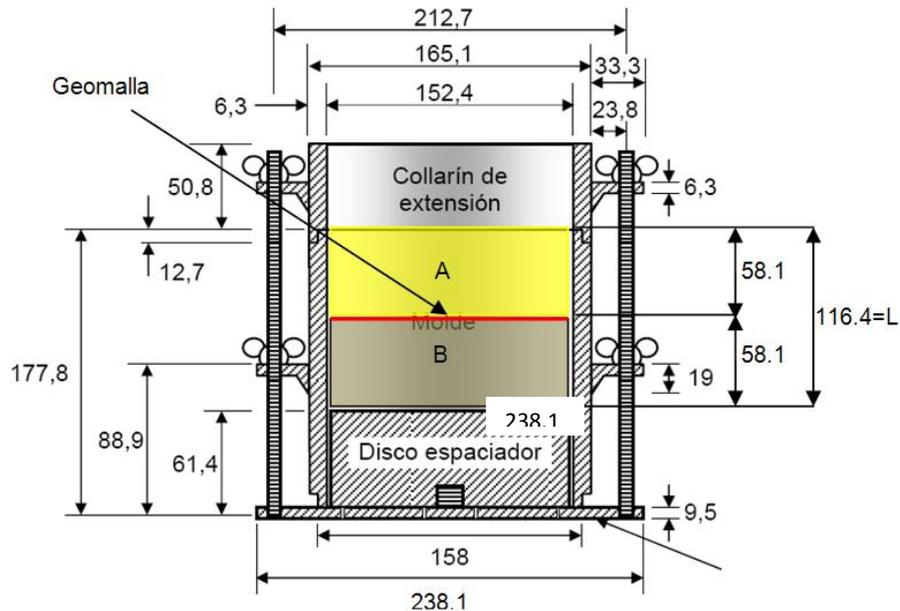
4. Ya que se cumplió el paso tres, se realiza una escarificación a la superficie, inmediatamente se coloca la geomalla (en su caso), en forma circular y al tamaño exacto del molde.
5. El siguiente paso, es colocar dos capas de un material distinto adicionales en la forma en como se realizaron las primeras dos, hasta llenar el molde.
6. Una vez terminada la compactación de las cuatro capas, se retira el collarín de extensión del molde y se verifica que el material no sobresalga del molde en un espesor de 15 mm como máximo; de no ser así se debe realizar nuevamente la compactación del espécimen.
7. Si el material no sobresalió en 15 mm, se enrasa cuidadosamente el material con una regla metálica, con el material excedente se obtiene el contenido de humedad ( $w$  %); mediante la norma M-MMP-1-04/07; para revisar que este cumpla con la humedad establecida de compactación con aproximación de  $\pm 0.25$  %.
8. Se rellenan todas las oquedades con material fino producto del enrase, ya en el espécimen compactado se desprende de la placa base el molde con el material, se retira del disco espaciador y se determina la masa del molde mas el espécimen.

Para esta prueba no se llevará a saturar el molde; si no que se llevará directamente a la carga, la configuración del material queda establecida como se observa en la figura 4.21.

Las dos capas inferiores de un material y dos capas superiores con uno distinto a éste; para este procedimiento y por tratarse de dos materiales, cada material se compacta con una humedad distinta; el suelo inferior se compactará con una humedad mayor a la óptima (aprox. 30-40% mayor); el material superior se compactará con la humedad óptima. Por lo que la prueba de carga solo se realizará para obtener una curva Penetración-Carga; con el fin de observar el

comportamiento de un conjunto de materiales (suelo con  $CBR < 0.5$ ) y un suelo que se establece como una capa de subrasante o sub-base con  $CBR > 10$ .

El punto a considerar en este procedimiento, es verificar si el suelo superior se compacta de una mejor manera con la geomalla que sin ella y ver si afecta la resistencia del conjunto de materiales.



**Imagen 4.21** Configuración final del material en el molde para prueba y obtención de curvas Carga-Penetración para suelos de consistencia blanda en la capa inferior.

#### 4.3.6 Resultados y Análisis de las Pruebas.

Terminadas todas las pruebas; en esta sección se presenta el análisis de los datos recolectados y se exhibe un resumen de los resultados obtenidos de la serie de pruebas.

1.- En primera instancia; se realizó el ensaye de 3 especímenes, del **Suelo "A"** (CH); siguiendo el procedimiento de la sección 4.3.5.2; la humedad con la que se configuraron los especímenes fue la óptima para los tres casos, siendo 29%. La energía de compactación se dio estableciendo un material de subyacente o terraplén.

La configuración de los moldes se realizó por medio de la norma M-MMP-1-11/07. (SCT Valor de Soporte California y Expansión en % en Laboratorio) y así mismo se calculó el CBR y la Expansión; Cabe señalar que se colocó una geomalla biaxial Tensar BX 1500 en el tercio superior, (la ficha técnica aparece en el apéndice A de este documento). De forma similar a las secciones pasadas, se obtuvieron los resultados de los parámetros sin refuerzo establecidos en la tabla 4.13.

De manera conjunta y análoga se realizaron las pruebas con el **suelo "B"** (ML), la geomalla que se utilizó en estos especímenes fue la geomalla TriAx-140 (ver ficha técnica en apéndice A).

Los resultados de las pruebas de CBR y Expansión de los dos materiales con refuerzo de geomalla aparecen en la tabla 4.15.

<b>VALOR / SUELO</b>	<b>SUELO "A" (CH)</b>	<b>SUELO B (ML)</b>
CBR <sup>[1]</sup> %	1.3%	13.97%
EXPANSIÓN %	1.20%	0.02%

[1]Especimen compactado dinámicamente de acuerdo a la Norma M-MMP-01-11/11.

**Tabla 4.15** Resultado de CBR y Expansión para los suelos A y B (Ensayes con refuerzo).

En la tabla 4.16 se muestran los valores representativos de los ensayos de los suelos A y B, tanto reforzados con geomalla como no reforzados.

<b>COMPARATIVA DE PRUEBAS REFORZADAS Y NO REFORZADAS</b>					
	<b>SUELO A; CH (REFORZADO)</b>		<b>SUELO A; CH (NO REFORZADO)</b>		
	CBR (%)	Masa Vol. Seca $\gamma_d(\text{kg/m}^3)$	CBR (%)	Masa Vol. Seca $\gamma_d(\text{kg/m}^3)$	$\Delta$ (%) CBR
ESPECIMEN 1	1.3	1030	1.2	1028	8.3
ESPECIMEN 2		1187		1184	
ESPECIMEN 3		1340		1331	
	<b>SUELO B, ML (REFORZADO)</b>		<b>SUELO B; ML (NO REFORZADO)</b>		
ESPECIMEN 1	13.97	1491	13.8	1485	1.2
ESPECIMEN 2		1578		1567	
ESPECIMEN 3		1692		1676	

**Tabla 4.16** Comparativa de pruebas de CBR reforzado/No reforzado, en Suelos A y B.

Como se puede observar; para el suelo "A" (arcilla de alta plasticidad); el parámetro de CBR fue de 1.3% cuando se reforzó con geomalla; que comparado con el CBR de 1.2% sin refuerzo, existe un incremento de valor del 8.3% según nuestra hipótesis. Además se observó una variación de 1.39% a 1.10% en el valor de expansión de un suelo con refuerzo comparado a un suelo sin refuerzo; la reducción es del 39%. En las fotos siguientes se aprecia la colocación de las geomallas en los especímenes ensayados.



**Foto 13** Colocación de geomalla triaxial sobre espécimen de Limo-arenoso. (Suelo "B").



**Foto 14** Colocación de Geomalla biaxial sobre espécimen de Arcilla. (Suelo "A").



**Foto 15** Ensayo de especímenes de Arcilla de alta plasticidad. (Suelo “A”).

Para la obtención de CBR con refuerzo.

2.- Siguiendo con la presentación de los resultados, se realizaron pruebas de carga-penetración a tres especímenes; estos se configuraron de la forma siguiente; y de acuerdo al procedimiento que se detalla en el apartado 4.3.5.3 (Procedimiento de Compactación para Pruebas con dos Materiales); Los tres elementos se conforman en las dos capas inferiores con el suelo “B” (Limo Arenoso) con CBR de 13.8 (compactado con humedad óptima y saturado); en la capa que ocupa el tercio superior del molde, se colocó el suelo “C” (Arena con limo SP-SM) con CBR de 58% (compactado con humedad óptima y saturado); Las humedades con las que se compactaron los materiales son las óptimas calculadas mediante la prueba AASHTO, que se utilizó para calcular la masa volumétrica seca máxima en cada material, siendo 17% y 6.5 % de los suelos “B” y “C” respectivamente. En la figura 4.22 se muestra la configuración de los moldes antes de su prueba de carga.

