

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**Análisis técnico-económico del uso de geomallas como
refuerzo de bases granulares en pavimentos flexibles**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller:

Daniel Alberto Orrego Cabanillas

ASESOR: Augusto Martín Alza Vilela

Lima, junio del 2014

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el análisis del uso de geosintéticos, en específico las geomallas, como refuerzo de bases granulares dentro de una estructura de pavimento flexible. Lo que se busca es determinar si son una alternativa económicamente viable sin disminuir la capacidad estructural de la vía proyectada en el proyecto analizado. Con este propósito se realizó un diseño de tres alternativas bajo los mismos parámetros de diseño: la primera alternativa es una sección convencional o no reforzada; mientras que las dos alternativas adicionales consisten en secciones reforzadas con geomallas biaxiales y multiaxiales respectivamente.

Para poder obtener un diseño alternativo óptimo es necesario conocer las propiedades de las geomallas disponibles en el mercado actualmente, para ello se hizo una clasificación de las mismas y se mostraron sus aplicaciones típicas. Así mismo, se describieron los mecanismos de refuerzo relacionados con el uso de geomallas dentro de estructuras de pavimento y los beneficios que estos permiten lograr.

Luego, se hizo una recopilación de las metodologías de diseño que se utilizaron para el caso de estudio presentado y las investigaciones que permitieron obtener los factores necesarios para realizar el diseño de las secciones reforzadas con geomallas.

Con esta información como base se procedió al diseño de las estructuras de pavimentos para nueve diferentes secciones. Esto permitió hacer un análisis más completo de los diferentes factores que influyen en el resultado final obtenido con el uso de las geomallas como refuerzo; así como encontrar las condiciones óptimas donde esta alternativa es económica y técnicamente mejor.

Por último, se muestra un modelo de especificación técnica, de acuerdo a los lineamientos de las especificaciones generales presentadas por el MTC, que puede servir como punto de partida para su inclusión dentro de los productos a usarse dentro de los proyectos nacionales bajo su gestión.

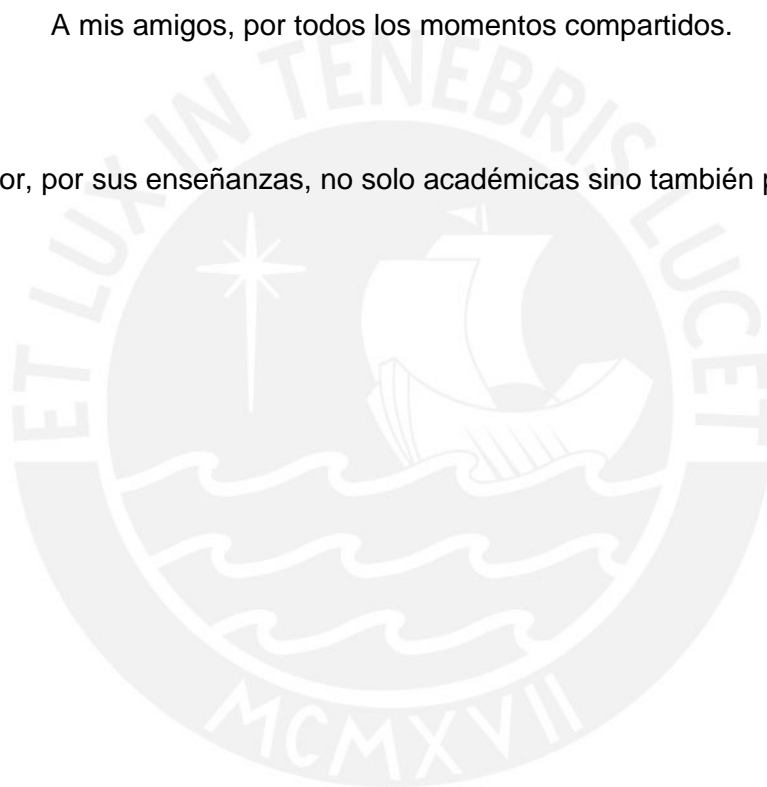
DEDICATORIA

A Dios, por darme la fuerza necesaria para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia, por haberme apoyado en cada decisión que tomé y por el amor incondicional que me tienen.

A mis amigos, por todos los momentos compartidos.

A mi asesor, por sus enseñanzas, no solo académicas sino también personales.



ÍNDICE

1. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Reseña histórica de los geosintéticos y las geomallas en particular	1
1.2 Clasificación de las geomallas	3
1.2.1 Por el sentido del desarrollo del refuerzo	3
1.2.2 Por su fabricación	5
1.3 Aplicaciones típicas	6
2. MARCO TEORICO	11
2.1 Uso de geomallas como refuerzo de pavimentos.....	12
2.2 Mecanismos de refuerzo de las geomallas	15
2.3 Características de las geomallas biaxiales y multiaxiales.....	18
2.4 Beneficios obtenidos con el uso de geomallas.....	23
2.5 Metodologías de diseño.....	26
2.5.1 AASHTO (Diseño convencional).....	26
2.5.2 AASHTO R-50	35
2.5.3 GMA WHITE PAPER II	37
2.6 Obtención de TBR de diseño	45
2.6.1 Geomallas biaxiales.....	45
2.6.2 Geomallas multiaxiales	47
3. CASO DE ESTUDIO.....	50
3.1 Información general del proyecto.....	50
3.2 Alternativas de diseño.....	51
3.2.1 Propuesta tradicional	51

3.2.2	Propuesta con geomallas.....	56
4.	RESULTADOS	59
4.1	Comparación técnica	59
4.2	Comparación económica	62
5.	PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	65
6.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	66
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	72



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01. Funciones principales de algunos geosintéticos.....	2
Tabla 02. Propiedades de la geomalla biaxial que afectan su comportamiento.....	19
Tabla 03. Niveles de confiabilidad.....	27
Tabla 04. Diferencias en la calidad del drenaje de la estructura.....	34
Tabla 05. Diferencias en la calidad del drenaje de la estructura.....	34
Tabla 06. Aplicabilidad o no del uso de geosintéticos	39
Tabla 07. Beneficios a lograrse con el uso de geosintéticos	41
Tabla 08. Tráfico de diseño para cada sección típica.....	51
Tabla 09. Módulo de Resiliencia para cada sección.....	52
Tabla 10. Niveles de serviciabilidad para cada sección de diseño	52
Tabla 11. Espesores no reforzados obtenidos	56
Tabla 12. Espesores de secciones reforzadas con geomallas biaxiales	57
Tabla 13. Espesores de secciones reforzadas con geomallas multiaxiales.....	58
Tabla 14. Espesores obtenidos para cada caso de diseño	59
Tabla 15. TBR utilizado para cada caso de diseño	62
Tabla 16. Costo de materiales para cada sección de diseño.....	62
Tabla 17. Costos de materiales instalados para cada sección de diseño.....	63

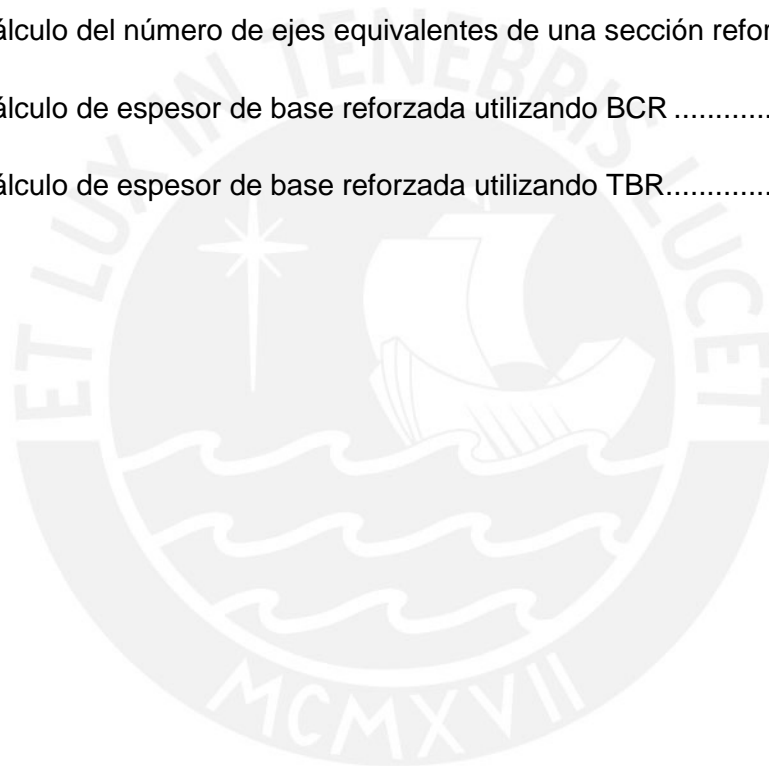
ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 01. Geomalla uniaxial.....	3
Fig. 02. Geomalla biaxial.....	4
Fig. 03. Geomalla multiaxial.....	4
Fig. 04. Proceso de fabricación de las geomallas uniaxiales y biaxiales	5
Fig. 05. Geomalla uniaxial de poliéster tejida	6
Fig. 06. Geomalla uniaxial de polietileno soldada.....	6
Fig. 07. Ejemplo de un sistema con fachada de bloques de concreto prefabricados.....	7
Fig. 08. Talud de suelo reforzado.....	8
Fig. 09. Problemas presentados en la superficie debido a la presencia de subrasantes blandas	9
Fig. 10. Diferencias en el pavimento debido al confinamiento lateral generado por la geomalla utilizada como refuerzo.....	10
Fig. 11. Colocación de geomallas para construcción de diques sobre bofedales	10
Fig. 12. Mejoramiento de fundación en una planta de molienda y flotación.....	11
Fig. 13. Mecanismo de confinamiento lateral	15
Fig. 14. Distribución de zonas de confinamiento	16
Fig. 15. Mecanismo de mejoramiento de capacidad de soporte.....	16
Fig. 16. Efecto de zapato de nieve	17
Fig. 17. Efecto de membrana tensionada.....	17
Fig. 18. Forma de las aberturas de las geomallas biaxiales	18
Fig. 19. Diferencias en la disposición de las costillas entre las geomallas multiaxiales y biaxiales.....	20
Fig. 20. Forma de las aberturas de la nueva geomalla multiaxial	21
Fig. 21. Forma de las juntas en las geomallas biaxiales y multiaxiales	22

Fig. 22. Esquema de la distribución radial de esfuerzos lograda con la geomalla multiaxial	22
Fig. 23. Nomograma para la obtención del SN.....	30
Fig. 24. Obtención de coeficiente a_1	31
Fig. 25. Obtención de coeficiente a_2	32
Fig. 26. Obtención de coeficiente a_3	33
Fig. 27. Equipo utilizado para los ensayos	48
Fig. 28. Medición del ahuellamiento	49
Fig. 29. Obtención del TBR	49
Fig. 30. Obtención de a_1 para caso de estudio.....	53
Fig. 31. Obtención de a_2 para caso de estudio.....	54
Fig. 32. Obtención de a_3 para caso de estudio.....	55
Fig. 33. Espesores finales de capa de base granular para cada sección analizada	60
Fig. 34. Ahorro de material granular en secciones reforzadas.....	60
Fig. 35. Tráfico final que soportará cada sección de diseño	61
Fig. 36. Costo de insumos para cada alternativa de diseño	63
Fig. 37. Ahorro final en alternativas de diseño	64
Fig. 38. Influencia del tráfico de diseño sobre el TBR utilizado.....	67
Fig. 39. Influencia del PSI sobre el TBR utilizado	67
Fig. 40. Influencia del espesor de la sección sobre el TBR utilizado	68
Fig. 41. Influencia del CBR de la subrasante sobre el TBR utilizado	69
Fig. 42. Influencia del costo del material de base sobre el costo de la sección instalada	71

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 01. Cálculo de W_{18}	26
Ecuación 02. Cálculo de M_r	28
Ecuación 03. Cálculo de PSI	28
Ecuación 04. Cálculo del número estructural necesario de la sección a diseñar	29
Ecuación 05. Fórmula para encontrar el número estructural de la sección diseñada	31
Ecuación 06. Cálculo de la vida útil de la vía no reforzada.....	42
Ecuación 07. Cálculo del número de ejes equivalentes de una sección reforzada	42
Ecuación 08. Cálculo de espesor de base reforzada utilizando BCR	43
Ecuación 09. Cálculo de espesor de base reforzada utilizando TBR.....	43



1. ANTECEDENTES

1.1 Reseña histórica de los geosintéticos y las geomallas en particular

A lo largo de la historia, el hombre ha intentado aprovechar de la mejor manera posible los materiales disponibles a su alrededor. El suelo, uno de los elementos más utilizados por el hombre, no se ha quedado atrás en este intento por encontrar un material final con mejores características. Es así que podemos encontrar intentos de “suelo reforzado” desde los inicios de la civilización: existen pruebas del uso de troncos con el fin de estabilizar suelos arcillosos o pantanosos, o intentos por construir taludes con una mayor pendiente usando fibras naturales o vegetación como refuerzo.

Sin embargo, el desarrollo de fibras sintéticas hizo posible un mayor desarrollo de esta aplicación ya que ofrecían una ventaja muy importante: las fibras naturales utilizadas eran propensas a la biodegradación por parte de la matriz donde se encontraba mientras que las fibras fabricadas en base a polímeros presentaban una resistencia mucho mayor.

A mediados de mil ochocientos se desarrollan los primeros polímeros sintéticos. Un polímero es una macromolécula (generalmente orgánica) formada por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros. Los polímeros naturales más conocidos son el ADN, las proteínas y la celulosa. A partir de estas se desarrollan polímeros sintéticos en laboratorios; dentro de los más usados actualmente podemos mencionar el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etc.

El uso de estos materiales permitió la creación de una nueva clase de materiales: los geosintéticos. La norma ASTM D4439 define un geosintético como “un material planar fabricado a partir de materiales poliméricos usado en contacto con suelo, roca, tierra u otro material relacionado con la ingeniería geotécnica y que es parte de un proyecto realizado por el hombre”. La estructura, la composición y el comportamiento molecular de los polímeros utilizados para formar este material tienen una influencia directa en sus propiedades físicas, mecánicas, hidráulicas, y en su comportamiento.

Los primeros materiales en desarrollarse fueron los geotextiles, un conjunto de textiles desarrollados como “telas filtrantes”. Estos alcanzaron gran popularidad durante los años 1950s ya que se empezaron a utilizar como una alternativa al uso de material granular en aplicaciones de drenaje y control de erosión. Años después, en Francia, se dan los primeros intentos del uso de geosintéticos en vías no pavimentadas, debajo de balastos (ferrocarriles), dentro de terraplenes y como refuerzo de presas de tierra; en estos casos se buscaba que el material cumpla las funciones de separación y refuerzo.

Otros geosintéticos desarrollados durante los últimos años son: las geomembranas, utilizadas como barreras hidráulicas; las geonets, usadas como redes de drenaje; las geomallas, cuya principal función es el refuerzo; los geocompuestos, resultado de la unión de uno o más geosintéticos; etc.

Como podemos ver, estos materiales cumplen una serie de funciones, buscando un mejor desempeño de la solución propuesta y una alternativa más económica a los materiales tradicionales utilizados en la ingeniería civil.

En el siguiente cuadro podemos ver las funciones principales que cumplen los principales geosintéticos presentes actualmente en el mercado:

	Geotextil	Geomembrana	Geonet	Geomalla	Geocompuesto
Separación	X				X
Filtración	X				X
Drenaje	X		X		X
Impermeabilización		X			X
Refuerzo	X			X	X

Tabla 01. Funciones principales de algunos geosintéticos

Según Koerner (2005), podemos definir a las geomallas como materiales geosintéticos que consisten en juegos de costillas paralelas conectadas con aberturas de tamaño suficiente que permitan la trabazón del material con el que están en contacto.

Como ya se mencionó anteriormente, este material tiene como principal función el REFUERZO del suelo, piedra u otro material geotécnico circundante. Adquiere una mayor importancia en la industria de la ingeniería civil al tener un mejor desempeño que los geotextiles al ser usados como refuerzo de muros, taludes, pavimentos y fundaciones de diversas estructuras.

Existe una gran variedad de geomallas de acuerdo a su proceso de fabricación, el material del que están hechas, el tipo de unión con el que se fabrican, etc. Cada una de estas tiene diferentes propiedades y beneficios de acuerdo a la aplicación en las que se use.

En este caso, las geomallas de las que se tratarán en el presente trabajo tienen su origen en la empresa Netlon Ltd. (con sede en Blackburn, Inglaterra) que posteriormente tomaría el nombre de TENSAR INTERNATIONAL CORPORATION INC.

En el año 1979, el Dr. Brian Mercer, junto con otros, publicó la patente de este nuevo material e impulsó su uso como refuerzo de suelos en diferentes aplicaciones. Asimismo,

buscó la participación activa de universidades y entidades en el Reino Unido a través de la investigación; buscando desarrollar soluciones aplicadas a la ingeniería civil que permitan la utilización de estos materiales.

Los materiales que fueron desarrollados a partir de estas investigaciones pertenecen al grupo de las “geomallas homogéneas”, llamadas así por el proceso que se sigue para su fabricación y que será explicado más adelante. Las investigaciones realizadas concluyeron que se pueden lograr soluciones sencillas, confiables y muy rentables con el uso de estos materiales, en comparación con soluciones tradicionales. Es por esto que alcanzan una gran popularidad rápidamente y actualmente son un material utilizado en una gran cantidad de obras alrededor del mundo.

1.2 Clasificación de las geomallas

A lo largo de los años las geomallas han sido clasificadas de acuerdo a diversos criterios. Según el documento ETL1110-1-189 del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, podemos clasificarlas en dos grandes grupos:

1.2.1 Por el sentido del desarrollo del refuerzo

- Geomallas uniaxiales

Son aquellas en las que se desarrolla una alta resistencia a la tensión en una sola dirección (Figura 01) y de acuerdo a la geometría que presenten se desarrollará un mayor coeficiente de interacción. Son las más usadas en estructuras de suelo reforzado ya que en este caso las solicitaciones solo se desarrollan en el sentido paralelo a la colocación del refuerzo.



Figura 01. Geomalla uniaxial

- Geomallas biaxiales

Son geomallas que presentan aberturas uniformes y resistencia a la tensión en dos sentidos: longitudinal y transversalmente (Figura 02). Se utilizan en aplicaciones de pavimentos o caminos y también como refuerzo secundario en taludes de suelo reforzado.

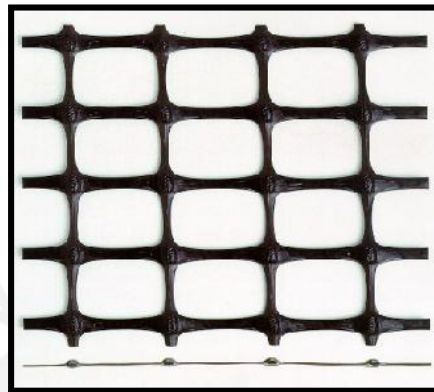


Figura 02. Geomalla biaxial

- Geomallas multiaxiales

Son geomallas rígidas que presentan una resistencia a la tensión “radial”; es decir, en todas las direcciones. Este material fue desarrollado como una “evolución” de la geomalla biaxial y se optó por utilizar aberturas con forma triangular ya que es la forma geométrica más estable (Figura 03). Además presenta un alto desempeño debido a características únicas que serán presentadas más adelante.

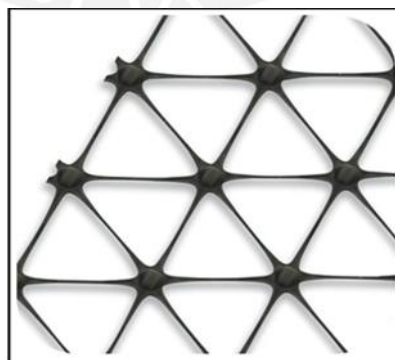


Figura 03. Geomalla multiaxial (TENSAR, 2013)

1.2.2 Por su fabricación

La industria de la fabricación de geomallas se ha desarrollado a lo largo de los últimos años optimizando procesos de fabricación y obteniendo materiales de un alto desempeño. Dentro de estos, contamos con tres tipos de fabricación principales que se describirán a continuación.

- Geomallas extruidas

Los polímeros comúnmente usados para la fabricación de este tipo de geomallas son el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polipropileno. Para ello, se coloca una lámina del material escogido que será perforada siguiendo un patrón preestablecido; luego, la lámina se estira en la dirección (o direcciones) en la cual se desarrollará el esfuerzo de tensión (Figura 04). Este proceso se realiza a una temperatura específica determinada que permite que las partículas del polímero se alineen y adquieran las propiedades físicas requeridas. A este tipo de geomallas se les conoce como “uniformes” u “homogéneas” y tienen un alto módulo de rigidez.

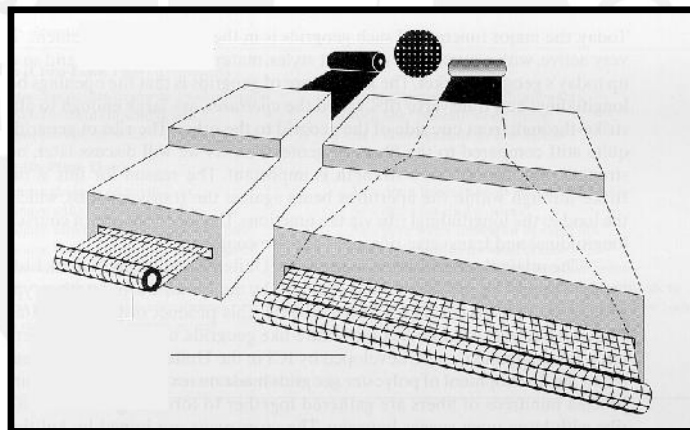


Figura 04. Proceso de fabricación de las geomallas uniaxiales y biaxiales
(Koerner, 2005)

- Geomallas tejidas

Este tipo de geomallas se fabrican a partir del tejido de fibras de poliéster de alta resistencia que forman las costillas y luego son unidas mediante el tejido o enredado de las juntas; lo que las hace muy flexibles (Figura 05). Para terminar, se les coloca un recubrimiento de PVC, látex o algún material bituminoso que le otorgue una mayor resistencia a la abrasión de los suelos con los que estarán en contacto.

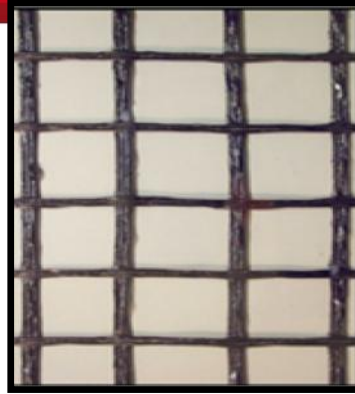


Figura 05. Geomalla uniaxial de poliéster tejida (Valencia, 2009)

- Geomallas soldadas

Estas geomallas se fabrican mediante la soldadura de costillas de poliéster de alta resistencia utilizando el proceso de fusión. Luego, estas se mantienen unidas gracias a una cobertura de polipropileno que se coloca sobre ellas. De acuerdo al número, y espaciamiento, de las costillas pueden llegar a ser las geomallas con mayor rigidez y mayor resistencia.



Figura 06. Geomalla uniaxial de polietileno soldada (Valencia, 2009)

1.3 Aplicaciones típicas

Debido a las características que tienen las geomallas, su principal función es la de actuar como refuerzo del suelo o el material con el que están en contacto. Dentro del amplio rango de aplicaciones de este material podemos mencionar las siguientes:

- Muros de suelo reforzado

Un muro de suelo reforzado es una combinación de suelo (material altamente resistente a cargas de compresión) y geomallas uniaxiales (que actúan como elementos de refuerzo primario) que tienen una alta resistencia a esfuerzos de tracción. Estos forman un bloque de suelo homogéneo, que trabaja como un muro de contención a gravedad. La inclinación del paramento frontal debe ser mayor a 70° (Figura 07) y el acabado de la fachada será distinto para cada sistema (bloques de concreto, paneles de concreto, envolturas con suelo fértil para favorecer la vegetación, etc.). A través de la interacción entre el suelo y el refuerzo se logran soportar altas solicitaciones presentes sobre la estructura; esto se logra a través de la transmisión de esfuerzos que se genera gracias a la trabazón del agregado dentro de las aberturas de la geomalla.

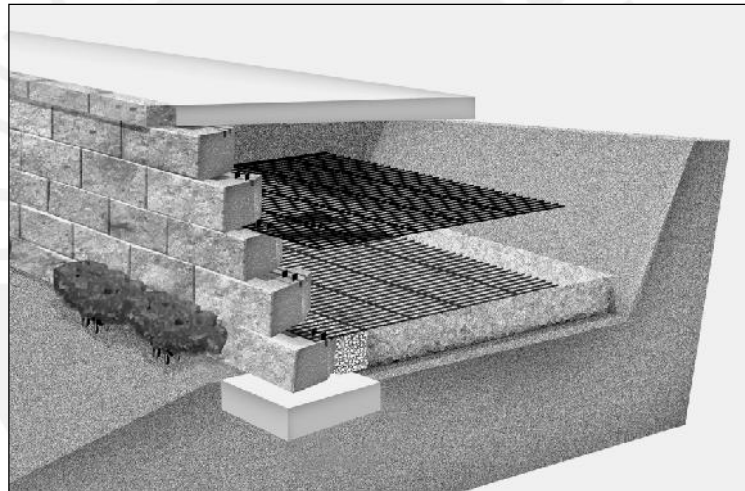


Figura 07. Ejemplo de un sistema con fachada de bloques de concreto prefabricados (Tensar, 2013)

- Taludes de suelo reforzado

Se cumple el mismo concepto que en los muros de suelo reforzado. La diferencia está en que se considera un talud reforzado cuando la inclinación del paramento frontal es menor a 70° (Figura 08). La construcción de estas estructuras permite lograr mayores pendientes en el terreno reduciendo volúmenes de material de relleno y optimizando espacios. El acabado final puede ser vegetado usando envolturas de algún tipo o tendiendo mantos de control de erosión sobre el talud;

aunque también puede tener un acabado más “natural” que se mimetice con el ambiente donde se encuentra.



Figura 08. Talud de suelo reforzado

- Refuerzo de vías no pavimentadas

El uso de una geomalla biaxial o multiaxial permite el mejoramiento de una vía a construirse sobre una subrasante muy blanda ($CBR < 3\%$). Cuando las cargas de tráfico son aplicadas sobre la superficie de rodadura, se produce el fenómeno de “bombeo”, donde las partículas de la subrasante se movilizan hacia arriba para llenar los vacíos dejados por el movimiento de las partículas del agregado colocado como relleno. Esta contaminación del terreno modifica las propiedades del relleno, disminuyendo su capacidad de soporte y generando ahuellamientos o “baches” en la superficie (Figura 09). El uso de las geomallas permite controlar este fenómeno y, además, puede evitar la remoción total de las capas “contaminadas” o el uso excesivo de material granular de relleno como material de reemplazo.



Figura 09. Problemas presentados en la superficie debido a la presencia de subrasantes blandas

- Refuerzo de vías pavimentadas

Las cargas aplicadas sobre las vías pavimentadas producen el movimiento de las partículas granulares ya que intentan alejarse del punto de aplicación de las mismas. El uso de las geomallas como refuerzo de base o subbase en vías pavimentadas genera una capa reforzada más rígida a través del confinamiento del material entre sus aberturas (Figura 10). Esto se convierte en un aumento de la vida útil del pavimento, bajo los mismos espesores iniciales; o en una reducción del volumen de material granular a utilizar para rellenar estas capas manteniendo el nivel de carga que soportará la estructura. Ha sido demostrado en varios ensayos realizados mediante la comparación de una sección reforzada y una sin refuerzo bajo las mismas condiciones que el refuerzo que provee la geomalla origina el incremento del módulo de rigidez inicial, la reducción de las deformaciones verticales y horizontales, el mejoramiento del comportamiento ante la fatiga cíclica, etc.