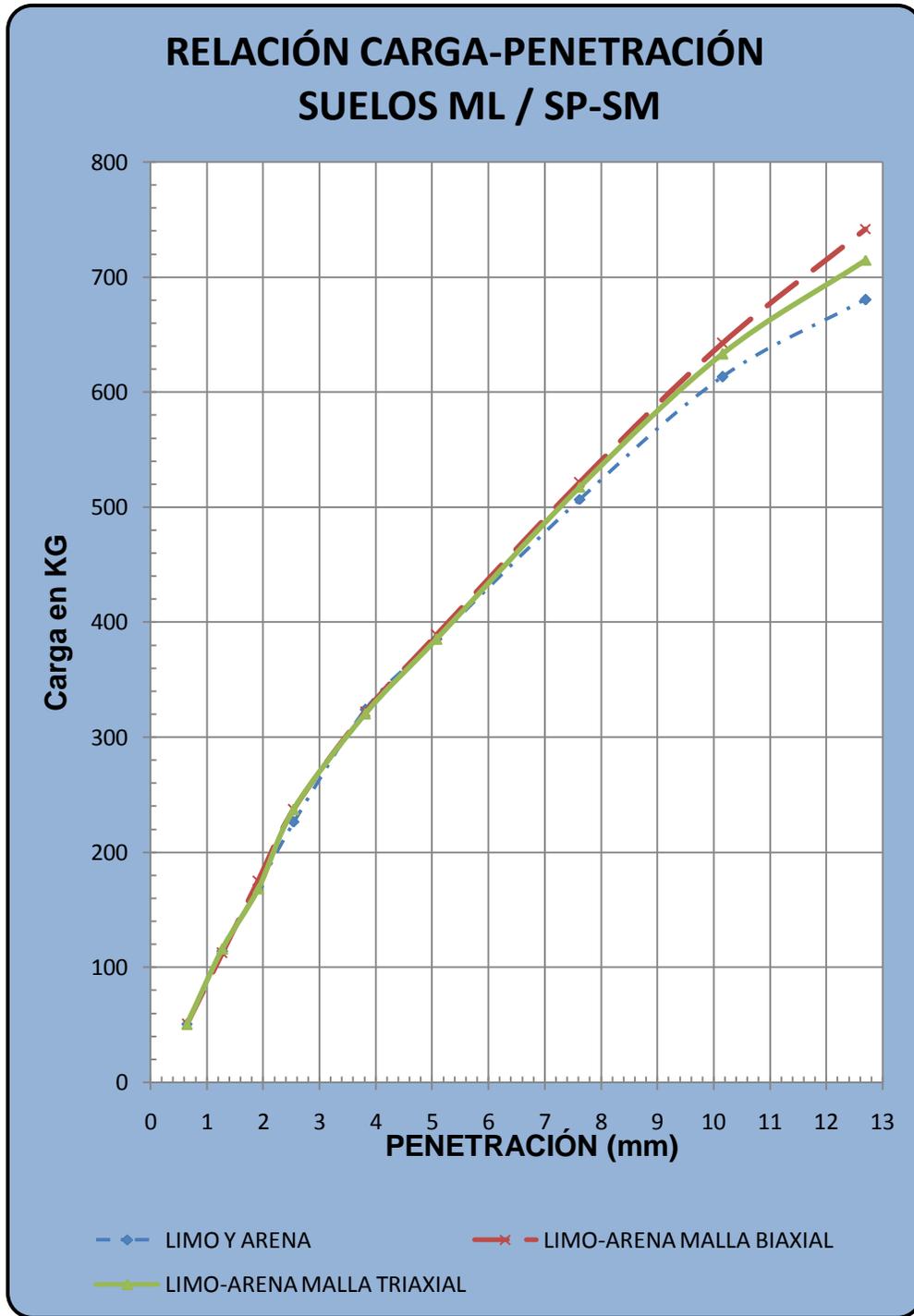
Al espécimen “1”; NO se le colocó la geomalla en la transición entre suelos; al espécimen 2 y 3 se les colocó una geomalla biaxial TENSAR BX 1500 y una geomalla triaxial TENSAR TriAx-140. En la foto 16, se observa el desmontaje de un espécimen de esta prueba cuando se sometió a carga; en donde se puede apreciar el estado de la geomalla después de la carga.



**Figura 4.22** Especímenes probados con dos materiales. (ML/SP-SM).

En la gráfica 1, se presentan las curvas de carga-penetración de los tres moldes ensayados mediante este procedimiento, las curvas en los tres casos son relativamente iguales, la trayectoria de 0,0m a 5,0 mm de penetración prácticamente están traslapadas; presentándose una misma carga para una misma deformación en los tres casos.

A partir de 5,0 mm las curvas indican que la carga del espécimen sin refuerzo comienza a estar por debajo de las curvas de los especímenes con refuerzo; así pues presenta una menor resistencia en comparación con los especímenes que tenían refuerzo, como se puede ver, la resistencia del suelo al final de la penetración (12,70 mm) la geomalla biaxial presento mayor carga que la geomalla triaxial y el molde sin refurezo.



**Gráfica 1** Relación carga-penetración (especímenes de dos materiales) ML/SP-SM.



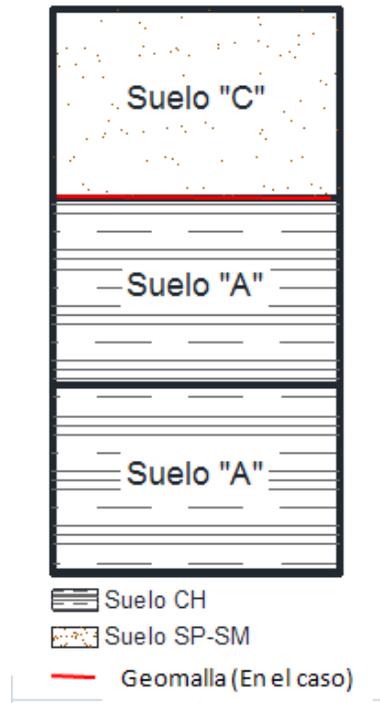
**Foto 16** Especímenes probados con dos materiales. (ML/SP-SM).

Desmontaje del molde reforzado con geomalla triaxial.

3.- En la tercera parte de la presentación de resultados, se resumen los ensayos realizados de carga-penetración a dos especímenes; se configuraron de la forma siguiente; y de acuerdo el procedimiento de la sección 4.3.5.3 (Procedimiento de compactación para pruebas con dos material); Los dos moldes se conforman con el suelo “A” (Arcilla de Alta Plasticidad) con CBR de 1.3% (compactado con humedad óptima y saturado) en las dos capas inferiores; en la capa que ocupa el tercio superior del molde, se colocó el suelo “C” (Arena limosa SP-SM) con CBR de 58% (compactado con humedad óptima y saturado).

Las humedades con las que se compactaron los materiales son las óptimas calculadas mediante la prueba AASHTO; hallándose 29% y 6.5 % de los suelos “A” y “C” respectivamente.

Al espécimen 1; NO se le colocó la geomalla en la transición entre suelos; al espécimen 2 se les colocó una geomalla biaxial TENSAR BX 1500. La gráfica 2 nos indica las trayectorias de Carga-Penetración del material con refuerzo y sin él. En la figura 4.23 se observa la configuración final del espécimen antes de ser ensayado a la carga; en la foto 17 se observa la geomalla biaxial una vez que se realizó la prueba sobre estos materiales.



**Figura 4.23** Especímenes probados con dos materiales. (CH/SP-SM).

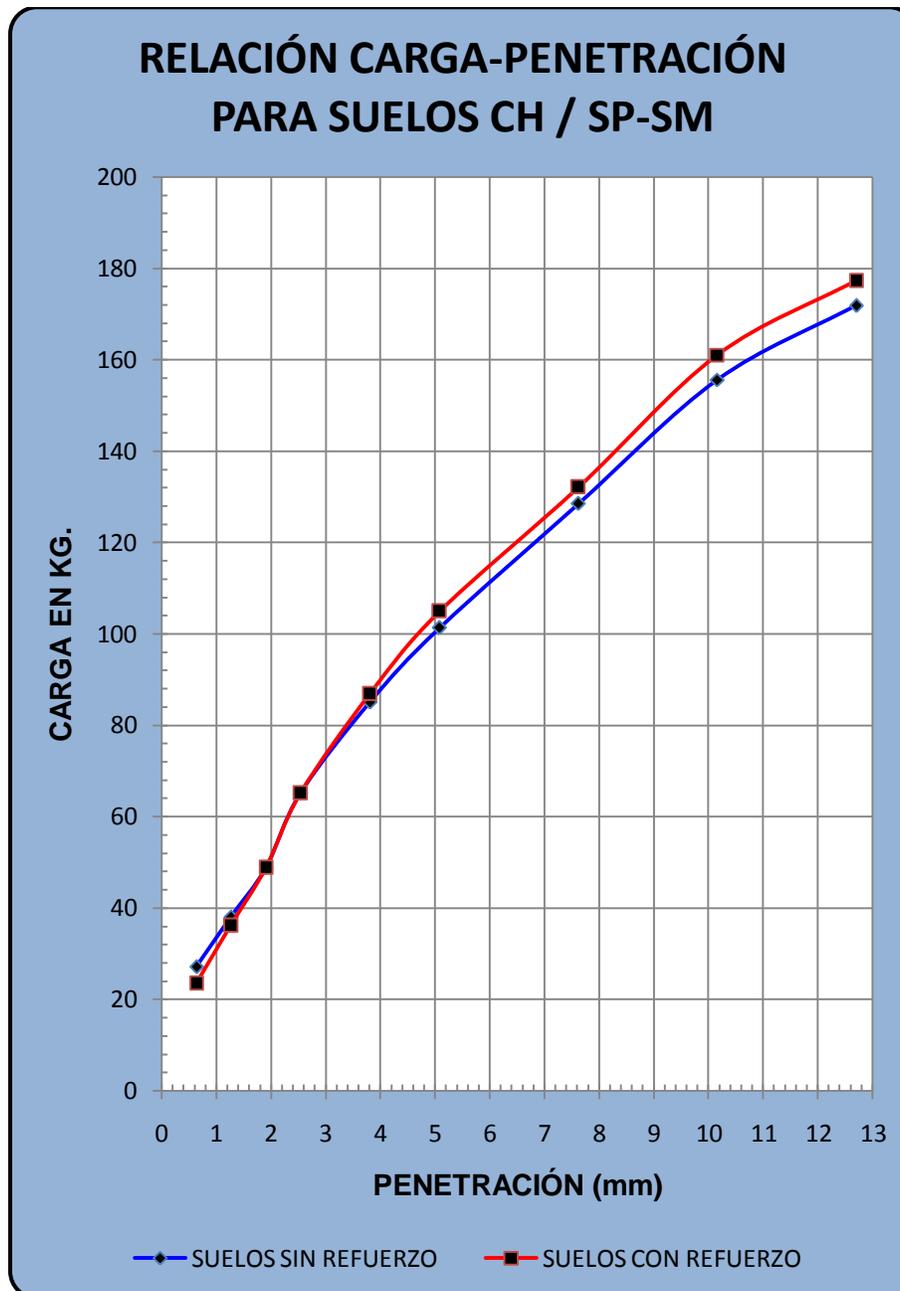


**Foto 17** Especímenes probados con dos materiales. (CH/SP-SM).

Desmontaje del molde reforzado con geomalla Biaxial.

En la gráfica 2; se establecen las trayectorias de carga-penetración tanto para el espécimen reforzado y No reforzado, se mira como las curvas al inicio de la penetración se encuentran traslapadas hasta una penetración aproximada de 4.0 mm; a partir de ese valor, se observa como la carga del espécimen sin refuerzo es

menor que la carga comparada con el espécimen que tenía refuerzo; la resistencia del suelo al final de la penetración (12.70 mm); el molde con geomalla biaxial aporta un incremento en la resistencia total del ensayo de aproximadamente 20.0 kg.



**Gráfica 2** Relación carga-penetración (especímenes de dos materiales) CH/SP-SM.

4.-Finalmente, se muestran los resultados de la cuarta y última etapa de nuestro análisis experimental, en esta fase se consideraron dos especímenes; se configuraron de acuerdo a la sección 4.3.5.4; los materiales que se ocuparon son; Arcilla de alta plasticidad (suelo A) con CBR de 1.3% y (Arena con limo SP-SM) con CBR de 58%. (Materiales compactados a humedades óptimas y saturados).