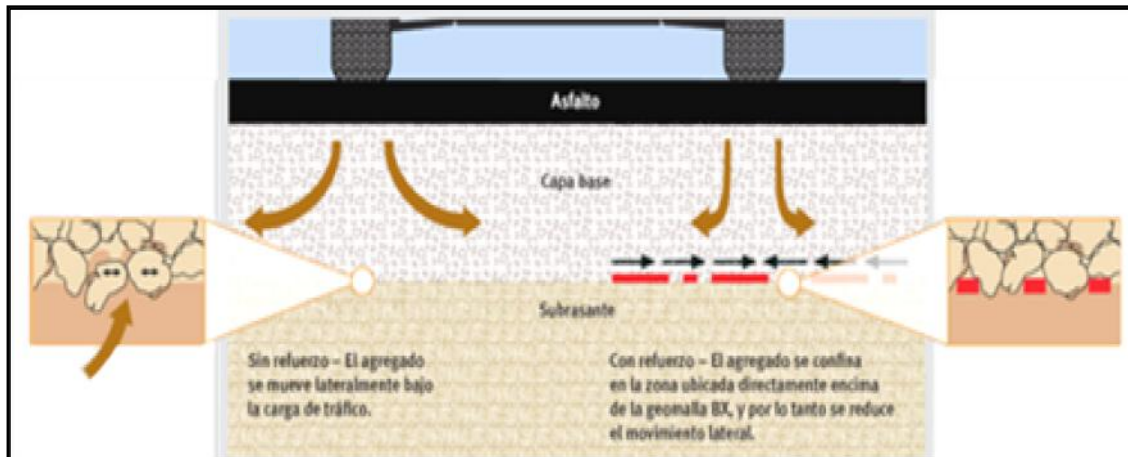


Figura 10. Diferencias en el pavimento debido al confinamiento lateral generado por la geomalla utilizada como refuerzo (Silva, 2010)

- Estabilización de plataformas de construcción

El uso de geomallas biaxiales y multiaxiales permite la conformación de una plataforma de construcción estable sobre suelos muy blandos y el acceso de tránsito de vehículos de construcción sobre esta ya que produce un incremento “aparente” de la capacidad portante del suelo. A través de uno de los mecanismos que serán descritos posteriormente, la geomalla logra distribuir la carga en un área mayor.



Figura 11. Colocación de geomallas para construcción de diques sobre bofedales

- Refuerzo de fundaciones

Las geomallas biaxiales y multiaxiales son usadas como refuerzo de fundaciones cuando la carga transmitida por estas es mayor que la capacidad de soporte del suelo. Estos materiales permiten no solo aumentar la capacidad portante del estrato de fundación sino, además, controlar los asentamientos diferenciales que se podrían producir. Este es una función importante cuando es de vital importancia evitar que se produzca un desnivel en el terreno debido al efecto que esto tendría sobre el equipo o estructura a colocar sobre esta fundación (Figura 12).



Figura 12. Mejoramiento de fundación en una planta de molienda y flotación

2. MARCO TEORICO

2.1 Uso de geomallas como refuerzo de pavimentos

Las vías, en general, pueden ser clasificadas dentro de dos grandes grupos: permanentes y temporales dependiendo del tráfico que recibirán, el tiempo de vida que tendrán y el desempeño que se espera de cada una de ellas. Las vías temporales, generalmente tienen un periodo de vida entre uno y tres años, aproximadamente. Estas esperan un tráfico no muy significativo y por lo tanto casi siempre son vías no pavimentadas. Estas pueden incluir desvíos, producto de alguna obra en proceso, caminos de acceso y plataformas de construcción necesarias para la construcción de vías permanentes o terraplenes sobre suelos blandos. El uso de geosintéticos permite que el equipo pesado pueda transitar por un área que es muy débil para soportar este tipo de carga por sí misma ya que su uso puede ser una alternativa económica al uso de tratamientos de mejoramiento más costosos.

Por otro lado, las vías permanentes, que pueden ser pavimentadas o no pavimentadas, generalmente, esperan un tráfico mayor a un millón de pasadas de ejes equivalentes y un periodo de vida que supera los diez años. En este caso, el diseño consiste en determinar los materiales adecuados para asegurar que no habrá una falla prematura de la sección proyectada del pavimento.

Se pueden definir dos tipos de fallas principales: una falla estructural y una falla funcional del pavimento.

La primera, se refiere a que el colapso de la sección total o la falla de una o más de las capas que lo componen impedirá que la sección sea capaz de soportar las cargas de tráfico para las cuales ha sido diseñada. Esta falla puede ser causada por la intrusión de material de la subrasante en las capas granulares, disminuyendo su capacidad de drenaje y sus propiedades mecánicas. También puede ser producida por el paso de cargas de tráfico superiores a las consideradas en el diseño o por asentamiento diferenciales excesivos que se producen en la subrasante.

Otra de las causas principales de las fallas estructurales de pavimentos es la excesiva presencia de agua dentro de la sección debido a un inadecuado drenaje. Esto puede resultar en cambios en el volumen de los materiales, un aumento en la presión de poros o la pérdida de resistencia en la subrasante.

En cambio, la segunda, se refiere a deficiencias superficiales que se puedan dar sobre la superficie de rodamiento que afecten la “serviciabilidad” del camino. Es decir, su capacidad para brindar un tránsito cómodo y seguro al usuario. Por ejemplo, ondulaciones longitudinales y deformaciones transversales excesivas, textura de la superficie inadecuada, alto porcentaje de áreas reparadas, etc. En algunas ocasiones, de no llegarse a tratar este tipo de falla a tiempo, puede llegar a producirse una falla estructural.

Una de las causas de este problema puede ser el uso de materiales contaminados durante la construcción que reduzcan la capacidad de drenaje de las capas granulares. Asimismo, un mantenimiento inadecuado de la vía después de su construcción puede generar incomodidad en los usuarios; por ejemplo, esto se puede reflejar en la aparición de grietas a través de las cuales se puede filtrar el agua hacia las capas inferiores.

Para ambos casos, existen geosintéticos que pueden ayudar a solucionar alguno de estos problemas. Para el caso específico del uso de geomallas en el área de pavimentos se conocen algunas aplicaciones principales: control de reflexión de grietas en recapeos asfálticos, mejoramiento de subrasantes y suelos blandos, refuerzo de bases o sub-bases, etc.

Por ejemplo, después de la construcción de una sobrecarpeta, muchas veces se puede apreciar un patrón de agrietamiento, similar al que se tenía en la capa inferior, que aparece antes de lo estimado. A este fenómeno se le denomina “reflexión de grietas” y sus consecuencias pueden ser: disminución en la resistencia estructural del pavimento, aparición de fallas superficiales y discontinuidades en la superficie de rodadura, paso del agua hacia las capas inferiores del pavimento, etc.

Este nuevo agrietamiento se produce debido a que la nueva carpeta es incapaz de soportar los esfuerzos de tensión que se producen debido al paso de los vehículos y a los diferenciales de temperatura que generan cambios en la sección del pavimento (expansión y contracción). Por esta razón, se puede colocar una geomalla en la interface entre la antigua y la nueva carpeta a ser colocada; esta deberá ser capaz de retardar la aparición de grietas y aumentar el tiempo de vida del tratamiento aplicado.

Por otra parte, la existencia de suelos blandos que trabajan como subrasante presenta un problema común para la construcción de pavimentos debido a que la falla prematura de esta representa un deterioro que se refleja sobre la estructura terminada. Algunas soluciones para este problema pueden ser el reemplazo del material pobre o contaminado por otro de características adecuadas, la estabilización con algún agente externo (cemento, cal, etc.), uso de pilotes o insertos utilizando fragmentos de roca, un

sistema de drenaje que permita controlar la saturación del suelo, uso de algún material sintético (geotextiles o geomallas), etc.

En este caso, los principales beneficios logrados al proponer el uso de geomallas son la reducción de los espesores de corte y relleno; además de la construcción de una plataforma que permita la compactación de las capas superiores a ésta (ETL1110-1-189).

Así mismo, la geomalla cumple una función secundaria de separación de materiales entre el terreno natural y el que será usado como relleno. A pesar de que el elemento de refuerzo cuenta con aberturas, el confinamiento de las partículas de agregado evita el movimiento natural de estas (fenómeno conocido como “bombeo”) bajo la aplicación de cargas. Esta función está asociada, también, a la granulometría de los materiales involucrados; es por eso que se recomienda hacer un análisis adicional para determinar si es necesario colocar algún material adicional que impida la mezcla de los mismos (por ejemplo, un geotextil).

Por último, en el caso del refuerzo de las capas estructurales del pavimento (base y sub-base) se busca mejorar el desempeño de la estructura a través del control del ahuellamiento producido en la superficie debido al desplazamiento lateral de las partículas granulares al intentar alejarse del área de aplicación de las cargas de tráfico. Además, se puede aumentar la vida útil del pavimento manteniendo los espesores de diseño o reducir los espesores de material granular a utilizar y los costos de construcción asociados a esta actividad.

Podemos determinar la función que se cumpliría con el uso de una geomalla o geotextil dentro de la estructura de un pavimento de acuerdo a la tabla presente en el Anexo 01, basada en el CBR de la subrasante de la sección a analizar; estos valores difieren de acuerdo a diferentes autores y normativas. Es importante recalcar que el CBR que se toma como referencia es el que es tomado IN SITU ya que es el que nos puede dar una idea de la condición exacta del terreno natural.

Para estas dos últimas aplicaciones, los beneficios obtenidos han podido ser determinados y medidos en ensayos de escala real a partir del entendimiento de los mecanismos de refuerzo involucrados en éstas, los cuales se muestran a continuación.

2.2 Mecanismos de refuerzo de las geomallas

Los tres principales mecanismos de refuerzo que son proporcionados por una geomalla biaxial o por una geomalla multiaxial (Giroud y Noiray, 1981; USACOE, 2003) son:

- Confinamiento lateral

Este mecanismo se obtiene por medio de la trabazón que se produce entre las partículas de agregado y la geomalla de refuerzo (Figura 13). Al aumentar el confinamiento lateral e impedir el desplazamiento lateral de las partículas, aumenta el módulo de la capa granular sobre la geomalla. Además, se reducen las deformaciones verticales y los ahuellamientos en la superficie de rodadura.

A lo largo de los años se ha demostrado que este es el mecanismo más importante al momento de determinar el aporte de la geomalla (USACOE, 2003).

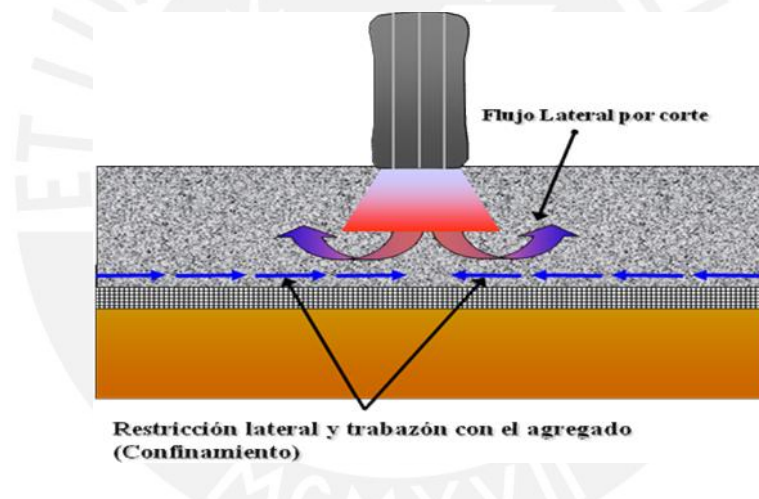


Figura 13. Mecanismo de Confinamiento Lateral (USACOE, 2003)

Si tenemos en cuenta que este confinamiento generado crea una capa de material más rígida; entonces debemos ser conscientes de la importancia de la forma y tipo de abertura para tener un mejor comportamiento del material, el resultado será distinto para cada tipo de geomalla. Además, es importante mencionar que se tendrá un confinamiento “máximo” en la zona próxima al elemento de refuerzo; mientras que, a medida de que nos alejamos de este, este efecto irá disminuyendo (Figura 14). En algunos casos, cuando el espesor de la capa a reforzar es muy grande, será necesario colocar más de una capa de geomalla para asegurar el correcto comportamiento del material y una capa lo suficientemente rígida para soportar las solicitaciones sobre la estructura.

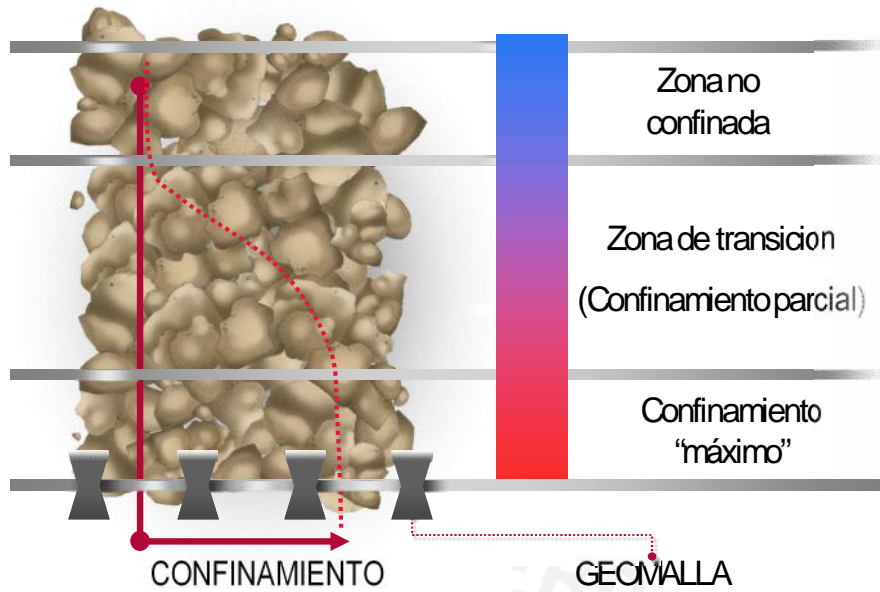


Figura 14. Distribución de zonas de confinamiento (Valencia, 2009)

- Mejoramiento de la capacidad portante

Este mecanismo logra desplazar la superficie de falla, ubicada en un principio en la subrasante blanda, hacia una de mayor resistencia, en este caso la capa granular. Esto es posible ya que la rigidez de la geomalla permite la redistribución de las cargas en un área mayor (Figura 15) disminuyendo los esfuerzos que el material no competente (suelo blando) debe soportar.

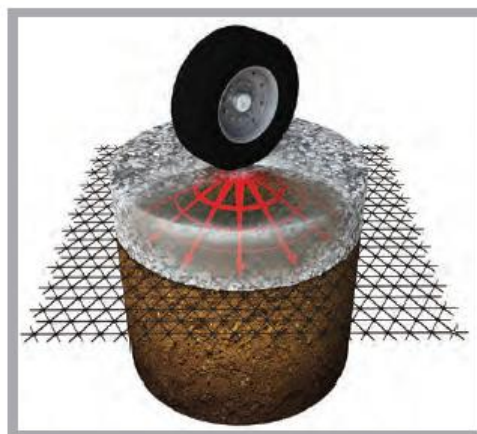


Figura 15. Mecanismo de Mejoramiento de Capacidad de Soporte (TENSAR, 2013)

Este es un mecanismo considerado al momento de trabajar en vías no pavimentadas o cuando la capacidad portante de la subrasante es muy baja. También se le conoce como efecto del “zapato de nieve” por su similitud con este objeto utilizado en algunos países para poder caminar sobre este tipo de terreno (Figura 16).



Figura 16. Efecto de zapato de nieve (TENSAR, 2013)

- Membrana tensionada

Este mecanismo se origina cuando se presenta una deformación considerable en el terreno natural debido a cargas vehiculares presentes sobre la vía; en este se desarrollan esfuerzos importantes que son soportados por la resistencia a la tensión que tiene el refuerzo (Figura 17).

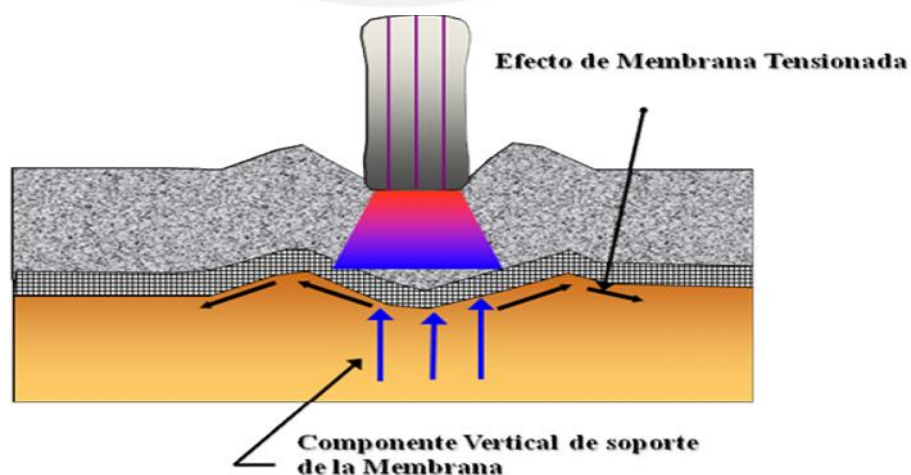


Figura 17. Efecto de Membrana Tensionada (USACOE, 2003)

Durante mucho tiempo se consideró que este era el principal mecanismo de refuerzo. Sin embargo, si se hace un análisis de las condiciones necesarias para activarlo podemos encontrar una paradoja.

Debido a que este mecanismo se activa para altos niveles de deformación, generalmente solo ocurre en vías no pavimentadas después de que la vía ha soportado un elevado número de cargas debido al tráfico. Esto se debe a que en vías pavimentadas, la deformación necesaria para movilizar este sistema de refuerzo es mucho mayor a la que se espera sin que se generen consecuencias perceptibles por el usuario.

Por esta razón, podemos considerar que en aplicaciones de la geomalla como MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES, se deberá considerar el mejoramiento de la capacidad portante y, en menor grado, el efecto de membrana tensionada. No obstante, para aplicaciones de REFUERZO DE BASE del pavimento, el confinamiento lateral es el mecanismo de refuerzo más importante y el que deberíamos asegurar.

2.3 Características de las geomallas biaxiales y multiaxiales

En el área de pavimentos, la geomalla biaxial (Figura 18) cumplió un papel importante ya que alcanzó un amplio desarrollo y se encontraron distintas aplicaciones para esta. Sin embargo, su uso como refuerzo de base tuvo un desarrollo menor debido a la falta de conocimiento de los mecanismos de refuerzo que se presentan al usar este material.

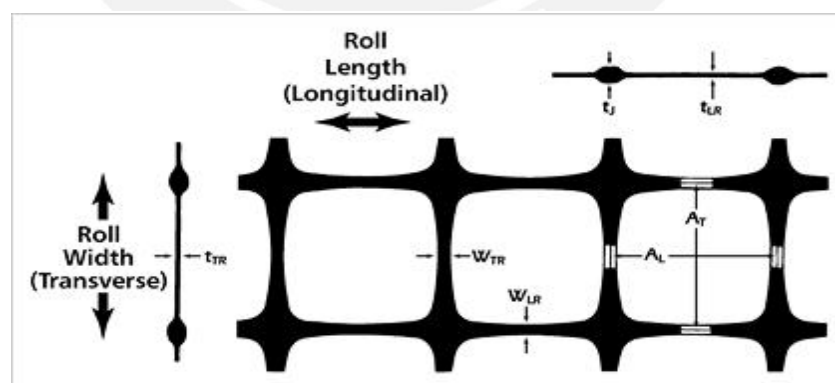


Figura 18. Forma de las aberturas de las geomallas biaxiales (TENSAR, 2013)

En la Tabla 02 se presentan los resultados obtenidos en la investigación desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos – USACOE en el año 1992. En este ensayo, a escala real, se compararon secciones reforzadas con diversos tipos de geomallas biaxiales con el fin de determinar su aporte dentro de la sección de pavimento ensayada y así poder obtener mayor información acerca de las características que afectaban su comportamiento estructural.

Costillas	Espesor	Mientras más gruesa sea, es mejor.
	Rigidez	Mientras más rígida sea, es mejor.
	Forma	La forma rectangular es mejor.
Apertura	Tamaño	Depende del relleno, se debe asegurar la trabazón.
	Forma	Circular o Cuadrada es mejor.
	Rigidez	Una mayor rigidez es mejor.
Unión	Resistencia	Alta comparada con las costillas (>90%)
General	Rigidez Torsional	Mientras más alta sea, es mejor.
	Estabilidad de la abertura	Cuando es más alta es mejor.

Tabla 02. Propiedades de la geomalla biaxial que afectan su comportamiento (Valencia, 2009)

Por lo tanto, las características más importantes al momento de elegir una geomalla para utilizarla como refuerzo de base serían:

- Tamaño de la abertura

Las aberturas de las geomallas deben tener el tamaño suficiente para permitir que los agregados y el suelo de relleno puedan penetrar a través de estas. Sin embargo, también deben ser suficientemente pequeñas para que las partículas puedan generar una trabazón eficaz y asegurar el confinamiento del material dentro de estas.

- Grosor de las costillas

Al momento de confinar las partículas de agregado, el grosor de las costillas juega un papel importante ya que mientras mayor sea este, la interacción entre la geomalla y el suelo será mayor. Además, las costillas

cuadradas, o rectangulares, tienen un mejor comportamiento para lograr este mecanismo en comparación con las de forma redondeada.

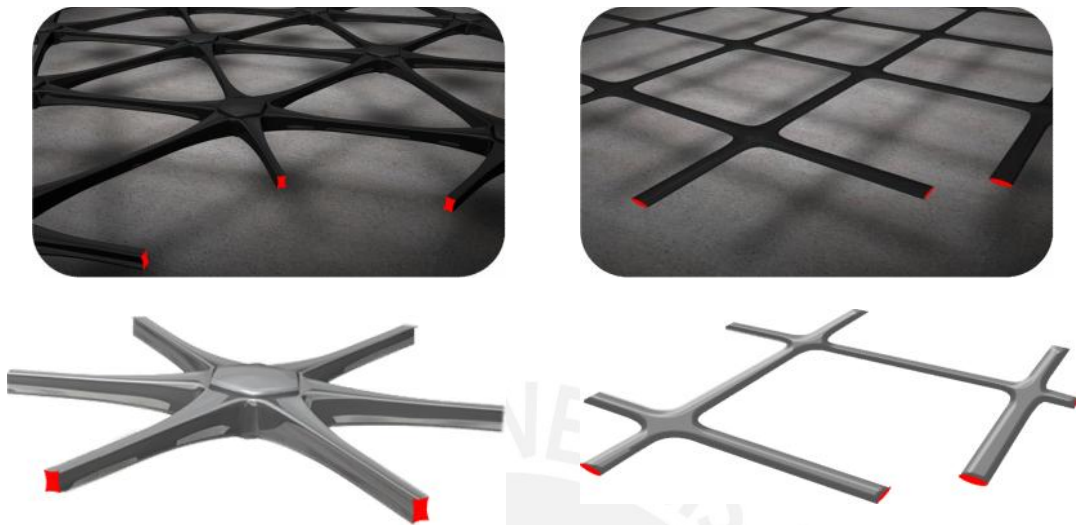


Figura 19. Diferencias en la disposición de las costillas entre las geomallas multiaxiales y biaxiales (TENSAR, 2013)

- Resistencia a la torsión

Se refiere a la resistencia ante el movimiento de rotación que presenta la unión central de una muestra en el mismo plano de la carga aplicada.

- Resistencia a la tensión

En las aplicaciones en pavimentos no es una propiedad determinante ya que se busca que los elementos de refuerzo no soporten altos esfuerzos de tensión sino que puedan soportar las sollicitaciones a partir de otros mecanismos de refuerzo ya mencionados.

- Resistencia de las juntas

Se busca la mayor eficiencia posible, es decir, que las juntas sean lo suficientemente resistentes para transmitir las cargas hacia las costillas. Es así que si existiese alguna falla por resistencia, esta debería producirse en las costillas y no en las uniones.

A partir del entendimiento de estas propiedades, a lo largo de cinco años, una de las empresas líderes en el mercado desarrolló un nuevo material buscando obtener un mejor comportamiento que las geomallas biaxiales. Es en este contexto que se crea la geomalla MULTIAXIAL que tiene como principal característica sus aberturas triangulares aprovechando la estabilidad de esta forma geométrica (Figura 20).

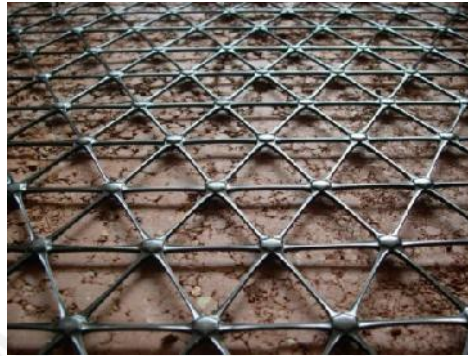


Figura 20. Forma de las aberturas de la nueva geomalla multiaxial (TENSAR, 2013)

Ensayos realizados a pequeña y gran escala (ver Anexo 02) demostraron que:

- Asegurar la trabazón de las partículas del agregado entre las aberturas de la geomalla es la principal medida que se debe cumplir cuando esta es utilizada como refuerzo de base.
- El confinamiento lateral es un mecanismo de refuerzo importante; este estará relacionado con el espesor y la forma de las costillas.
- La distribución de cargas en una mayor área se logrará a partir de la restricción del movimiento de las partículas, esto se logrará aumentando la rigidez de la geomalla y la eficiencia de las juntas.

Con la creación de la geomalla MULTIAXIAL se logró una estructura más rígida. Esto se debe al uso de una nueva disposición de las costillas, en comparación con la usada en las geomallas biaxiales, buscando optimizar el confinamiento de las partículas.

La altura de la costilla asegura la trabazón del agregado granular con la geomalla y permite una mejor transferencia de esfuerzos y una menor deflexión de las capas del agregado; evitando la contaminación o migración de partículas finas hacia las capas de refuerzo.

Además, se buscó que las juntas ya no sean el punto “más débil” de la estructura (Figura 21).

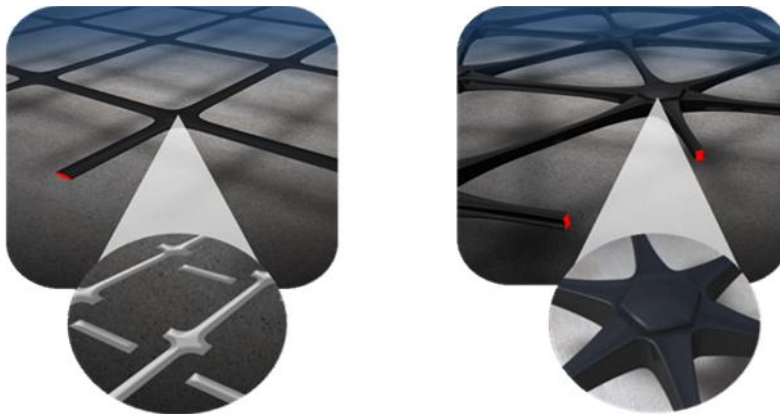


Figura 21. Forma de las juntas en las geomallas biaxiales y multiaxiales (TENSAR, 2013)

Esta mejora en la configuración del material permite que las cargas sean distribuidas radialmente hacia las capas de suelo subyacentes (Figura 22). Sabiendo que las cargas de tráfico a las que estará sometido el pavimento serán transmitidas en todas las direcciones (360 grados), esta característica diferencia a las geomallas multiaxiales de todas las demás existentes en la actualidad.

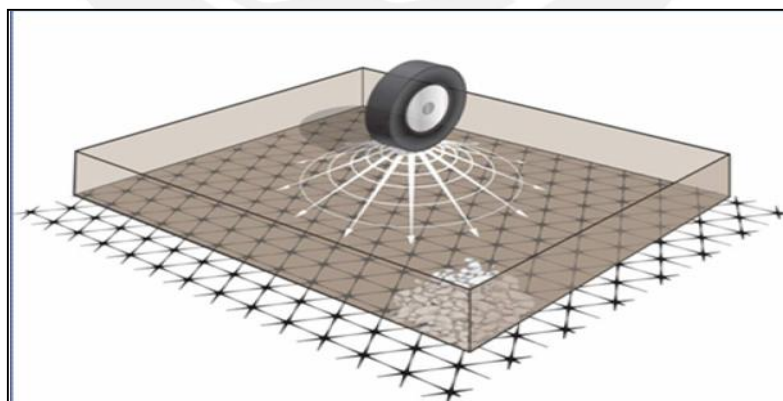


Figura 22. Esquema de la distribución radial de esfuerzos lograda con la geomalla multiaxial (TENSAR, 2013)

2.4 Beneficios obtenidos con el uso de geomallas

Las principales funciones que cumplen los geosintéticos dentro de las estructuras de pavimentos son:

- Separación

Se evita la mezcla de materiales disímiles o de granulometrías distintas. En el caso de materiales granulares a utilizarse, evita su contaminación y de esta manera, se pueden mantener las propiedades asumidas en el diseño inicial para cada una de las capas estructurales.

- Filtración

Permite el paso del agua a través del material colocado. En este caso, es muy útil para envolver trincheras drenantes o detrás de muros de contención con gaviones para evitar la colmatación de estos debido a la migración de partículas finas llevadas por algún flujo de agua presente.