El proceso se realizó de la siguiente manera; al molde 1 y 2; se le compactaron en las primeras dos capas, con el suelo arcilloso ("A"); con una humedad de 30 a 35 por ciento más que la humedad óptima, al molde 1, NO se le colocó la geomalla al terminar la compactación de la arcilla, al molde 2, se les colocó una geomalla biaxial TENSAR BX 1500; el molde se llenó completamente con dos capas del suelo "C", las cuatro capas se compactaron con el pisón de 2.50 kg a 56 golpes por capa. En la figura 4.24 se observa la configuración final del molde.



**Figura 4.24** Especímenes probados con dos materiales. (CH (saturado) / SP-SM).

Para esta prueba se realizó una prueba adicional; y con el fin de tener certeza de nuestra suposición. Se procedió a compactar un molde de verificación, este molde se compactó con el procedimiento; M-MMP-1-11 (SCT); se procedió a compactar un espécimen con la energía mayor para un material de terraplén del suelo "A"

(suelo arcilloso), con 3 capas de material y 56 golpes cada una. Se pesó el espécimen y se llevó a ensaye para obtener su gráfica carga-penetración y obtener el CBR bajo estas condiciones.

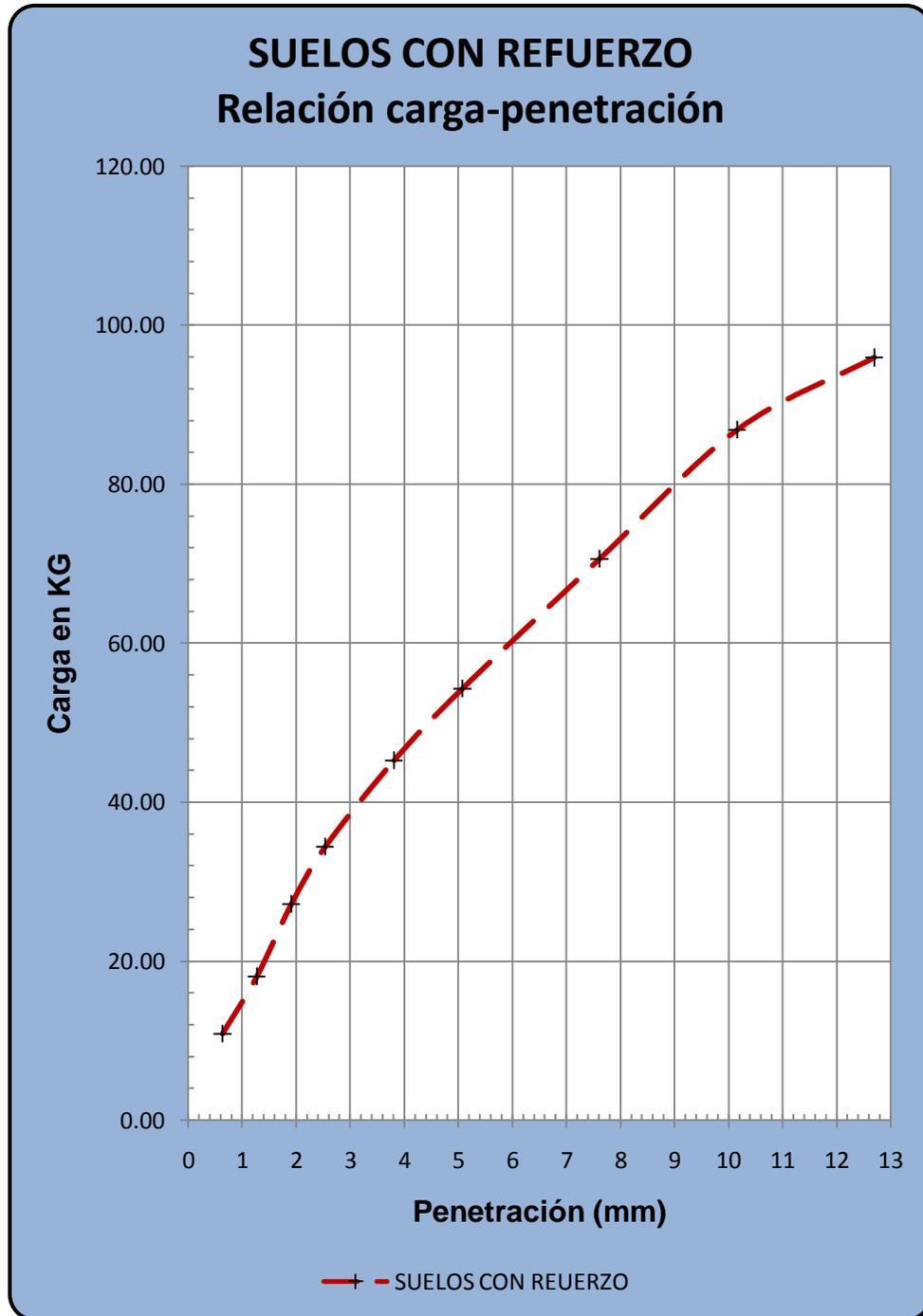
Lo que se encontró fue que el pistón de penetración se incrustaba a todas las magnitudes (mm de la tabla de especificación del manual M-MMP-1-11), sin que se presentara una variación en la carga; se registró un valor de cero en todas las lecturas. Por lo que el material compactado a esa humedad presenta un CBR de cero. Se realizó esta prueba con el fin de verificar que el suelo subyacente a nuestra prueba tuviera un valor de  $CBR < 0,5\%$ .

Los resultados de la prueba del material (suelo A), compactado con una humedad de 38% en la parte inferior del molde y un material de buena calidad con CBR de 58% se presentan a continuación:

En la gráfica de carga-penetración de cada espécimen (gráfica 3 y 4), se observa como los elementos siguen una trayectoria estándar a la de cualquier suelo.

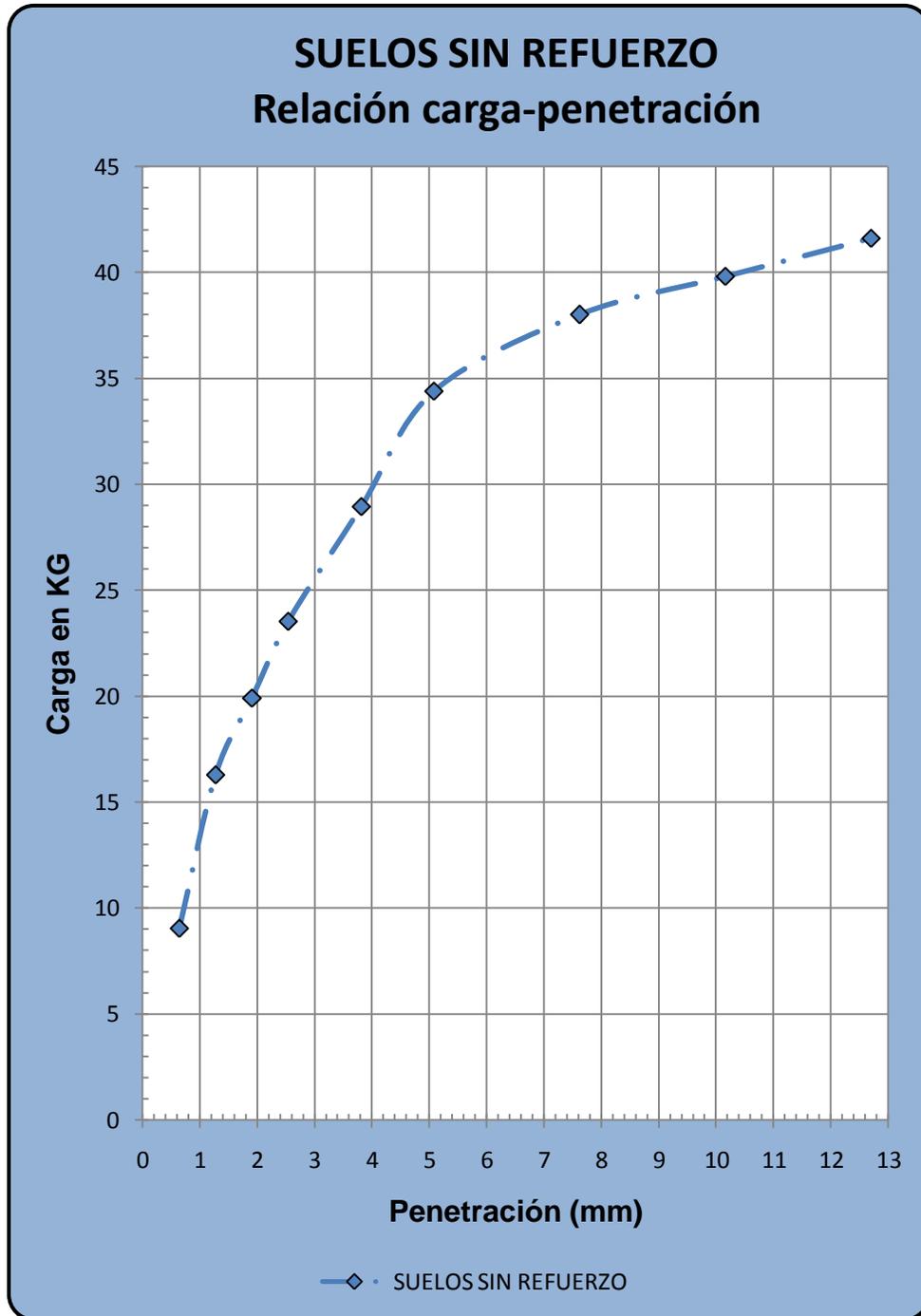
La gráfica que muestra la comparativa (gráfica 5), contiene las dos curvas de carga-penetración, en ella se observa como el espécimen al que se colocó la geomalla biaxial presenta una resistencia por arriba de la que presenta el elemento que no tuvo refuerzo.

En la gráfica 5; se puede verificar como para el intervalo de 0.0 mm a 1.27 mm de penetración se presenta el mismo comportamiento ante una deformación baja; sin embargo, a partir de esa penetración el comportamiento es sumamente diferente; presentándose un aumento de resistencia en el elemento que se reforzó con geomalla biaxial. Al final de la prueba a una deformación de 12.70 mm la carga acumulada del espécimen con refuerzo es un poco mayor a dos veces que la presentada en el elemento sin refuerzo.