- Drenaje

En este caso, se refiere a la transmisión del agua en el mismo plano del material colocado. Es decir, es capaz de conducir el agua de un lado a otro, generalmente, a través de vacíos presentes en su propia estructura.

- Refuerzo

Esta es la aplicación más importante en este caso ya que es el principal aporte del uso de geomallas. En este caso, le entrega al suelo la capacidad de soportar mayores esfuerzos a través de los mecanismos que ya han sido explicados.

Sin embargo, en un inicio, en el caso de las geomallas, se omitieron dos beneficios potenciales muy importantes: la reducción de espesores de la sección y el incremento de la vida útil de la estructura. Esto se debió, principalmente, a la falta de información correspondiente a diferentes factores como la deformación necesaria para activar los mecanismos de refuerzo de las geomallas, el efecto del creep producido sobre el elemento

de refuerzo a lo largo del tiempo de diseño de la vía, los beneficios económicos que se podían lograr al colocar materiales “de mayor costo” como refuerzo, falta de entendimiento acerca de la influencia que tienen el tamaño de agregado a usar, la interacción entre el suelo y el geosintético a usar, etc. Esto hizo que se tomara conciencia de que el comportamiento de cada material utilizado varía de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas y las del agregado que se coloca por encima de este.

No obstante, actualmente se puede contar con esta información ya que a lo largo de los años, y a través de muchas investigaciones realizadas se han podido responder muchas de estas preguntas. A partir de esta información, se han determinado seis principales beneficios que se obtienen a partir del uso de geomallas tanto en mejoramiento de subrasantes como en refuerzo de capas granulares. Estos pueden ser resumidos en la siguiente lista:

- Reducción de espesores

A través del aumento de la capacidad de soporte de una capa de agregado, se pueden reducir espesores de material a reemplazar en el caso de que se trate de un mejoramiento de subrasantes. Asimismo, dado que el uso de geomallas permite la construcción de capas más rígidas, se pueden reducir los espesores necesarios para el caso de bases o subbases granulares. Esto conlleva un ahorro en el costo final de transporte de material, en el caso en el que exista una escasez de material granular cerca a la zona (por ejemplo, durante la construcción de una vía en la selva), o la reducción de los tiempos de instalación y entrega de la obra.

- Incremento de vida útil de la vía

Si mantenemos el espesor inicial de diseño, podemos lograr un aumento significativo en el número de ejes equivalentes (ESAL's) que soportará el pavimento antes de presentar fallas o necesitar de mantenimiento. Esto se puede traducir en un ahorro considerable en los costos de mantenimiento de la vía proyectada y un ahorro a largo plazo.

- Incremento de capacidad de soporte

Las capas de suelo reforzadas con geomallas admiten una mayor carga sobre estas. Esto se puede ver reflejado en su uso en haulroads o caminos mineros, vías sobre suelos muy blandos o suelos que soportarán cargas de tráfico muy altas.

- Cobertura de vacíos

Tal vez esta sea una aplicación no muy usada, pero con el uso de geomallas es posible cruzar vacíos que se puedan producir por el colapso debido a la erosión o falla de algunas zonas de la subrasante. Esta solución solo es temporal, y se recomienda utilizarla hasta que se produzca la reparación de la falla. En este caso, el mecanismo de membrana tensionada será el más relevante ya que la geomalla tendrá que desarrollar fuerzas de tensión.

- Nivelación de subrasantes débiles

A través de los mecanismos ya descritos, se logra una “APARENTE” capacidad de soporte mayor. Esta característica permite que se puedan crear plataformas constructivas o vías de acceso sobre suelos muy blandos (esto es útil en la construcción de diques flotantes o vías de acceso sobre suelos pantanosos).

- Control de asentamientos diferenciales

Este beneficio se puede lograr colocando dos o más capas de geomallas ya que se logra crear una capa más rígida de acuerdo a un confinamiento lateral “más efectivo” gracias al uso de más de una capa de geomalla.

2.5 Metodologías de diseño

2.5.1 AASHTO (Diseño convencional)

Las ecuaciones originales de la AASHO, producto de pruebas a escala natural y para cualquier tipo de pavimento que datan de 1961, sirven como base para este método de diseño. En esta ocasión se ha utilizado la versión publicada en el año 1993 para obtener los resultados presentados en este trabajo.

A lo largo de los años, se han realizado modificaciones para incluir parámetros o factores no considerados, incluyendo experiencias adquiridas por esta institución, otras dependencias y consultores independientes.

En relación al diseño de pavimentos flexibles, este método busca identificar un “número estructural” o SN que pueda soportar el nivel de carga al que será solicitada la estructura. Para realizar este cálculo, se consideran los siguientes parámetros:

- TRÁNSITO:

Para realizar el cálculo del parámetro del tránsito (W_{18}) se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$W_{18} = TPD \times \%A \times \%B \times 365x \frac{[(1+r)^n - 1] \times F.C.}{Ln(1+r)}$$

Ecuación 01. Cálculo de W_{18} (AASHTO, 1993)

- **W_{18}** : Numero de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.
- **TPD** : Transito promedio diario inicial.
- **A** : Porcentaje estimado de vehículos pesados.
- **B** : Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño.
- **r** : Tasa de crecimiento anual de transito.
- **n** : Periodo de diseño.
- **F.C.** : Factor camión.

Este valor corresponde al número de ejes equivalentes sencillos de 18,000lb (8.2ton), acumulados durante el periodo de diseño del pavimento, que transitarán por el carril de diseño en este tiempo.

- Confiabilidad:

Con este parámetro se busca asegurar cierta certeza de que la solución obtenida tenga una duración igual o mayor al periodo de diseño. Para esto, se consideran algunas variaciones a presentarse en la predicción del tránsito o en el comportamiento de la sección diseñada.

También se le conoce como “R” y en el método de la AASHTO utilizado sus valores varían entre 50 y 99.99 de acuerdo al nivel que tendrá la vía como podemos ver en la Tabla 03. A medida que aumente la importancia de la vía, mayor deberá ser este valor.

NIVELES DE CONFIABILIDAD “R”	
CLASIFICACION FUNCIONAL	NIVEL RECOMENDADO POR AASHTO PARA CARRETERAS
Carretera Interestatal o Autopista.	80 – 99.9
Red Principal o Federal.	75 – 95
Red Secundaria o Estatal.	75 – 95
Red Rural o Local.	80

Tabla 03. Niveles de confiabilidad (AASHTO, 1993)

- Variabilidad:

También llamada “S_o”, está estrechamente relacionada con el parámetro descrito anteriormente y representa las posibles variaciones que se pueden presentar en los datos utilizados en el diseño. La guía AASHTO recomienda que para el diseño de pavimentos flexibles se utilice un valor dentro del rango 0.40 – 0.50; mientras que para pavimentos rígidos, se toma como referencia los valores entre 0.30 – 0.40.

- Módulo de resiliencia efectivo:

Para este método, la propiedad que define cada uno de los materiales es el módulo de resiliencia efectivo o “Mr”; este módulo se obtiene en base a pruebas de laboratorio realizadas con el material a utilizarse en la conformación de la capa de subrasante.

El módulo de resiliencia es una medida de las propiedades elásticas del suelo y se cuenta con escasa información para poder calcularlo con un ensayo de laboratorio. Sin embargo, existen muchos algoritmos reconocidos internacionalmente que permiten obtener el Mr a partir del cálculo de otras propiedades; en este caso se utilizaron los valores de CBR obtenidos de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$M_r = 2555 \times CBR^{0.64}$$

Ecuación 02. Cálculo de Mr (AASHTO, 1993)

- **Mr** : Módulo de resiliencia del material buscado
- **CBR** : California Bearing Ratio del material de subrasante

- Serviciabilidad:

Sabemos que las vías deben estar hechas para el confort y la conveniencia de los usuarios, estas características son una medida subjetiva de la opinión de cada uno de los que transitan por éstas. Podemos definir el cambio o pérdida en la calidad del servicio de la vía mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta PSI = p_o - p_f$$

Ecuación 03. Cálculo de PSI (AASHTO, 1993)

Donde podemos definir el “p_o” como la estimación hecha por el usuario inmediatamente después de la construcción (el valor recomendado para pavimentos flexibles es 4.2). Mientras que “p_f” es el índice de servicio terminal, un valor que se recomienda oscile entre 2.5 y 3.0 para vías importantes.

Con el uso de los parámetros arriba descritos, se procede a encontrar el número estructural correspondiente a las diferentes capas del pavimento. Este se puede encontrar mediante la siguiente expresión:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Ecuación 04. Cálculo del número estructural necesario de la sección a diseñar
(AASHTO, 1993)

- **W₁₈** : Numero de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.
- **Z_R** : Confiabilidad
- **S_o** : Variabilidad
- **SN** : Número estructural de la sección.
- **PSI** : Serviabilidad
- **M_r** : Módulo de resiliencia del material de subrasante

También se puede hacer uso de la Figura 23 para poder obtener el SN a utilizar:

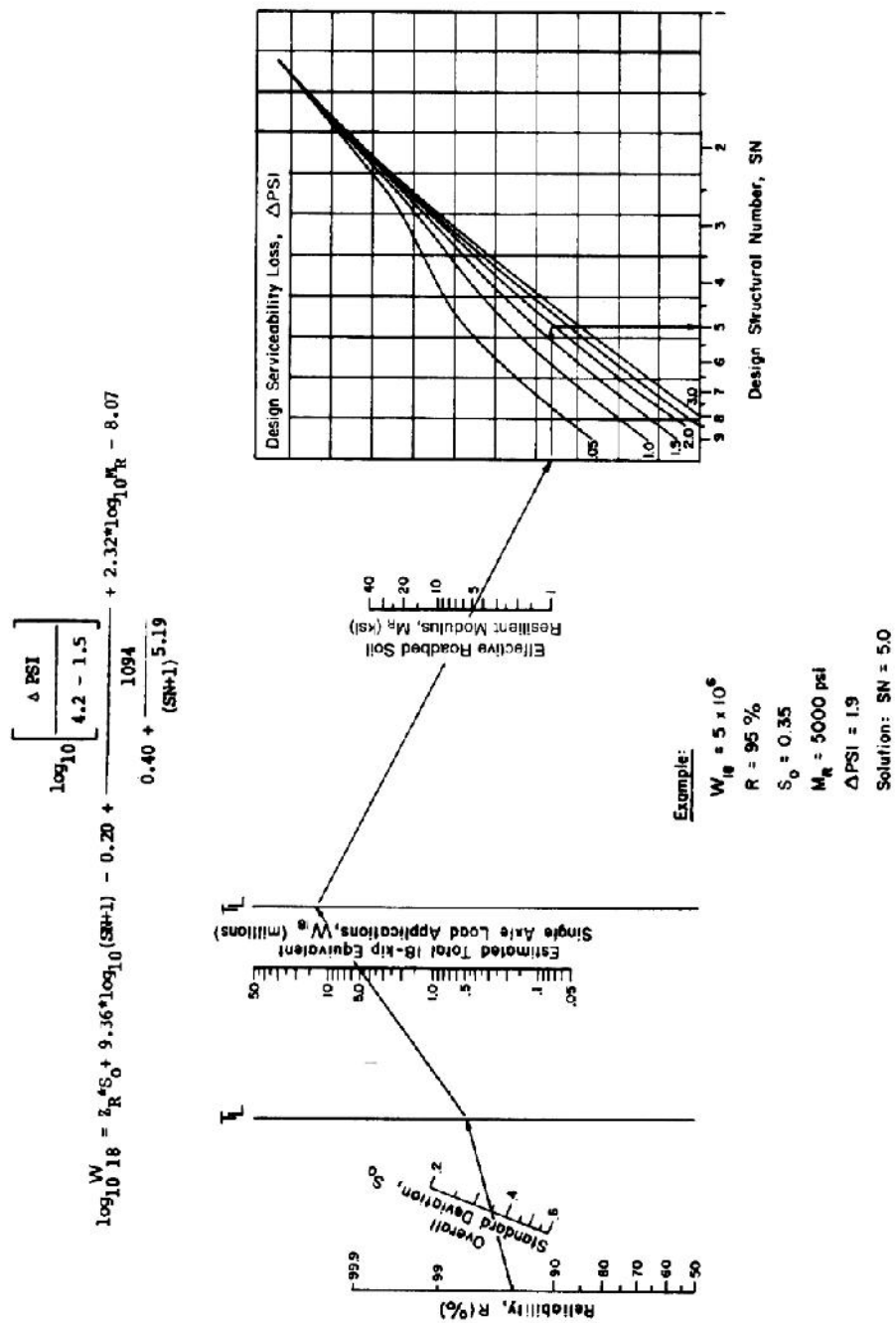


Figura 23. Nomograma para la obtención del SN (AASHTO, 1993)

Una vez obtenido este valor, se relacionan los espesores de cada una de las capas mediante la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_1 D_2 + a_3 m_2 D_3$$

Ecuación 05. Fórmula para encontrar el Número Estructural de la sección diseñada (AASHTO, 1993)

Donde:

- a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales de cada una de las capas
- m_1, m_2 : Coeficientes de drenaje de cada una de las capas
- D_1, D_2, D_3 : Espesor de cada una de las capas

En este caso, el coeficiente a_1 se utiliza para representar el aporte de la carpeta asfáltica (Figura 24), el coeficiente a_2 corresponde a la base granular (Figura 25) y para la subbase granular se utiliza el coeficiente a_3 (Figura 26).

Los valores a usarse pueden obtenerse de las figuras presentadas en este documento. Estas representan diferentes correlaciones con distintos ensayos y propiedades del suelo a utilizarse como el módulo elástico y el valor de CBR del agregado.

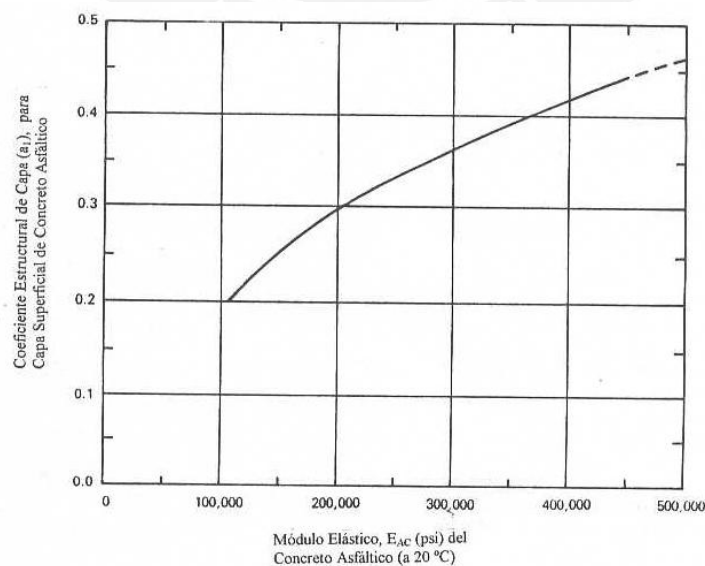
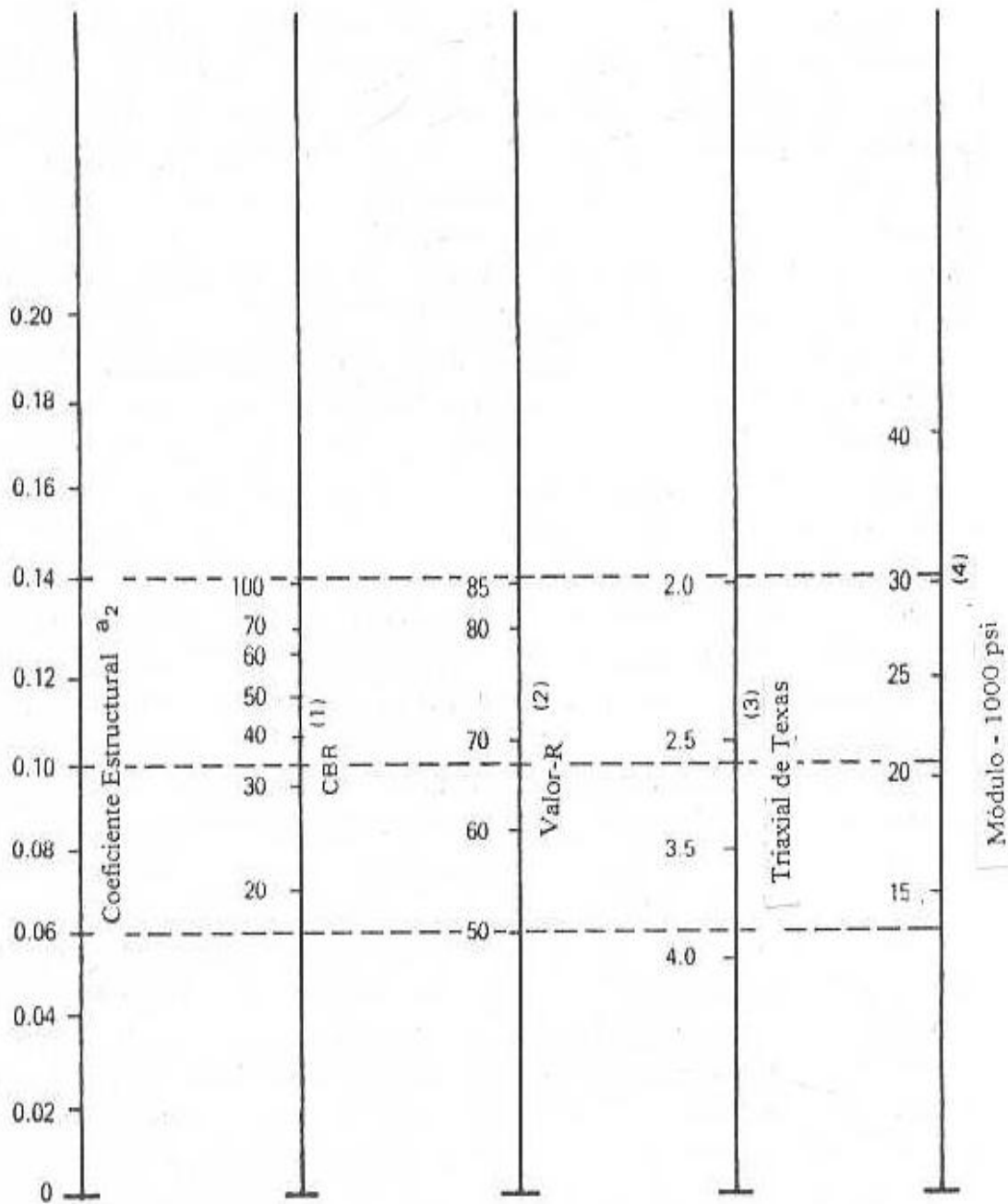
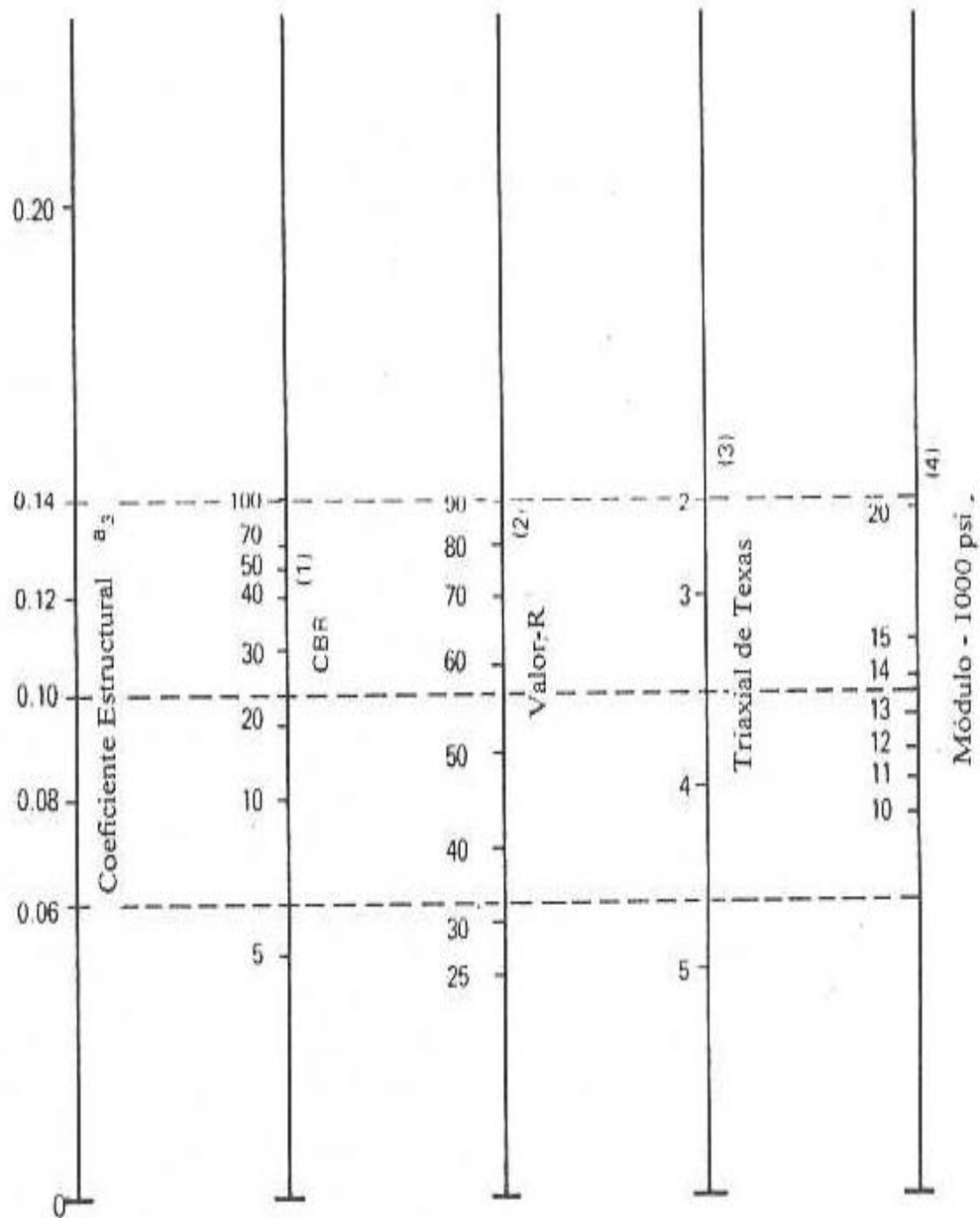


Figura 24. Obtención de coeficiente a_1 (AASHTO, 1993)



- (1) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 25. Obtención de coeficiente a_2 (AASHTO, 1993)



- (1) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 26. Obtención de coeficiente a_3 (AASHTO, 1993)

Por otro lado, para la obtención de los coeficientes de drenaje m_2 y m_3 que corresponden a las capas de base y subbase, se define la capacidad de drenaje para eliminar la humedad interna del pavimento según las siguientes consideraciones:

Calidad del Drenaje	Tiempo necesario para remover el agua dentro de la capa de pavimento
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	No hay drenaje de agua

Tabla 04. Diferencias en la calidad del drenaje de la estructura (AASHTO, 1993)

A partir de estas definiciones, se pueden obtener los coeficientes recomendados por AASHTO (Tabla 05) en función de la calidad del drenaje y el tiempo, expresado como un porcentaje respecto a un año, en el que estará expuesta la estructura a niveles cercanos a la saturación.

Calidad del Drenaje	% del Tiempo que la Estructura del Pavimento está Expuesta a Niveles de Humedad Cercanos a la Saturación			
	< 1	1 - 5	5 - 25	> 25
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.8	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Tabla 05. Diferencias en la calidad del drenaje de la estructura (AASHTO, 1993)

2.5.2 AASHTO R-50

La AASHTO ha trabajado dos guías con respecto al uso de geosintéticos para el refuerzo de bases granulares en estructuras de pavimentos flexibles: AASHTO PP 46 publicado en el año 2001, y AASHTO R-50 (2009), que es una versión actualizada y la última versión de este documento hasta el momento. Estos documentos tienen la finalidad de brindar una guía para el uso de estos materiales (se refiere, principalmente al uso de geotextiles y geomallas) cuando se busca incluir el aporte estructural que se genera al colocar un refuerzo tanto en la base como en la subbase de la estructura del pavimento.

La omisión de mayor información respecto a este beneficio del uso de estos geosintéticos en manuales publicados por la AASHTO previamente se debió a la ausencia de información respecto a los siguientes temas:

- Información cuantificable respecto del beneficio estructural encontrado al usar bases y subbases reforzadas.
- La deformación que se debía alcanzar para movilizar los mecanismos de refuerzo (membrana tensionada) se creía muy superior a la permitida para pavimentos.
- El beneficio económico alcanzado que justifique el uso de estos nuevos materiales.
- Propiedades mecánicas necesarias relacionadas con el desempeño, el diseño y la construcción.
- Falta de entendimiento de la influencia del tamaño del agregado a usar y la interacción que se produce entre este y el geosintético. Esto está directamente relacionado con el mecanismo de refuerzo de confinamiento lateral.
- Influencia de la deformación por creep y relajación de esfuerzos de estos materiales sobre los beneficios que se pueden lograr durante el período de vida útil de la vía.

Así mismo, para elaborar estos documentos, se tomaron como referencia otras publicaciones realizadas por instituciones afines como la Asociación de Materiales Geosintéticos (GMA) y el Instituto Nacional de Carreteras (NHI):

- WHITE PAPER I – “Geosynthetics in Pavement Systems Applications” (1999)
- WHITE PAPER II – “Geosynthetics Reinforcement of the Aggregate Base Course of Flexible Pavement Structures” (2000)
- “Geosynthetic Design and Construction Guidelines” (1999)

Ya que los beneficios del uso de los geosintéticos usados para esta aplicación aún no se han podido determinar teóricamente a través de un método validado, a pesar de que actualmente existen muchas investigaciones de modelos probados a escala real, estos resultados siguen siendo el punto de partida para elaborar un diseño en campo que arroje resultados muy cercanos a la realidad.

Además, se hace hincapié en el hecho de que los resultados obtenidos específicamente para algún tipo de geosintético no se pueden relacionar con otros sin hacer comprobaciones en campo para determinar el aporte estructural y los beneficios económicos que se pueden lograr para cada uno en particular.

Es decir, no se puede tomar la investigación elaborada por un fabricante en especial, con un material específico y con características propias y esperar que se comporte de la misma manera que uno “similar” sin tener resultados de ensayos realizados bajo diferentes condiciones de tráfico, materiales, etc. Esto se puede explicar recordando que los mecanismos de refuerzo de estos materiales están relacionados con las propiedades mecánicas de ellos mismos y del material de relleno que los rodea.

Esto es importante al momento de elegir el material con el que se trabajará el diseño final, cada proveedor deberá justificar los valores presentados en sus fichas técnicas a través de investigaciones y ensayos validados por distintas instituciones reconocidas.

Siendo este documento una guía resumida donde solo se dan indicaciones generales; para tener un poco más de información nos remitiremos a la información contenida en el documento WHITE PAPER II de la GMA.

2.5.3 GMA WHITE PAPER II

Este documento fue preparado como un soporte adicional a los documentos preparados por la AASHTO. A diferencia del WHITE PAPER I (enfocado en recomendaciones de instalación y daños producidos durante la construcción), este documento tiene como objetivo específico resaltar los beneficios del uso de geosintéticos en estructuras de pavimentos recomendando algunos criterios y un procedimiento de diseño para el caso de refuerzo de bases granulares.

Los materiales evaluados en este documento son las geomallas (que pueden ser extruidas o tejidas), los geotextiles y los geocompuestos formados por los materiales antes mencionados. Estos últimos son considerados en el caso de ser previamente fabricados como un geocompuesto (un material formado por uno o más geosintéticos) o por la colocación de uno por encima del otro.

A partir de la información recopilada, se ha determinado un método de diseño detallado. La primera recomendación que se da es que antes de decidir utilizar un pavimento reforzado con geomallas, se evalúen las condiciones del proyecto y se determine si es favorable o no el uso de estos materiales de acuerdo a la Tabla 06.

Este método es compatible con el método tradicional presentado en AASHTO 1993 añadiendo algunos conceptos que serán importantes para poder determinar los espesores finales de la estructura:

- TBR (Traffic benefit ratio): Es el número que indica el incremento de números de ciclos de carga para alcanzar una falla previamente definida en comparación con el número de ciclos de carga medidos sobre una sección no reforzada. También puede ser denominado TIF (Traffic improvement factor).
- BCR (Base course reduction): Este es un factor que se define como la reducción, en porcentaje, en el espesor necesario para alcanzar una falla determinada con anterioridad bajo las mismas condiciones al comparar una sección reforzada con una no reforzada.

A continuación se detallará un procedimiento paso a paso este método de diseño que luego será tomado como referencia para elaborar un caso práctico.