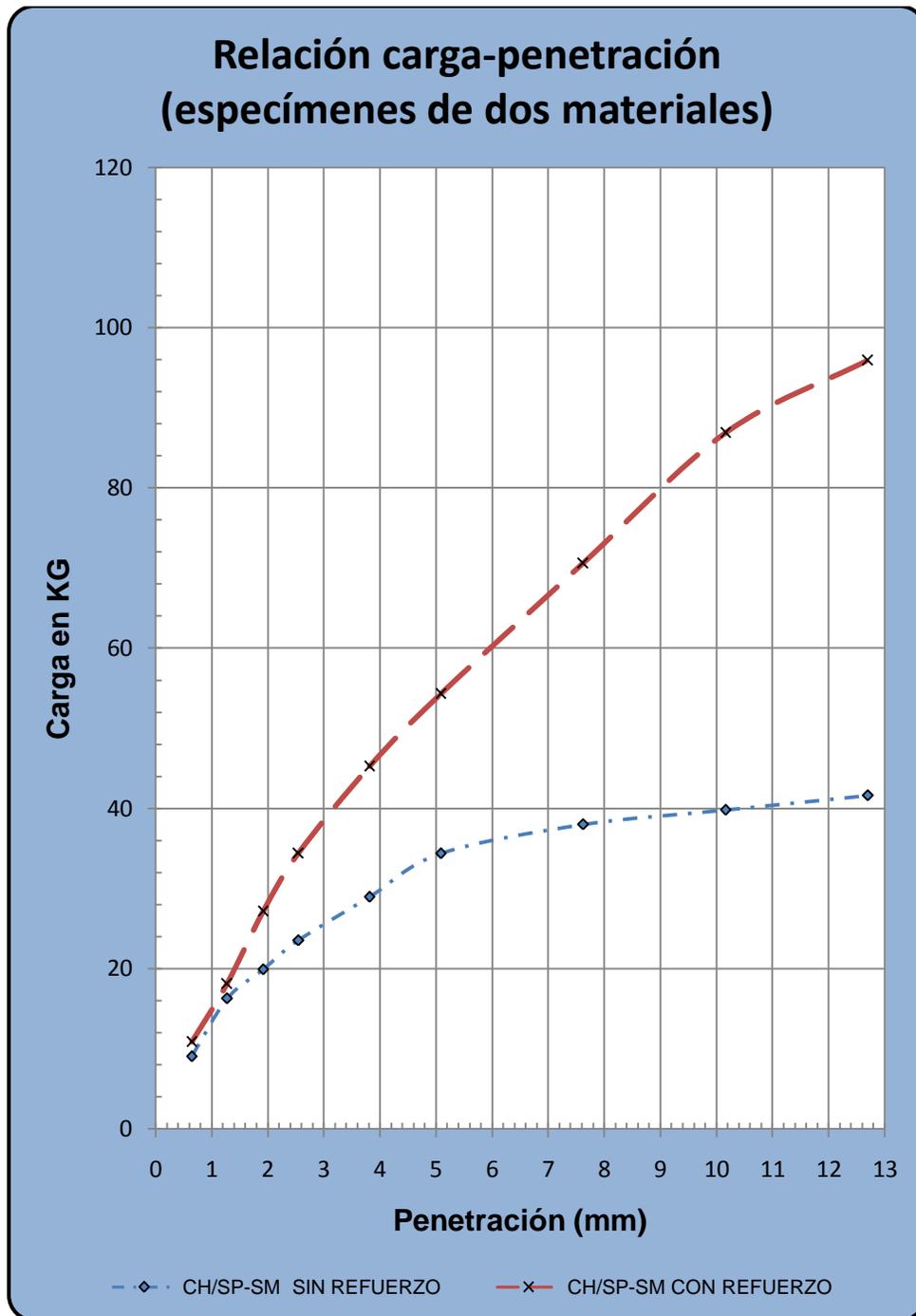
**Gráfica 3** Relación carga-penetración (especímenes de dos materiales)

CH (saturada)/SP-SM. Suelos con refuerzo.



**Gráfica 4** Relación carga-penetración (especímenes de dos materiales)

CH (saturada)/SP-SM. Suelos sin refuerzo.



**Gráfica 5** Relación carga-penetración (especímenes de dos materiales)

CH (saturada)/SP-SM. Suelos con y sin refuerzo.



Foto 17 Compactación de espécimen con dos materiales. (CH/SP-SM).

En esta prueba y por encontrar una notable variabilidad en la gráfica carga-penetración, presentamos los valores de densidades y humedades del ensaye, y la comparativa del CBR, con el fin de conocer las posibles causas de dichos resultados.

COMPARATIVA DE PRUEBAS REFORZADAS Y NO REFORZADAS DEL CONJUNTO DE SUELOS A Y C								
	SUELO REFORZADO			SUELO NO REFORZADO			$\Delta$ (%) Masa Vol. Humeda $\gamma_d(\text{kg/m}^3)^{[2]}$	$\Delta$ (%) CBR
	CBR (%) <sup>[1]</sup>	Masa Vol. Humedo $\gamma_d(\text{kg/m}^3)^{[2]}$	Humedad (%)	CBR (%) <sup>[1]</sup>	Masa Vol. Humedo $\gamma_d(\text{kg/m}^3)^{[2]}$	Humedad (%)		
SUELO A (CH)	1.41	1503	38.10	2.21	1542	38.17	2.59	56.74
SUELO C (SP-SM)			6.51			6.54		

[1] CBR obtenido mediante el procedimiento ASTM D-1883; se considera el CBR menor de las penetraciones de 2.54 y 5.08 mm

[2] Masa volumétrica húmeda con los dos materiales medida en laboratorio.

Tabla 4.17 Comparativa de pruebas de CBR reforzado/No reforzado, en especímenes con suelos “A” saturado y suelo “C”.

En la Tabla 4.17, en general se observa que no hubo un aumento significativo en la humedad de los materiales. La masa volumétrica húmeda presenta una variación del 2.6% aproximadamente.

En la tabla se indica el valor de CBR; (valor del parámetro de los materiales en conjunto) para los dos especímenes, este cálculo se hizo mediante el procedimiento ASTM D-1883; como la idea es comparar los dos especímenes a una misma energía de compactación y características similares se puede obtener

este valor para cada uno. El valor de CBR se encontró para el esfuerzo menor obtenido a 2.54 ó 5.08 mm de penetración. El valor del CBR para el espécimen reforzado fue mayor en 56.7% que el obtenido en el espécimen que no se reforzó.

#### **4.3.6 Conclusiones de Pruebas Realizadas.**

En esta sección se concluye con un análisis de los resultados obtenidos. Los primeros resultados de la etapa de materiales con refuerzo, nos indicaron que los suelos ensayados, tanto suelo blando (arcilla de alta plasticidad) con  $CBR < 2$  y suelo de buena calidad con  $CBR > 10$  (Limo arenoso); que cumple con especificaciones para material de terraplén (tabla 3.3); el agregar la geomalla dentro del suelo como refuerzo no colaboró en gran medida, como se pudo observar en la tabla comparativa 4.16; la aportación de la geomalla a la resistencia por la carga del pistón fue prácticamente nula. Los parámetros mecánicos CBR en ambos casos tuvieron una variación mínima; en el suelo con  $CBR > 10$ , el efecto sobre este valor se puede decir que no presenta cambio alguno con el refuerzo de la geomalla.

En el suelo blando (CH) podemos comentar que, la geomalla tuvo una influencia en el parámetro de la expansión en un 17% de reducción; el incremento de CBR fue de 8%, del suelo con refuerzo comparado con el elemento que no tenía.

Por lo tanto, se puede concluir que los materiales presentan la siguiente tendencia; cuando el suelo es compactado con humedades óptimas y se le superpone el mismo material, el añadir la geomalla dentro del mismo, representa un incremento menor en el valor de CBR. Si requiriéramos de un aporte mayor, por ejemplo en el caso del suelo blando veríamos que aunque ayudó a la resistencia (CBR) en 8%, se puede decir que el suelo para efectos prácticos no tuvo repercusión alguna al colocarle el refuerzo con geomalla.

En la parte 2 del análisis experimental, los moldes se compactaron con humedades óptimas, que nos llevaron a tener al menos una excelente compactación de los materiales. Para el molde donde se utilizó el limo arenoso en la parte inferior, la geomalla ayudó en medida que el pistón de penetración se

incrustaba en el suelo, haciendo así la obtención de un refuerzo potencial; sin embargo dentro de los rangos donde se calcula el CBR, que son a 2.54 mm y 5.04 mm de penetración (gráfica1); los valores fueron prácticamente similares entre el suelo con refuerzo que sin él.

Cabe señalar que en esta parte se probaron los materiales con los dos tipos de geomalla, que nos dio a conocer que la geomalla biaxial Tensar BX-1500 proporciono una resistencia mayor que la geomalla triaxial Tensar Triax TX-140 al terminar la penetración (12,70 mm).

La aportación de las geomallas se dio con mayor intensidad cuando el pistón superaba la penetración de 8.0 mm; que se puede atribuir a que la geomalla tomaba el esfuerzo requerido por la aplicación de la fuerza, y esta a su vez la distribuía de manera más uniforme al suelo subyacente.

Comentando los valores obtenidos en la tercera parte de este experimento, aportaremos de manera general que el efecto fue muy parecido al presentado en la segunda etapa (arena en la parte superior y limo en la parte inferior). Sin embargo, el esfuerzo al que la malla presentó un impedimento a la penetración del pistón en la prueba con arcilla, se dio de manera anticipada, presentándose aproximadamente a los 5 mm.

Anexando, comentaremos que a medida que el pistón penetraba, la trayectoria de carga del espécimen con refuerzo (geomalla Tensar BX 1500) se separaba a la trayectoria de la curva sin refuerzo. Para concluir con esta segunda etapa, indicaremos que, al término de la prueba a una penetración de 12.70 mm, las curvas de la gráfica 2, con arcilla y arena presentaron un mayor incremento que las presentadas con el limo y la misma arena de la gráfica 1.

La cuarta y última etapa, fue dentro de los ensayos la más interesante en cuanto a resultados obtenidos se refiere, como se observa en la gráfica de Carga-Penetración (gráfica 5); los suelos sin refuerzo nos proporcionaron un valor máximo a los 12.70 mm de 42 kg.; en lo que respecta al suelo del elemento

reforzado fue de 98 kg.; lo que representa un poco más del doble de la carga recibida en el suelo reforzado.

Respecto a la masa volumétrica de los elementos, se puede mencionar que el elemento con suelos reforzados, este valor sufrió un aumento del 2.6% que la masa volumétrica sin refuerzo; (los dos especímenes se compactaron con la misma energía, la misma humedad “tabla 4.17” y bajo el mismo control), esto se puede atribuir a que el suelo arenoso (suelo “C”) se compacto mejor por arriba de la geomalla, estabilizando de mejor manera el suelo CH; de aquel que no tenia refuerzo; el efecto estabilizador lo complemento plenamente la geomalla.

Aquí se supuso obtener un CBR conjugado (con dos materiales en un mismo espécimen), en la tabla 4.17 se muestra el incremento de 56% en el parámetro del elemento reforzado, respecto al que careció del mismo, lo cual implica que el suelo compactado por arriba de la geomalla alcanzo un mayor grado de compactación, además de que la geomalla proporcionó un aumento en la resistencia del mismo, estabilizando y reforzando el suelo superpuesto y reduciendo el efecto de las cargas sobre el suelo blando.

En la foto 18, se muestran las geomallas que se utilizaron para esta serie de ensayos; todas fueron de la marca Tensar.



**Foto 18** Geomallas utilizadas en los ensayos (marca Tensar).

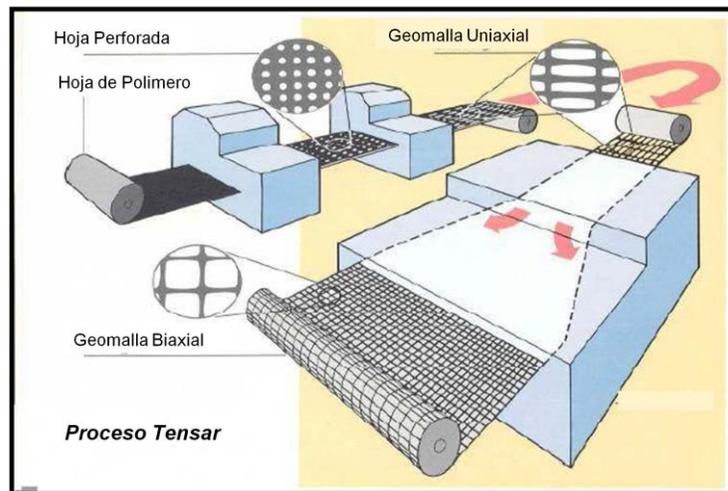
## CAPÍTULO V

# FABRICACIÓN, TRANSPORTE Y EJECUCIÓN DE TRABAJOS CON GEOMALLAS.

Ya tratados los aspectos fundamentales de nuestro tema; explicaremos de manera rápida pero precisa cual es el proceso de fabricación, transporte y colocación de geomallas, en trabajos de refuerzo y estabilización.

### 5.1 Fabricación de Geomallas.

En este apartado platicaremos rápidamente como se fabrican las geomallas que se utilizaron en el estudio. Las geomallas son del tipo extruidas; fabricadas en polipropileno o polietileno de alta densidad a través de la perforación de láminas de estos materiales, lo que genera arreglos muy estables en su conformación.



**Figura 5.1** Esquema de fabricación de geomallas uniaxiales y biaxiales.

Tensar International 2012.

En la figura 5.1 se muestra esquemáticamente como a partir de una hoja de polipropileno y mediante corte por prensa se realiza el extruido.

Para el caso de las geomallas en polietileno, el proceso de fabricación es el mismo. Inicialmente se tienen láminas del material donde se realizan unas perforaciones, cuadradas o elípticas, de forma uniforme y controlada sobre toda la lámina, según el caso.

La lámina perforada recibe un estiramiento en una o dos direcciones, el cual se realiza a temperaturas y esfuerzos controlados para evitar la fractura del material mientras se orientan las moléculas en el sentido de la elongación.

## 5.2 Almacenamiento y Transporte de Geomallas.

La producción de las geomallas se presenta en forma de rollo, lo que implica que estos sean estibados en racks que no excedan la estiba en cuatro rollos de 90 cm de diámetro externo; en la obra antes de su colocación pueden ser colocados sobre el suelo. En las imágenes siguientes se muestra la forma correcta de almacenar y estibar los rollos de geomalla; cabe aclarar, que por las características de los materiales de las geomallas; el almacenamiento puede ser abierto por un tiempo prolongado.



**Figura 5.2** Estiba de rollos de geomalla en obra.

Tensar International 2012.



**Imagen 5.3** Transporte en rack de geomallas.

El transporte en el lugar de fabricación se realiza mediante un rack, evitando que el material este izado en un solo punto; a fin de conservar la directriz del rollo de forma regular. El transporte a obra se realiza en plataformas con las dimensiones necesarias para que el rollo no sufra elongaciones fuertes, los rollos deben transportarse de forma completamente horizontal.

### **5.3 Ejecución de Trabajos con Geomallas.**

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (USACE); especifica las siguientes variables en la construcción del pavimento con refuerzo geosintético; este proceso puede requerir modificaciones a los procedimientos estándar de construcción de carreteras, principalmente para prevenir el daño a los geosintéticos.

La construcción del pavimento sobre suelos muy blandos requiere una consideración especial, tanto para proteger los geosintéticos, como para evitar la sobrecarga del tráfico de la construcción. En los siguientes párrafos se describe el procedimiento recomendado para llevar a cabo la construcción de pavimentos con geosintéticos de refuerzo.

1.- Instalación del geotextil; (cuando sea el caso). Antes de la instalación del geotextil, el sitio debe ser limpiado, las raíces arrancadas, y realizar la excavación para alcanzar la resistencia de diseño; a menos que el CBR del subsuelo sea menor que 2,0 que se recomienda se deje la vegetación.

Si el subsuelo tiene un CBR de 2.0 o mayor, la capa de desplante debe ser compactada para identificar cualquier material inadecuado que puede dañar el geotextil. Elementos inadecuados tales como tacones de árbol, raíces, etc. deben ser eliminados si es práctico.

Si el CBR del suelo es inferior a 2.0; los materiales superficiales como la vegetación y raíces pueden ser ventajosas y no deben ser eliminados; cuando se tratan de absorber costos por desmonte y despalle sobre todo si se trata de un camino de muy bajo tránsito.

Pequeñas secciones de geomalla se pueden utilizar para cubrir las raíces, troncos o tallos antes de la instalación del geotextil para reducir potencialmente la perforación en el mismo. Los surcos superficiales de 3 pulgadas o más deben ser llenados con material selecto.

La capacidad de los geotextiles no tejidos para estirar los hace adecuados para la separación en explanadas heterogéneas. Para subsuelos muy blandos (CBR <1), la movilidad del sitio puede ser limitada, incluso para el tráfico de los peatones; geomallas rígidas se pueden utilizar con éxito para recuperar plataformas de desplante, y para facilitar la colocación del geosintético de separación y las capas de refuerzo.

En esta aplicación, la geomalla se desenrolla a lo largo de los bordes exteriores de la vía de circulación para proporcionar al personal de la construcción un paso provisional para desenrollar y colocar los materiales de refuerzo. El geotextil debe ser acomodado a mano, por delante de relleno, directamente sobre el suelo de desplante.

Para suelos blandos superficiales con (CBR > 0.5), el geotextil es colocado en la dirección en la que el agregado se propague. Para suelos profundos y muy blandos (CBR < 0.5), el geotextil se coloca transversal a la dirección de la vía de circulación. La tabla 5.1; se debe utilizar para determinar la superposición adecuada, y se deben superponer las telas de tal modo que la construcción de la base no altere o perturbe el mismo.

La distancia mínima de superposición es de un pie (30 cms); es necesario incluso si las intersecciones de geotextil se cosen. El geotextil se puede sostener en su lugar con grapas, alfileres, o sacos de arena durante condiciones de viento.

<b>Requerimientos de superposición (empalme) para geosintéticos en pavimentos*</b>			
CBR	≤ 1.0	1.0 < CBR ≤ 4.0	CBR > 4.0
Distancia de Traslape	3 Pies (90 cm)	2 Pies (60 cm)	1 Pies (30 cm)

\* Se debe determinar la aplicabilidad del geosintético y el grado de resistencia del subsuelo

**Tabla 5.1** Requerimientos de traslape para geosintéticos (USACE).

## 2.- Instalación de geomalla

Antes de la instalación de la geomalla, el sitio debe ser limpiado, las superficies arrancadas, y excavado a la resistencia de diseño si no se hizo previamente para la colocación de geotextil cuando aplique.

Como se señalo anteriormente; las pequeñas secciones de geomalla se pueden utilizar para cubrir las raíces, troncos o tallos antes de la instalación del geotextil y así reducir el potencial de perforación en la tela.

La geomalla debe ser desenrollada a mano, por delante del relleno, directamente sobre el suelo se desplante, subrasante, sub base o geotextil (si es necesario). En la Imagen 5.1 se observa el tendido de geomalla sobre una superficie de subrasante completamente plana y compactada; y por tratarse de un suelo con buena resistencia CBR > 4 no se utiliza geotextil.



**Imagen 5.1** Tendido a mano de geomallas; para reforzar subrasante.  
Se observa la superficie plana.

Para espesores con base superiores a 14 pulgadas, la geomalla debe ser colocada en el medio de la capa de agregado; para que funcione como refuerzo.

Para superficies blandas con ( $CBR > 0.5$ ), la geomalla es colocado en la dirección en la que las capas superiores se extenderán.

Para superficies muy blandas ( $CBR < 0.5$ ), la geomalla se coloca transversalmente a la dirección de la vía de circulación. La tabla 5.1; se debe utilizar para determinar los requisitos de traslape adecuados, los empalmes se debe colocar de tal manera que la construcción de la base no perjudique el mismo cuando se realiza el extendido.

La geomalla puede ser mantenida en su lugar con grapas, clavos, o bolsas de arena para condiciones de viento.

3.- Colocación global. Los vehículos no deben ser conducidos en los geosintéticos sin protección antes de la colocación del agregado. Para subsuelos muy blandos ( $CBR < 1.0$ ), un procedimiento de construcción eficaz es instalar el agregado más grueso al principio. Así, el agregado deberá ser colocado en la centro del carril de tráfico con un espesor mayor que el de diseño final. El peso de este material comenzará a desplazar el exceso de agua del subsuelo y se comenzará la

consolidación del mismo. Esto resulta en un aumento en la resistencia del material en general por debajo de la vía de circulación.

Después de que la cantidad requerida de agregado de la calzada y los hombros se ha colocado en el centro del carril de tráfico, el exceso de agregado puede extenderse lateralmente a los hombros de la vialidad hasta que el espesor de diseño se alcance.