PASO 1

Evaluación del uso de un geosintético como refuerzo

El primer paso deberá ser determinar los valores de la subrasante a través de la medición de su CBR, su módulo resiliente (M_r), o su resistencia no drenada al corte (c_u). A partir de estos valores se le puede clasificar como baja, moderada o firme. Como referencia se tiene una clasificación basada en los valores de CBR medidos en campo donde se tiene que una subrasante baja presenta valores menores a 3; una moderada, valores entre 3 y 8; y, por último, una subrasante firme será aquella que cuenta con valores de CBR superiores a 8.

Luego, se deberá estimar el espesor de las capas de base y subbase, asumiendo que el espesor es el mismo que en el caso no reforzado (cuando se busca aumentar el desempeño de la sección). Así mismo, si se buscan reducir los espesores de estas capas, se puede estimar una reducción entre el 20-50% (usualmente esta reducción se limita a un rango entre 75-125mm).

Por otro lado, se deberá determinar si se tendrá un material de relleno de granulometría abierta o bien gradado y a partir de esto, se deberá definir el valor del coeficiente de drenaje ("m" según AASHTO) correspondiente.

Con estos valores, se puede determinar si es aplicable o no el uso de geosintéticos con la ayuda de la Tabla 06

Condiciones de Diseño de la vía		Tipo de Geosintético a ser usado					
Subrasante	Espesor de Base/Subbase	Geotextil		Geomalla		Geocompuesto (Geotextil-Geomalla)	
		No Tejido	Tejido	Extruida	Tejida	Base de granulometría abierta	Base bien gradada
Baja (CBR < 3)	150 – 300	NT ⁴	1	1	4	1	NT ⁵
	> 300	NT ⁴	NT ⁴	3	3	3	NT ⁵
Moderada (3 < CBR < 8)	150 – 300	NT ⁶	3	1	4	1	NT ⁵
	> 300	NT ⁶	NT ⁶	NT ⁷	4	4	NT ⁵
Firme (CBR > 8)	150 – 300	2	2	3	4	4	NT ⁵
	> 300	2	2	2	2	2	NT ⁵

Tabla 06. Aplicabilidad o no del uso de geosintéticos (AASHTO, 2000)

Leyenda:

1. Usualmente aplicable
2. Usualmente no aplicable
3. Aplicable para algunas (varias) condiciones
4. Insuficiente información hasta este momento

Notas:

1. Se asume que toda la base o subbase estará reforzada. Para esto se asume que el refuerzo se colocará en la parte inferior de la capa o dentro de esta (usualmente cuando el espesor es mayor a 300mm). No se recomienda colocar un espesor menor a 150mm cuando se construye sobre subrasantes de baja capacidad. Así mismo, el espesor mínimo de relleno sobre el refuerzo también deberá de ser 150mm.
2. Para bases de granulometría abierta o bases de poco espesor sobre subrasantes húmedas y conformadas por suelos finos, un geotextil de separación debe ser considerado junto con la geomalla de refuerzo.
3. Se asume una base colocada directamente sobre la subrasante, una capa de subbase también puede proporcionar una adecuada filtración a la estructura.
4. Se puede colocar una geomalla como refuerzo de base; sin embargo, esta aplicación se considera un mejoramiento de subrasante.
5. Un geotextil no es requerido para brindar filtración a la estructura cuando se usa un material bien gradado como material de base; por lo tanto, un geocompuesto de refuerzo no aplicaría en este caso,
6. Aplicaciones de filtración y separación; en este caso, no aplica como refuerzo.
7. Usualmente no se aplica cuando se coloca la geomalla en la parte inferior de la capa de base a reforzar.

PASO 2

Diseño de los espesores de las sección no reforzada

En este caso, se debe realizar un diseño tradicional de la sección sin ningún tipo de refuerzo eligiendo el método más conveniente. En el caso práctico que se presentará se utilizará el método de AASHTO 93 ya descrito anteriormente

PASO 3

Determinar los beneficios de utilizar un refuerzo geosintético

Revisar los beneficios que pueden ser cuantificables en cuestión de reducción de gastos y ahorro en el costo total de la obra usando como referencia la Tabla 07. Hacer una lista de los beneficios que se están buscando con este diseño: reducción de espesores de las capas granulares del pavimento, incremento del desempeño de la sección o una combinación de ambos, etc.

PASO 4

A partir de la identificación del objetivo que se busca con el diseño, se puede determinar qué factor utilizar: TBR o BCR. El TBR se puede utilizar para cualquiera de los beneficios antes mencionados; mientras que el BCR, solo será una opción útil cuando se busquen reducir espesores de alguna de las capas estructurales.

Se deberá buscar el valor más adecuado de TBR o BCR para cada proyecto en específico. Con este fin, se buscan los valores obtenidos en ensayos realizados que tengan condiciones muy parecidas a las del proyecto evaluado. Cabe recalcar que deberán ser ensayos de laboratorio y pruebas de campo realizadas con el mismo tipo de refuerzo que se quiere recomendar. De no contar con esta información, se deberá llevar a cabo alguna prueba que permita determinar este coeficiente.

Por último, es importante señalar que la calidad de los resultados obtenidos dependerá mucho de la elección de un coeficiente adecuado. Recordemos que cada tipo de refuerzo se conforma de una manera diferente y que hay muchos factores que afectan su desempeño (tipo de agregado, tamaño máximo de partículas, ahuellamiento máximo permitido, etc.)

BENEFICIO	CONDICIÓN INICIAL DE LA SUBRASANTE		
	Baja (CBR < 3)	Moderada (3 < CBR < 8)	Firme (CBR > 8)
Reducción de excavaciones	1	2	3
Reducción del espesor de agregado necesario para estabilizar la subrasante	1	2	3
Reducción de la alteración de la subrasante durante la construcción	1	2	3
Refuerzo de la capa de <u>subbase</u> para reducir la sección de la vía	1	2	3
Refuerzo de la capa de base para reducir la sección de la vía	2	1	2
Refuerzo de la capa de <u>subbase</u> para incrementar el periodo de vida útil de la vía	2	2	2
Refuerzo de la capa de base para incrementar el periodo de vida útil de la vía	1	1	2

Tabla 07. Beneficios a lograrse con el uso de geosintéticos (AASHTO, 2000)

Leyenda:

1. Usualmente es un beneficio que se consigue
2. Se alcanza este beneficio en algunas condiciones
3. Usualmente no se logra este beneficio

PASO 5

Diseño del pavimento reforzado

a. Diseño por extensión del periodo de vida útil de la vía

En este caso, el espesor de cada una de las capas no se modifica y lo que se busca es determinar el tiempo antes de que la sección necesite una rehabilitación.

$$Vida_Util = \frac{W_{18}}{ESALs / año}$$

Ecuación 06. Cálculo de la vida útil de la vía no reforzada (AASHTO, 2000)

Donde:

- **W₁₈** : Numero de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.
- **ESALs** : Ejes equivalentes de carga

El factor de TBR, determinado previamente, es aplicado para calcular un nuevo número de pasadas (W18R) que permitirá obtener el periodo de vida útil de la sección reforzada utilizando la Ecuación 07.

$$W18_R = \frac{W_{18}}{TBR}$$

Ecuación 07. Cálculo del número de ejes equivalentes de una sección reforzada (AASHTO, 2000)

Donde:

- **W₁₈** : Número de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas.
- **TBR** : Traffic Benefit Ratio

b. Diseño por reducción de espesores

Si se utiliza el BCR, se determinará un nuevo espesor de la capa de base (D2R) que permita tener el mismo comportamiento, bajo las mismas sollicitaciones externas, que la sección no reforzada.

$$D2_R = D2_{NR} \times BCR$$

Ecuación 08. Cálculo de espesor de base reforzada utilizando BCR
(AASHTO, 2000)

Donde:

- **D2_R** : Espesor de capa de base reforzada
- **D2_{NR}** : Espesor de capa de base no reforzada
- **BCR** : Base Course Reduction Factor

Por otro lado, si se utiliza el valor de TBR como referencia, se puede utilizar un método indirecto para encontrar un número estructural equivalente (SN_R). Para esto se necesita conocer el W18_R (Paso 5.a) y con este número encontrar el nuevo espesor de base.

$$D2_R = \frac{SN_R - (a_1 \times D_1 + a_3 \times D_3 \times m_3)}{a_2 \times m_2}$$

Ecuación 09. Cálculo de espesor de base reforzada utilizando TBR
(AASHTO, 2000)

Donde:

- **D2_R** : Espesor de capa de base reforzada
- **SN_R** : Número estructural de sección reforzada
- **a₁, a₂, a₃** : Coeficientes estructurales de cada una de las capas
- **m₁, m₂** : Coeficientes de drenaje de cada una de las capas
- **D₁, D₂, D₃** : Espesor de cada una de las capas

c. Diseño por combinación de ambos factores

Es factible determinar un espesor “intermedio” que permita reducir espesores y aumentar, en cierto modo, el desempeño de la sección. Para ello se debería escoger un espesor intermedio entre D2 y D2R

(Paso 5.b) y encontrar el aumento del periodo de vida útil de la sección con este nuevo espesor (Paso 5.a).

d. Diseño por separación y filtración

El geosintético a colocarse como refuerzo también cumple la función de separador entre suelos disímiles (como lo pueden ser el agregado granular de las capas de base o subbase y el suelo que conforma la subrasante) y previene que haya una mezcla entre ellos o que se produzca el fenómeno de “bombeo”.

Sin embargo, en algunos casos, se debe evaluar si es necesario colocar algún filtro adicional para evitar estos problemas; generalmente cuando se tiene la presencia de suelos con partículas muy finas que pueden migrar hacia las capas superiores. Se podría usar una capa de suelo (puede ser un material bien gradado o una arena) o un material sintético (el material más usado para cumplir esta función es el geotextil).

Una recomendación general puede ser empezar por evaluar si el material colocado en las capas de base y subbase servirá como filtro natural. Si esto no es posible, un geotextil puede ser requerido ya que es un material que no involucra un alto costo dentro del presupuesto de la obra por su fácil instalación y transporte y cumple específicamente la función de separación. Asimismo, se puede considerar colocar un geotextil para tener una mayor seguridad. Se puede tomar como referencia el manual de la FHWA (Holtz, et al., 1998) donde se indican algunos criterios para el diseño del geotextil a usar. Por ejemplo, se debe comprobar que se cumpla que el “piping ratio” sea menor que 5 (en el caso de subrasante de alta plasticidad se toma el valor de 10 como referencia). Este valor se define como $D_{15}_{\text{material granular}}/D_{85}_{\text{subrasante}}$. Por otro lado, para el caso de subrasantes de limo y arena muy fina, se añade un criterio adicional que sería $D_{50}_{\text{material granular}}/D_{50}_{\text{subrasante}} < 25$.

PASO 6

Análisis económico

Realizar un análisis inicial de los costos de construcción involucrados para la sección reforzada y la no reforzada.

Realizar un análisis de los costos involucrados en el periodo de vida del pavimento para ambas secciones.

Hacer una lista de los beneficios adicionales que no son cuantificables económicamente (por ejemplo, reducción de excavaciones en la subrasante, aumento de la confiabilidad del comportamiento del pavimento, incremento del aporte estructural de las capas del pavimento, etc.)

Hacer un comparativo técnico y económico para determinar la solución final.

2.6 Obtención de TBR de diseño

Como podemos ver en la metodología descrita anteriormente, se incluye un nuevo concepto denominado TBR para medir el aporte o “mejora” a partir de la colocación de una geomalla como refuerzo dentro de la estructura del pavimento. Es importante recordar que este valor debe ser determinado a partir de ensayos e investigaciones realizados por cada proveedor o fabricante de este material. En este caso, como utilizaremos materiales desarrollados por la empresa TENSAR para realizar los diseños, mostraremos a continuación una breve reseña de algunos de los ensayos realizados con este fin.

2.6.1 Geomallas biaxiales

Para las geomalla biaxiales se desarrollaron dos tipos denominados BX1100 y BX1200.

- a. **Universidad de Alaska:** los objetivos de este ensayo fueron verificar el mejor comportamiento del pavimento reforzado y cuantificar los TBR para dos tipos de geomallas: BX1100 y BX1200. Las secciones de pavimento consistieron, para ambos casos, en 2" de asfalto, sobre una base conformada con roca triturada (que variaba entre 6 y 18") y una subrasante de arcilla blanda con un CBR promedio de 1.9%. Se acordaron 5 criterios de falla en base a la deformación final que se observaba en la sección (0.5, 0.75, 1.0, 1.25 y 1.5 pulgadas). Los resultados para la geomalla BX1100, en todos los casos, fue de un TBR entre 2 y

3. Mientras que, para la geomalla BX1200, los valores variaron dependiendo del espesor de la base y de las deflexiones escogidas llegando hasta 10.

- b. **Cuerpo de Ingenieros:** Entre 1990 y 1991 esta entidad investigó el uso de geomallas para refuerzo de bases de pavimentos flexibles para aeronaves ligeras. La prueba consistió en cuatro líneas de tráfico. Los ensayos realizados consideraron una arcilla de alta plasticidad ($IP=45.4\%$) y $CBR=3\%$ como subrasante. Además, el material de base fue clasificado como un SM-SC. La sección consistió en 2" de asfalto y 14" de base sobre la subrasante. Se obtuvo un factor de mejoramiento de tráfico de 2.7 para BX1100 y 4.7 para BX1200, superiores a otras geomallas de diferente composición y estructura utilizadas al realizar este mismo ensayo bajo las mismas condiciones.
- c. **Universidades de Waterloo y Queen's:** Este ha sido un intensivo programa de investigación con el propósito de analizar y explicar los mecanismos de refuerzo a través de mediciones de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, para desarrollar coeficientes de capa para materiales de base reforzada con geomallas y establecer procedimientos de diseño utilizando dichos factores. El programa experimental consistió en pruebas de pavimentos con bases granulares reforzadas y no-reforzadas de diferentes espesores, variando las resistencias de subrasantes y la ubicación del refuerzo. El suelo utilizado para conformar la subrasante fue una arena SP; para la base, un GW y la geomalla de refuerzo una BX1100, para todos los casos. Además, se consideró una capa de asfalto de espesor constante para todos los casos. Los resultados indicaron claramente que existe un mejoramiento substancial en la resistencia a la deformación y la vida útil de los pavimentos reforzados.

Uno de los hallazgos más importantes fue el referido al efecto que tiene el espesor de la capa de base en el factor de mejoramiento final obtenido. Para 6 y 8 pulgadas de espesor los TBRs obtenidos variaron entre 2.5y 3; siendo que para un espesor de 4" el TBR fue de apenas 1.1.