A continuación, el material de agregado se puede compactar para el espesor de diseño. Se debe tener cuidado para trabajar el agregado en la dirección de los traslapes de los geosintéticos al momento de tenderlos con tractor o motoconformadora.

Para subsuelos con CBR entre 1.0 y 3.0; el espesor completo de diseño puede extenderse desde el centro de la calzada hacia los bordes exteriores.

Para subsuelos con CBR mayor que 3.0; los procedimientos estándares de construcción de carreteras se pueden aplicar. Las propiedades de geomallas que cumplen con los requerimientos de las tablas 3.1. ó 3.2 están diseñadas para soportar la instalación en aplicaciones típicas de pavimentos.

Las obras de construcción han demostrado que las condiciones extremadamente duras pueden requerir la reconsideración de la especificaciones genéricas para geotextiles y geomallas.

Un ejemplo de entornos adversos incluyen la colocación de geomallas o geotextiles sobre una gran cantidad de raíces o tacones de árboles, el uso de gran tamaño en agregados ( $D_{50} > 3 \text{ cm}$ ), o alturas de descarga de más de 12 pies.

#### **5.4 Detalles de Colocación del Relleno.**

Cuando se utiliza la geomalla para estabilizar, el espesor de relleno requerido depende de la resistencia del subsuelo, la calidad del relleno utilizado y del volumen de tráfico esperado. Para minimizar los posibles daños a la geomalla

durante la compactación de la base, la capa inicial debe ser preferiblemente de por lo menos 6" (15 cms); pero nunca menor de 4" (10cms). El espesor inicial utilizado debe basarse en la resistencia del suelo de desplante y en la carga impuesta por la maquinaria de colocación y compactación. Cuando los suelos sean muy blandos, es prudente colocar el relleno sobre el suelo estable y después empujarlo hacia adelante sobre la geomalla, como se observa en la figura 5.2.

La pala del tractor o motoconformadora debe inclinarse ligeramente hacia arriba y levantarse a medida que cada carga se empuja en el borde delantero del avance del relleno. Una vez que se haya colocado la geomalla y el relleno sobre la misma, pueden utilizarse métodos normales de compactación.

En la imagen 5.2, se muestra como el transporte coloca el material sobre una capa del mismo previamente extendido, sin circular sobre la geomalla. En la imagen 5.3 se observa el extendido con motoconformadora cuando se trata de un suelo con  $CBR > 4$  y donde se puede realizar tanto el extendido como la compactación de forma tradicional. Por ultimo en la imagen 5.4 muestra un tractor colocando el material a un espesor de diseño, se puede ver como el espesor es mucho mayor, pero por tratarse de un suelo blando se requiere colocar de esa manera.



**Imagen 5.2** Descarga de material, se observa que el transporte no toca el geosintético.



**Imagen 5.3** Tendido con motoconformadora del centro hacia los hombros de la calzada.  
Extendido tradicional.



**Imagen 5.4** Extendido de relleno sobre geomalla con tractor.

En la Instalación de tuberías, a menudo es necesario excavar zanjas después de haber instalado las geomallas y el material de relleno. Esto causa que la geomalla colocada en estos sitios tenga una menor capacidad de refuerzo. La solución es hacer una simple reparación con traslape en las geomallas antes de rellenar la zanja y después de ella. En la imagen 5.5 se observa el traslape sobre un zanja rellenada, donde se colocó un tubo de drenaje.



**Imagen 5.5.** Traslape de geomalla.

Con esto damos a conocer las precauciones principales para realizar trabajos de pavimentos con el uso de geomallas como refuerzo y/o estabilización; en el próximo y último capítulo compartiremos las conclusiones derivadas de este texto.

---

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

Para destacar las aportaciones que tiene este trabajo, detallaremos las conclusiones finales del mismo; nos ocuparemos en mencionar algunos aspectos importantes de los métodos descritos en el capítulo cuatro y nos enfocaremos con mayor precisión de la etapa experimental.

Dentro de los métodos mencionados, el de mayor utilidad práctica, es el procedimiento de diseño de pavimento flexible con ETL 1110-1-189 del USACE; descrito en la sección 4.2.2; éste procedimiento nos proporciona un método completo; en el que se detalla como conclusión que; “existe un valor de equivalencia para la reducción de la capa de base en pavimentos de concreto asfáltico”.

En el desarrollo realizado por el Cuerpo de Ingenieros (USACE) y Tensar Co, para las geomallas triaxiales, se pudo corroborar mediante una investigación larga; que por medio de la medición de la profundidad de las roderas, se establece el comportamiento del pavimento, especialmente en pavimentos delgados donde la falla del subsuelo gobierna, en lugar de la fatiga en el asfalto; el suelo reforzado con geomalla, tuvo menor deformación a la misma cantidad de carga aplicada en ellos. Con esto se establece que las geomallas aportan el beneficio de prolongar la vida útil del pavimento sobre todo con estructuras delgadas.

Pasando a la etapa experimental que se desarrolló en laboratorio, comentaremos como primera instancia, que los especímenes con suelos que se compactaron en laboratorio con una humedad óptima y que tienen un mismo material, prácticamente no tienen variación en la resistencia de los suelos que los componen. Como se observó en la primera etapa de resultados, la variación del CBR donde se incrustó una geomalla biaxial o triaxial, fue prácticamente nula; la causa de tal efecto se puede atribuir a que el material superpuesto a la geomalla

es el mismo que el material subyacente y con las mismas características de humedad.

Para ensayos donde se agregaron geomallas al tercio superior, con la configuración de dos materiales, se observa que existe un incremento muy tenue en la resistencia de los suelos que la componen; haciéndose más notables a medida que el pistón de penetración va incrustándose en el suelo. Las geomallas biaxiales demostraron ser más adecuadas para reforzar el suelo que la geomalla triaxial; esto se puede deber al grosor de las costillas de las mismas.

En la cuarta parte de los ensayos realizados; sobre el conjunto de materiales de arcilla y arena, podemos ver con gran precisión la alteración que generan las geomallas en el parámetro de CBR hipotético; Como se pudo ver, existió un incremento del 56% del CBR, de un elemento que contenía refuerzo en la interfase del suelo blando y el suelo con buena calidad  $CBR > 20$ ; y que cumple las especificaciones para materiales de subrasante (tabla 3.4).

Además se observó que a medida que el pistón de penetración se incrustaba, la diferencia de cargas del espécimen con refuerzo fue más del doble que la carga soportada por el conjunto de materiales que no tenía refuerzo; asimismo se puede percibir que el peso volumétrico húmedo y por consiguiente el peso volumétrico seco, se ve aumentado en poco más de 2.5%; que nos da indicios certeros de que el material arenoso (suelo "C") en la parte superior del molde y por arriba de la geomalla biaxial; se compactó mejor que aquel que no tenía el refuerzo.

Por observaciones durante la prueba, podemos indicar que el material arenoso en el espécimen sin refuerzo, no se compactó de la misma forma que aquel que tenía el refuerzo, cuando se compactó la primera capa de arena nos percatamos que en los primeros golpes sobre el material, éste se incrustaba sobre el material arcilloso, y por lo tanto se vio reflejado en el peso volumétrico final y en la resistencia.

Para terminar con las observaciones de las pruebas, diremos que las geomallas resultan más favorables en términos de estabilización; señalando que a medida

que baja la resistencia del subsuelo y aumenta la resistencia de la capa de agregados, la geomalla presenta los mejores beneficios en cuanto al comportamiento de las capas en su conjunto.

De los beneficios teóricos para reforzar suelos de vías terrestres que se observaron en el capítulo cuatro, sección 4.1; el refuerzo de la capa concreto asfáltico, no se trató aquí; en lo que respecta al refuerzo de la capa de base se puede establecer de acuerdo a los métodos de diseño descritos y por el análisis experimental, que los suelos de desplante con CBR de 3% a 5%; son susceptibles de que la capa de base se pueda beneficiar con la incrustación de geomallas.

Para valores de  $CBR \geq 5$ , consideramos que el suelo presenta buenas características por lo que el refuerzo no sería recomendable desde el punto de vista de este trabajo. Para suelos con  $CBR \leq 1$  el refuerzo no es una solución, la estabilización por razón obvia es potencialmente útil.

A partir de los ensayos y de acuerdo a lo observado, el efecto de estabilización mecánica es la que se considera la mejor, como se vio en la última parte de nuestro análisis experimental; el comportamiento del suelo que está superpuesto al suelo blando mejora bastante con la colocación de la geomalla. En los ensayos con la arcilla saturada y la arena se puede concluir que la geomalla estabiliza y separa los materiales, aportando con mayor rapidez resistencia en capas inferiores de suelos granulares.

Resumiendo, la influencia de las geomallas sobre suelos que componen vías terrestres son:

1. Realiza de manera efectiva la estabilización mecánica de suelos blandos.
2. Reduce la intensidad de la presión sobre la capa de apoyo, sobre suelos blandos es bastante benéfico; realiza la estabilización y mejora el comportamiento de las capas superiores.

3. Previene que el agregado de base penetre en terrenos suaves y viceversa, pues impide la migración del subsuelo hacia arriba en el material de base colaborando con la separación de materiales.
4. Disminuye la profundidad de excavación necesaria para la eliminación de materiales blandos, subrasantes y terrenos de desplante inadecuados.
5. Reduce el espesor de agregado requerido para estabilizar subsuelos suaves.
6. La resistencia conjunta del subsuelo suave y la base aumenta considerablemente.
7. Reduce el espesor de las terracerías debido a que se alcanzan mayores resistencias en las capas inferiores.
8. En lo que se refiere a costos, es necesario realizar un análisis por cada proyecto en específico; considerando los volúmenes y distancias de extracción de materiales, sin embargo, en el caso de estabilizaciones se pueden alcanzar ahorros hasta del 8-10%, dependiendo de la calidad y espesor del suelo de desplante. Para las estructuras de pavimentos reforzadas se pueden alcanzar ahorros de hasta 6%.

Antes de concluir con el dictamen de nuestra hipótesis, es necesario sugerir que esta investigación puede ser el inicio de un estudio mucho mas completo que permita, por ejemplo obtener un método de diseño de pavimentos en México que tome en cuenta el uso de geomallas en la construcción de pavimentos.

Para finalizar indicaremos de forma general que la hipótesis generada en nuestro trabajo “El uso de geomallas biaxiales y triaxiales mejora la capacidad portante (CBR) de los materiales de terracerías empleados en la construcción de pavimentos, así como mejora las condiciones de compactación para materiales donde su subyacente es un suelo blando”; se considera factible, sin embargo hay que observar que existen muchos factores que influyen para tomar decisiones

respecto al uso de geomallas, estos factores son entre otros, espesores de capa, la calidad de la base, la resistencia del subsuelo y las humedades; el desempeño y el beneficio proporcionado por el refuerzo de las geomalla dependerá de un buen análisis.

Por lo tanto, los resultados de este estudio deben interpretarse correctamente para así incorporar la metodología de diseño aquí presentada, y asegurar que los resultados deseados en el comportamiento del pavimento reforzado sean satisfactorios.

## VII. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. Ahmed M., Riza A., Mohd T., y Amiruddin I. (2011). "Classification of Construction Problems in Highway Pavements". Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(3), 378-395. USA
2. American Association of State Highways and Transportation Officials. (1993). "Guide for Design of Pavement Structures" [*Guía para el diseño de estructuras pavimentadas*] (Método AASTHO, 1993), 589 págs. USA.
3. American Society for Testing Materials. (2012). "Geotechnical Engineering Standards". Consulta disponible en: [www.astm.org](http://www.astm.org). USA.
4. American Association of State Highways and Transportation Officials. (2009). "Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base Course of Flexible Pavement Structures". R 50-09. USA
5. Bauer, G.E. (1994). "The Control of Settlement Using Geogrids". Notes of Settlement'94, College Station, 491-501, Texas, USA.
6. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. (2002). "Manual de Practicas de Laboratorio para Vías Terrestres". Puebla, México.
7. Braja, M. Das. (2001). "Principios de Ingeniería de Cimentaciones". International Thomson. México D.F.
8. Geosynthetic Materials Association. (2000). "Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures". Official Document of GMA II, 4E de AASHTO. USA.

9. Instituto Mexicano del Transporte. (2011) "Normativa para la Infraestructura del Transporte". Disponible en: [www.imt.mx/normas](http://www.imt.mx/normas). México D.F.
10. J.P. Giroud y el Dr. Jie Han (2001). "Design Method for Tensar Geogrid-Reinforced Unpaved Roads Developed by Dr. J. P. Giroud and Dr. Jie Han for Tensar". Report by Tensar International. USA.
11. Perkins, S.W. (1999). "Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections". Informe final, FHWA/MT-99-001/8138, 140 págs. USA
12. The Federal Aviation Administration funded studies by the U.S. Army Corps of Engineers. (2003). "Geogrid Reinforced Base Course". Engineering Brief N. 49.USA.
13. The Tensar Corporation (1998). "A Review of Geosynthetic Functions and Applications in Paved and Unpaved Roads". Technical Note Tensar (TTN: BR11).USA.
14. The Tensar Corporation by John Bolton (2012). "Spectra Improvement System". WorkShop. México D.F.
15. The Tensar Corporation (2010). "Design of Paved and Unpaved Roads". Technical Note Tensar (TTN: TR 201).USA.
16. U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration (2008). "Geosynthetic Design & Construction Guidelines". FHWA NHI -07-092.USA.
17. U.S. Army Corps of Engineers."USACE" (2003). "Engineering Use of Geotextiles". TM-5-818-8.USA.
18. U.S. Army Corps of Engineers. "USACE" (2003). "Use of Geogrids in Pavement Construction". ETL 1110-1-189.USA.

19. Webster, S. L. (1993). "Geogrid Reinforced Base Courses for Flexible Pavements for Light Aircraft: Test Section Construction, Behavior Under Traffic, Laboratory Tests and Design Criteria". Technical Report GL-93-6, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. USA.
20. USACE por Sarah R. Jersey, and Jeb S. Tingle. (2010). "Geogrid Reinforcement of Thin Asphalt Pavements; Full Scale-Accelerated Pavement Test". USA.

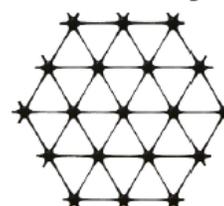
## Especificación de Producto – Geomalla TriAx® TX160

Tensar International Corporation se reserva el derecho de cambiar las especificaciones de su producto en cualquier momento. Es responsabilidad de la persona que especifica el uso de este producto, y del comprador, asegurarse que las especificaciones del mismo se incluyen para propósitos de diseño y son actualizadas, y que el producto es adecuado para el uso que se pretende en cada caso.

### General

1. La geomalla es fabricada de una lámina perforada de polipropileno, la cual es orientada en tres direcciones equilaterales de tal forma que las costillas resultantes tendrán un alto grado de dirección molecular, la cual continúa al menos en parte a través de la masa del nodo o unión integral.
2. Las propiedades que contribuyen al desempeño de una capa mecánicamente estabilizada incluye lo siguiente:

Tensar TriAx® Geogrid



Propiedades Índice	Longitudinal	Diagonal	Transversal	General
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Distancia entre costillas paralelas<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>▪ Profundidad a mitad de costilla<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>▪ Ancho a mitad de costilla<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>▪ Forma de costilla</li> <li>▪ Forma de apertura</li> </ul>	40 (1.60) – –	40 (1.60) 1.6 (0.06) 1.0 (0.04)	– 1.4 (0.06) 1.2 (0.05)	rectangular triangular
<b>Integridad Estructural</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eficiencia en unión<sup>(3)</sup>, %</li> <li>▪ Estabilidad de apertura<sup>(4)</sup>, kg-cm/grad @ 5.0kg-cm<sup>(2)</sup></li> <li>▪ Rigidez radial a baja deformación<sup>(5)</sup>, kN/m @ 0.5% deformación (lb/ft @ 0.5% deformación)</li> </ul>				93 3.6 300 (20,580)
<b>Durabilidad</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Resistencia a degradación química<sup>(6)</sup></li> <li>▪ Resistencia a luz ultravioleta e intemperismo<sup>(7)</sup></li> </ul>				100% 100%

### Dimensiones y Despacho

La geomalla TX será entregada en el sitio de la obra en forma de rollo y cada rollo identificado individualmente y midiendo 3.0 metros (9.8 pies) y/o 4.0 metros (13.1 pies) de ancho y 75 metros (246 pies) de largo.

### Notas

1. A menos que se muestre diferente, los valores mostrados son valores mínimos promedio del rollo determinados de acuerdo con la norma ASTM D4759-02. Breves descripciones de los procedimientos de las pruebas se dan en las siguientes notas.
2. Dimensiones nominales.
3. Capacidad de transferencia de carga determinada según la norma GRI-GG2-87 y GRI-GG1-87 y es expresada como porcentaje de la resistencia última a tensión.
4. Rigidez torsional en su plano es medida aplicando un momento a la unión central de una muestra de 225mm x 225mm fijada en su perímetro según la norma GRI-GG9 modificada.
5. Rigidez radial es determinada de la rigidez a tensión medida en cualquier eje de su plano en una prueba según la norma ASTM D6637-10.
6. Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se somete a ambientes químicamente agresivos según la norma EPA 9090, prueba de inmersión.
7. Resistencia a pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta e intemperismo agresivo según la norma ASTM D4355-05.

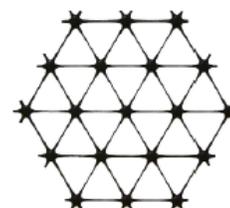
Tensar International Corporation  
2500 Northwinds Pkwy., Suite 500  
Alpharetta, Georgia 30009  
Tel: 770-344-2090  
www.tensar-international.com

Esta especificación reemplaza cualquier especificación previa para el producto designado arriba y no es aplicable a ningún producto despachado antes de Febrero 1, 2011. Tensar y TriAx son marcas registradas de Tensar International Corporation o sus afiliados en los EE.UU. y otros países. La geomalla TriAx® y por lo tanto su uso está protegida por la patente americana No. 7,001,112. Otras patentes o aplicaciones de patentes existen también en otros países. La determinación final de la idoneidad de la información o producto mencionados arriba para el uso contemplado, y su forma de uso son entera responsabilidad del usuario. Tensar International Corporation se exime de cualquier garantía expresa, implícita o legal, incluyendo pero no limitada a cualquier garantía de comerciabilidad o aptitud para un propósito particular referente a este producto u otros productos, tecnologías o servicios de la empresa. La información contenida aquí no constituye asesoramiento de ingeniería.

## Especificación de Producto – Geomalla TriAx® TX140

Tensar International Corporation se reserva el derecho de cambiar las especificaciones de su producto en cualquier momento. Es responsabilidad de la persona que especifica el uso de este producto, y del comprador, asegurarse que las especificaciones del mismo se incluyen para propósitos de diseño y son actualizadas, y que el producto es adecuado para el uso que se pretende en cada caso.

Tensar TriAx® Geogrid



### General

- La geomalla es fabricada de una lámina perforada de polipropileno, la cual es orientada en tres direcciones equilaterales de tal forma que las costillas resultantes tendrán un alto grado de dirección molecular, la cual continúa al menos en parte a través de la masa del nodo o unión integral.
- Las propiedades que contribuyen al desempeño de una capa mecánicamente estabilizada incluye lo siguiente:

Propiedades Índice	Longitudinal	Diagonal	Transversal	General
<ul style="list-style-type: none"> <li>Distancia entre costillas paralelas<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>Profundidad a mitad de costilla<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>Ancho a mitad de costilla<sup>(2)</sup>, mm (pulg)</li> <li>Forma de costilla</li> <li>Forma de apertura</li> </ul>	40 (1.60)	40 (1.60)	- 1.2 (0.05) 1.1 (0.04)	rectangular triangular
<b>Integridad Estructural</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Eficiencia en unión<sup>(3)</sup>, %</li> <li>Estabilidad de apertura<sup>(4)</sup>, kg-cm/grad @ 5.0kg-cm<sup>(2)</sup></li> <li>Rigidez radial a baja deformación<sup>(5)</sup>, kN/m @ 0.5% deformación (lb/ft @ 0.5% deformación)</li> </ul>				93 3.0 225 (15,430)
<b>Durabilidad</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistencia a degradación química<sup>(6)</sup></li> <li>Resistencia a luz ultravioleta e intemperismo<sup>(7)</sup></li> </ul>				100% 100%

### Dimensiones y Despacho

La geomalla TX será entregada en el sitio de la obra en forma de rollo y cada rollo identificado individualmente y midiendo 3.0 metros (9.8 pies) y/o 4.0 metros (13.1 pies) de ancho y 75 metros (246 pies) de largo.

### Notas

- A menos que se muestre diferente, los valores mostrados son valores mínimos promedio del rollo determinados de acuerdo con la norma ASTM D4759-02. Breves descripciones de los procedimientos de las pruebas se dan en las siguientes notas.
- Dimensiones nominales.
- Capacidad de transferencia de carga determinada según la norma GRI-GG2-87 y GRI-GG1-87 y es expresada como porcentaje de la resistencia última a tensión.
- Rigidez torsional en su plano es medida aplicando un momento a la unión central de una muestra de 225mm x 225mm fijada en su perímetro según la norma GRI-GG9 modificada.
- Rigidez radial es determinada de la rigidez a tensión medida en cualquier eje de su plano en una prueba según la norma ASTM D6637-10.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se somete a ambientes químicamente agresivos según la norma EPA 9090, prueba de inmersión.
- Resistencia a pérdida de capacidad de carga o integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta e intemperismo agresivo según la norma ASTM D4355-05.

Tensar International Corporation  
2500 Northwinds Pkwy., Suite 500  
Alpharetta, Georgia 30009  
Tel: 770-344-2090  
www.tensar-international.com

Esta especificación reemplaza cualquier especificación previa para el producto designado arriba y no es aplicable a ningún producto despachado antes de Febrero 1, 2011. Tensar y TriAx son marcas registradas de Tensar International Corporation o sus afiliados en los EE.UU. y otros países. La geomalla TriAx® y por lo tanto su uso está protegida por la patente americana No. 7,001,112. Otras patentes o aplicaciones de patentes existen también en otros países. La determinación final de la idoneidad de la información o producto mencionados arriba para el uso contemplado, y su forma de uso son entera responsabilidad del usuario. Tensar International Corporation se exime de cualquier garantía expresa, implícita o legal, incluyendo pero no limitada a cualquier garantía de comerciabilidad o aptitud para un propósito particular referente a este producto u otros productos, tecnologías o servicios de la empresa. La información contenida aquí no constituye asesoramiento de ingeniería.

### Especificación de Geomalla - Biaxial BX 1500

Tensor International Corporation se reserva el derecho de cambiar las especificaciones de su producto en cualquier momento. Es responsabilidad de la persona que especifica el uso de este producto, y del comprador, asegurarse que las especificaciones del mismo se incluyen para propósitos de diseño y son actualizadas, y que el producto es adecuado para el uso que se pretende en cada caso.

Tipo de Producto:	Geomalla biaxial formada integralmente
Polímero	Polipropileno
Mecanismo de Transferencia de Cargas:	Trabazón Mecánica
Aplicaciones:	Spectra System (Refuerzo de Base)

#### Propiedades del producto

##### Propiedades Índice

Dimensiones de Apertura <sup>2</sup>	mm (Pulg)	25 (1.0)	30.5 (1.2)
Espesor Mínimo de costillas <sup>2</sup>	mm(Pulg)	1.78 (0.07)	1.78 (0.07)
Resistencia a la Tensión @ 2% de esfuerzo <sup>3</sup>	kN/m (lb/ft)	6.5 (280)	10.0 (690)
Resistencia a la Tensión @ 5% de esfuerzo <sup>3</sup>	kN/m (lb/ft)	17.5 (1,200)	20.0 (1,370)
Resistencia Última a la Tensión <sup>3</sup>	kN/m (lb/ft)	27.0 (1,850)	30.0 (2,050)

##### Integridad Estructural

Eficiencia de uniones <sup>4</sup>	%	93
Rigidez a la Flexión <sup>5</sup>	mg-cm	2,000,000
Estabilidad de Aperturas <sup>6</sup>	m-N/deg	0.75

##### Durabilidad

Resistencia al daño de instalación <sup>7</sup>	%SC / %SW / %GI	95 / 93 / 90
Resistencia a la degradación <sup>8</sup>	%	100
Resistencia a la degradación UV <sup>9</sup>	%	100

#### Dimensiones y Entrega

La geomalla biaxial se entrega al sitio de trabajo en forma de rollo, cada rollo identificado individualmente y mide nominalmente 3.0 metros (9.8 pies) o 4.0 metros (13.1 pies) de ancho y 50.0 metros (164 pies) de longitud. Una cantidad para camión típico es 160 a 210 rollos.

#### Notas:

- A menos que se indique lo contrario, los valores mostrados son los valores mínimos de rollo medios determinados de acuerdo con ASTM D4759-02. Breve descripciones de los procedimientos de ensayo se dan en las siguientes notas.
- Dimensiones nominales.
- La verdadera resistencia a la elongación cuando inicialmente se sometió a una carga determinada de acuerdo con ASTM D6637-01, sin deformar los materiales con la prueba de carga antes de medir la resistencia, o empleando métodos tangentes "secantes" o "offset" de medición así como a exagerar las propiedades de tracción.
- Capacidad de transferencia de carga determinada de acuerdo con GRI-GG2-05 y expresado como un porcentaje de resistencia a la tracción.
- Resistencia a la fuerza por flexión determinada de acuerdo con ASTM D5732-01, usando especímenes de ancho de dos costillas, con costillas transversales cortadas a ras de los bordes exteriores de las nevaduras longitudinales (como una "escalera"), y de longitud lo suficientemente largo para permitir la medición de la parte que sobresale. La rigidez a la flexión total se calcula como la raíz cuadrada del producto de MD y XMD.
- La resistencia al movimiento en el plano de rotación, medido mediante la aplicación de un momento 20 kg-cm (2 mN) a la unión central de 9 pulgadas x 9 pulgadas, restringido en su perímetro, de acuerdo con U.S. Cuerpo de Ingenieros; Metodología para la medición de Rigidez a la Torsión.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a esfuerzo mecánico; instalación en arena arcillosa (SC), así como arena bien graduada (SW), y roca triturada clasificada como grava mal graduada (GP). De la geomalla se tomarán muestras de acuerdo con ASTM D5818-06 y la capacidad de carga se determinará de acuerdo con ASTM D6637-01.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se someten a ambientes químicamente agresivos de acuerdo con EPA 9090 inmersión pruebas.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta y a la intemperie según la norma ASTM D4355-05.

**Tensor International Corporation**  
**2500 Northwinds Pkwy., Suite 500**  
**Alpharetta, Georgia 30009**  
**Tel: 770-344-2090**  
**www.tensor-international.com**

### Especificación de Geomalla - Biaxial BX 1200

Tensor International Corporation se reserva el derecho de cambiar las especificaciones de su producto en cualquier momento. Es responsabilidad de la persona que especifica el uso de este producto, y del comprador, asegurarse que las especificaciones del mismo se incluyen para propósitos de diseño y son actualizadas, y que el producto es adecuado para el uso que se pretende en cada caso.

Tipo de Producto:	Geomalla biaxial formada integralmente
Polímero	Polipropileno
Mecanismo de Tránsito de Cargas:	Trabazón Mecánica
Aplicaciones:	Spectra System (Refuerzo de Base)

#### Propiedades del producto

##### Propiedades Índices

Propiedad	Unidad	Valor 1	Valor 2
Dimensiones de Apertura <sup>2</sup>	mm (Pulg)	25 (1.0)	33 (1.3)
Espesor Mínimo de Costillas <sup>2</sup>	mm(Pulg)	1.27 (0.05)	1.27(0.05)
Resistencia a la Tensión @ 2% de esfuerzo <sup>3</sup>	kN/m (lb/pie)	6.0 (410)	9.0 (620)
Resistencia a la Tensión @ 5% de esfuerzo <sup>3</sup>	kN/m (lb/pie)	11.8 (810)	19.6 (1,340)
Resistencia Última a la Tensión <sup>3</sup>	kN/m (lb/pie)	19.2 (1,130)	28.8 (1,970)
Contenido de Carbón	%	2.0	

##### Integridad Estructural

Eficiencia de uniones <sup>4</sup>	%	93
Rigidez a la Flexión <sup>5</sup>	mg-cm	750,000
Estabilidad de Aperturas <sup>6</sup>	m-N/deg	0.65

##### Durabilidad

Resistencia al daño de Instalación <sup>7</sup>	%SC / %GVV / %GP	95 / 93 / 90
Resistencia a la degradación <sup>8</sup>	%	100
Resistencia a la degradación UV <sup>9</sup>	%	100

#### Dimensiones y Entrega

La geomalla biaxial se entrega al sitio de trabajo en forma de rollo, cada rollo identificado individualmente y mide nominalmente 3.0 metros (9,8 pies) o 4.0 metros (13,1 pies) de ancho y 50.0 metros (164 pies) de longitud. Una cantidad para camión típico es 160 a 210 rollos.

#### Notas:

- A menos que se indique lo contrario, los valores mostrados son los valores mínimos de rollo medios determinados de acuerdo con ASTM D4759-02. Breve descripciones de los procedimientos de ensayo se dan en las siguientes notas.
- Dimensiones nominales.
- La verdadera resistencia a la elongación cuando inicialmente se sometió a una carga determinada de acuerdo con ASTM D6637-01, sin deformar los materiales con la prueba de carga antes de medir la resistencia, o empleando métodos tangentes "secantes" o "offset" de medición así como a exagerar las propiedades de tracción.
- Capacidad de transferencia de carga determinada de acuerdo con GRI-GG2-05 y expresado como un porcentaje de resistencia a la tracción.
- Resistencia a la fuerza por flexión determinada de acuerdo con ASTM D6732-01, usando especímenes de ancho de dos costillas, con costillas transversales cortadas a ras de los bordes exteriores de las nervaduras longitudinales (como una "escalera"), y de longitud lo suficientemente largo para permitir la medición de la parte que sobresale. La rigidez a la flexión total se calcula como la raíz cuadrada del producto de MD y XMD.
- La resistencia al movimiento en el plano de rotación, medido mediante la aplicación de un momento 20 kg-cm (2 mN) a la unión central de 9 pulgadas x 9 pulgadas, restringido en su perímetro, de acuerdo con U.S. Cuerpo de Ingenieros; Metodología para la medición de Rigidez a la Torsión.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a esfuerzo mecánico; instalación en arena arcillosa (SC), así como arena bien graduada (SW), y roca triturada clasificada como grava mal graduada (GP). De la geomalla se tomarán muestras de acuerdo con ASTM D5818-06 y la capacidad de carga se determinará de acuerdo con ASTM D6637-01.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se someten a ambientes químicamente agresivos de acuerdo con EPA 9090 inmersión pruebas.
- Resistencia a la pérdida de capacidad de carga o la integridad estructural cuando se somete a 500 horas de luz ultravioleta y a la intemperie según la norma ASTM D4355-05.

**Tensor International Corporation**  
**2500 Northwinds Pkwy., Suite 500**  
**Alpharetta, Georgia 30009**  
**Tel: 770-344-2090**  
**www.tensor-international.com**