Por último, en una etapa posterior se verificaron los TBR para subrasantes de 1% (esta subrasante se "ablandó" añadiendo suelo turboso a la arena que

conformaba la subrasante inicial). Consistentemente, el TBR debido a la inclusión de la geomalla resultó ser igual a 3.

- d. **Universidad de Nottingham:** Esta investigación fue realizada por los Dres. Richard Barksdale y Stephen Brown. Esta fue una prueba de laboratorio realizada en una sección de pavimento consistente en 1 – 1.5” de carpeta asfáltica, 6-8” de capa de base, sobre una subrasante de arcilla limosa y una carga de 1.5 kips. Fueron usados dos tipos de capas de base: una base granular pobre consistente de arenas y gravas redondeadas, y otra de piedra caliza triturada. Ambos tipos de materiales fueron compactados hasta alcanzar un nivel entre 96 y 100% de su máxima densidad seca.

Los resultados para la base de 8” de espesor con el refuerzo en el centro, mostraron un TBR de 7 para una geomalla BX1100. Los investigadores, a través de un análisis de elementos finitos, correlacionaron estos resultados de laboratorio y concluyeron que dicho mejoramiento se puede obtener para los siguientes parámetros reales: carga de eje 18 kips, espesor de base 9-16” y un CBR de subrasante igual a 2.7%.

A partir de estas investigaciones se pueden concluir algunos puntos resaltantes. El primero es que todas estas investigaciones demuestran que el refuerzo de la capa base de un pavimento flexible usando geomallas TENSAR, incrementa la vida útil del pavimento. Por otro lado, también podríamos concluir que, a partir de las investigaciones resumidas previamente, considerando una subrasante con CBR fluctuando entre 1 y 8 y para capas de base, conformadas con material granular, variando de 8 a 12”, el factor de mejoramiento de tráfico (TBR) para BX1100 está en el rango de 1.5 a 3 y para BX1200 de 4 a 10.

2.6.2 Geomallas multiaxiales

El enfoque de los ensayos realizados con geomallas multiaxiales para determinar sus propiedades fue cambiando debido al desarrollo de métodos mecanísticos-empíricos. Sin embargo, para poder determinar el valor de TBR equivalente del aporte de las geomallas multiaxiales se han realizado algunos ensayos a pequeña y gran escala.

Uno de estos fue realizado por el CUERPO DE INGENIEROS DE LOS ESTADOS UNIDOS (USACOE) en “Waterways Experiment Station” en Vicksburg en el año 2009. Este ensayo sirve como referencia para los valores utilizados para realizar el diseño según el método AASHTO 93 y la guía AASHTO R-50.

Este es un ensayo de pavimento acelerado a gran escala. Es decir, se aplicó una carga bidireccional de tráfico equivalente a 10 000 lb a través de un juego de dos ruedas a una presión de 80 psi. Esta carga es transmitida utilizando un simulador de tráfico sobre una estructura de pavimento que consistió en una capa de asfalto de 2 pulgadas de espesor, una capa de base granular de 8 pulgadas de espesor y una subrasante con un CBR igual o mayor a 3%.



Figura 27. Equipo utilizado para los ensayos (TENSAR, 2009)

En una primera etapa de la prueba, se registraron medidas de ahuellamiento generadas por 0, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 50 000 y 100 000 pasadas. A partir de este punto, se tomaron medidas cada 50 000 pasadas hasta alcanzar la falla del pavimento. Esta falla fue definida para el momento donde se alcanzó un ahuellamiento o una deformación permanente igual a una pulgada. Esta prueba se realizó para más de una sección con el fin de comparar los resultados obtenidos.

Para poder determinar la mejora debido al uso de las geomallas se tomaron medidas en una sección de control sin refuerzo. Como resultado de esta prueba se determinó que en secciones donde se tenían subrasantes muy pobres (CBR = 3%) el uso de geomallas multiaxiales permitió un comportamiento seis veces mejor que la

superficie de control sin refuerzo. Estos valores se obtuvieron al alcanzar un ahuellamiento de una pulgada tras el paso de 30 000 ESALs.



Figura 28. Medición del ahuellamiento (TENSAR, 2009)

Por otro lado, en secciones donde se tenían subrasantes de mayor soporte, las secciones reforzadas con geomallas multiaxiales se comportaron hasta diez veces mejor que la sección de control después de más de 110 000 ESALs.

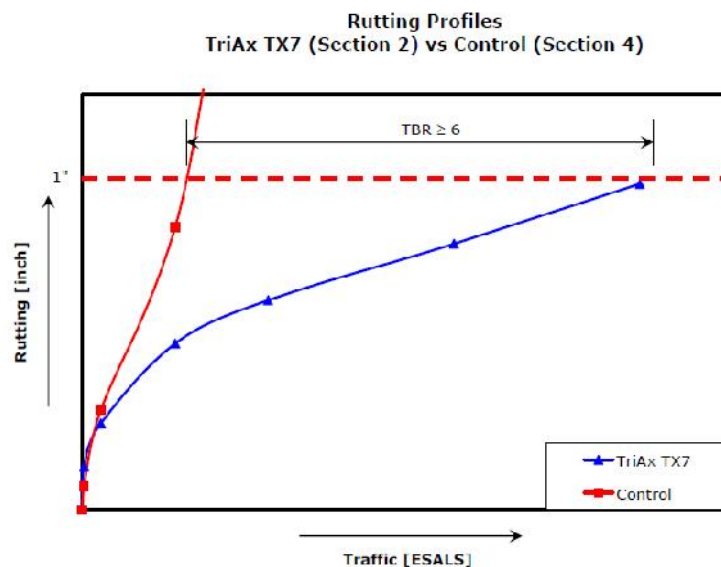


Figura 29. Obtención del TBR (TENSAR, 2009)

A partir de ensayos como este se pudo recoger la información suficiente para poder determinar el aporte que genera la colocación de una geomalla multiaxial como refuerzo de la capa de base granular.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Información general del proyecto

Actualmente, la ciudad de Lima sufre un gran problema que parece imposible de resolver: el tránsito. Este es un problema causado por diferentes factores, entre los que encontramos la excesiva cantidad de vehículos, el estado del parque automotor, la falta de infraestructura vial, la educación vial deficiente de los usuarios, la falta de un sistema de transporte intermodal, etc.

Esto ha generado una serie de problemas tales como el aumento del tiempo de viaje de los usuarios, la gran cantidad de accidentes que se producen, la contaminación ambiental que se genera; además del descontento general de los usuarios.

Para tratar de aliviar alguno de estos problemas, el Concejo Municipal de Lima aprobó un nuevo proyecto denominado “Nuevas Vías de Lima” por un monto de 500 millones de dólares. Se proyectan construir 36 intercambios viales (incluyendo pasos a desnivel, rotondas, paraderos, puentes peatonales, señalización, etc.) y 114 kilómetros de mejoramiento de las vías y los accesos a las principales arterias de la ciudad: Panamericana Sur, Panamericana Norte y autopista Ramiro Prialé. Esto generará un impacto directo en 18 distritos de la ciudad.

La ejecución de este proyecto comprende un periodo de tres años (entre el 2013 y el 2015) y será llevada a cabo por la empresa Odebrecht. Esta tendrá a su cargo la administración de estas vías, bajo la modalidad de concesión, durante un periodo de 30 años.

Durante la primera etapa, se prevé intervenir la zona que corresponde al intercambio entre la Panamericana Sur y el puente Alipio Ponce, ubicado en el distrito de San Juan de Miraflores. En este caso, se plantean construir estructuras de pavimento nuevas y rehabilitar algunas existentes. Es por esta razón que se han dividido en diferentes secciones de pavimento de acuerdo a una sectorización realizada por Odebrecht.

Para fines de este trabajo, se realizarán los diseños de cada uno de estas estructuras, a partir de la información brindada por Odebrecht, siguiendo los métodos de diseño descritos anteriormente. Se realizarán tres propuestas de análisis: una sección no reforzada, una reforzada con geomallas biaxiales y una reforzada con geomallas

multiaxiales. De acuerdo a los resultados obtenidos, estas serán comparadas, técnica y económicamente.

Como se mencionó anteriormente, las secciones de pavimento fueron sectorizadas en seis zonas distintas. Sin embargo, esta información fue actualizada por parte de la empresa a cargo del proyecto. En esta nueva etapa, se tienen nueve secciones típicas que se trabajarán de acuerdo al resumen presentado en la Tabla 08.

SECCIÓN TIPO	SECTOR	W18
1 NUEVO	Glorieta	5.5E+07
2 NUEVO	Vía Auxiliar de la P.S. y Salida Pedro Miota Sureste	2.3E+06
3 NUEVO	Vía Auxiliar de la P.S. oeste (Los Álamos)	3.1E+07
4 NUEVO	Miota Norte y Sur	3.2E+07
5 REHAB	Calle Alipio Ponce	5.6E+07
6 REHAB	Pedro Miota	5.1E+07
7 NUEVO	Calle Alipio Ponce	4.5E+07
8 NUEVO	Calle Alipio Ponce PARADEROS	2.1E+07
9 NUEVO	Panamericana Sur PARADEROS	7.5E+07

Tabla 08. Tráfico de diseño para cada sección típica

Se puede notar que hay una clasificación en las secciones: NUEVA y REHABILITACIÓN. Esto se debe a que en las secciones 5 y 6, se planteará la construcción de una estructura en la que se utilizará el material ya existente como subrasante.

3.2 Alternativas de diseño

3.2.1 Propuesta tradicional

Para realizar este diseño se utiliza el método AASHTO 93 de Diseño de Pavimentos Flexibles tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Confiabilidad

De acuerdo a la Tabla 03, y considerando que a esta vía como una “Carretera Interestatal o una Autopista”, se asume un valor promedio igual a 95%.

- Variabilidad

Se toma un valor de S_o igual a 0.45.

- Módulo de Resiliencia

De acuerdo a los datos obtenidos en campo se tienen dos condiciones de subrasante distintas: una para el caso de las secciones nuevas y otra para el caso de la rehabilitación de las secciones existentes. En el caso de las secciones NUEVAS, el CBR de la subrasante a considerarse es igual a 17.06% mientras que para el caso de las REHABILITACIONES, se considera un CBR igual a 30.50%.

Utilizando la Ecuación 02, se obtienen los valores de diseño presentes en la Tabla 09.

SECCIÓN	Mr (psi)
NUEVO	15698
REHABILITACION	22769

Tabla 09. Módulo de Resiliencia para cada sección

- Serviciabilidad

Como valor de serviciabilidad inicial (P_i) se asume el valor recomendado para pavimentos flexibles (4.2). Mientras que para el valor de serviciabilidad final (P_t), en la Tabla 10 se puede apreciar el valor asumido para cada sección de diseño en base a la información recopilada.

SECCIÓN TIPO	P_i	P_t
1	4.2	2.5
2	4.2	2.3
3	4.2	2.5
4	4.2	2.3
5	4.2	2.5
6	4.2	2.3
7	4.2	2.5
8	4.2	2.5
9	4.2	3.0

Tabla 10. Niveles de serviciabilidad para cada sección de diseño

Con estos valores se obtiene el número estructural (SN) para cada una de las secciones utilizando la Ecuación 05.

Una vez obtenido este valor, para poder determinar el aporte estructural de cada una de las capas que conformarán la estructura del pavimento un número estructural es asignado a cada una de ellas de acuerdo a las siguientes características:

- Carpeta asfáltica

Para este caso se considera un material con un Módulo de Resiliencia de 400000 lb/pulg². Con este valor, y de acuerdo a la figura 30, se obtiene un coeficiente estructural $a_1=0.42$ /pulg.

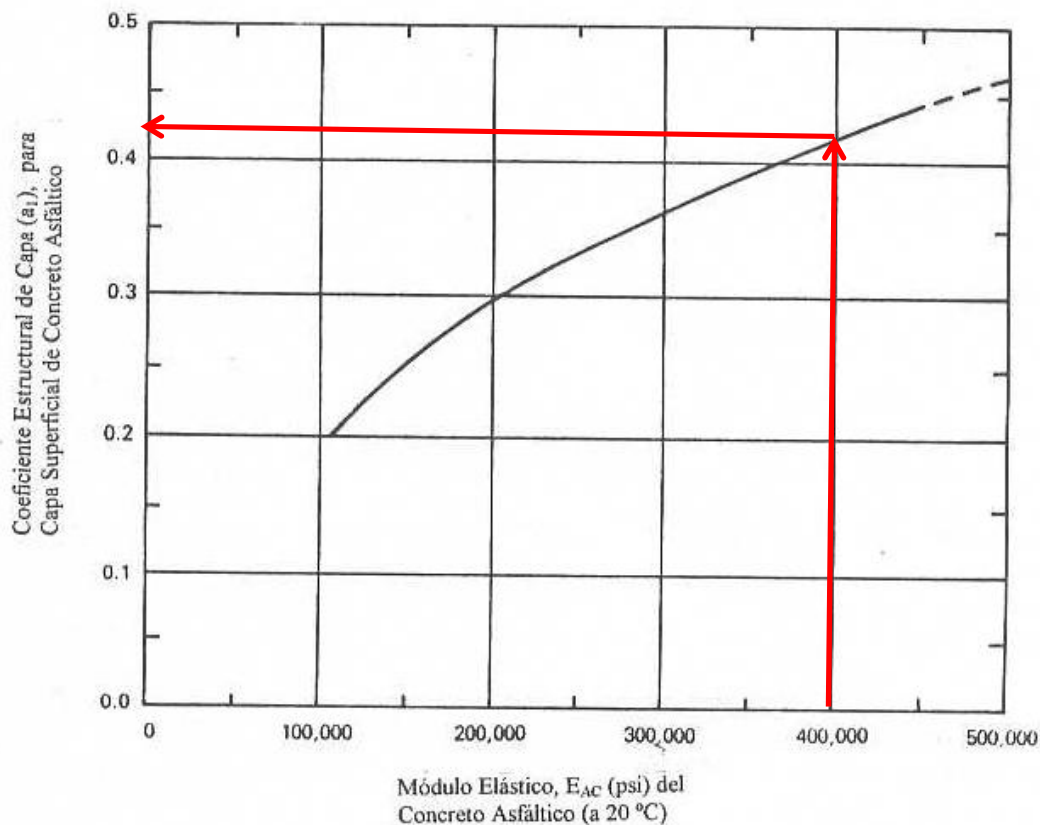


Figura 30. Obtención de a_1 para caso de estudio (AASHTO, 1993)

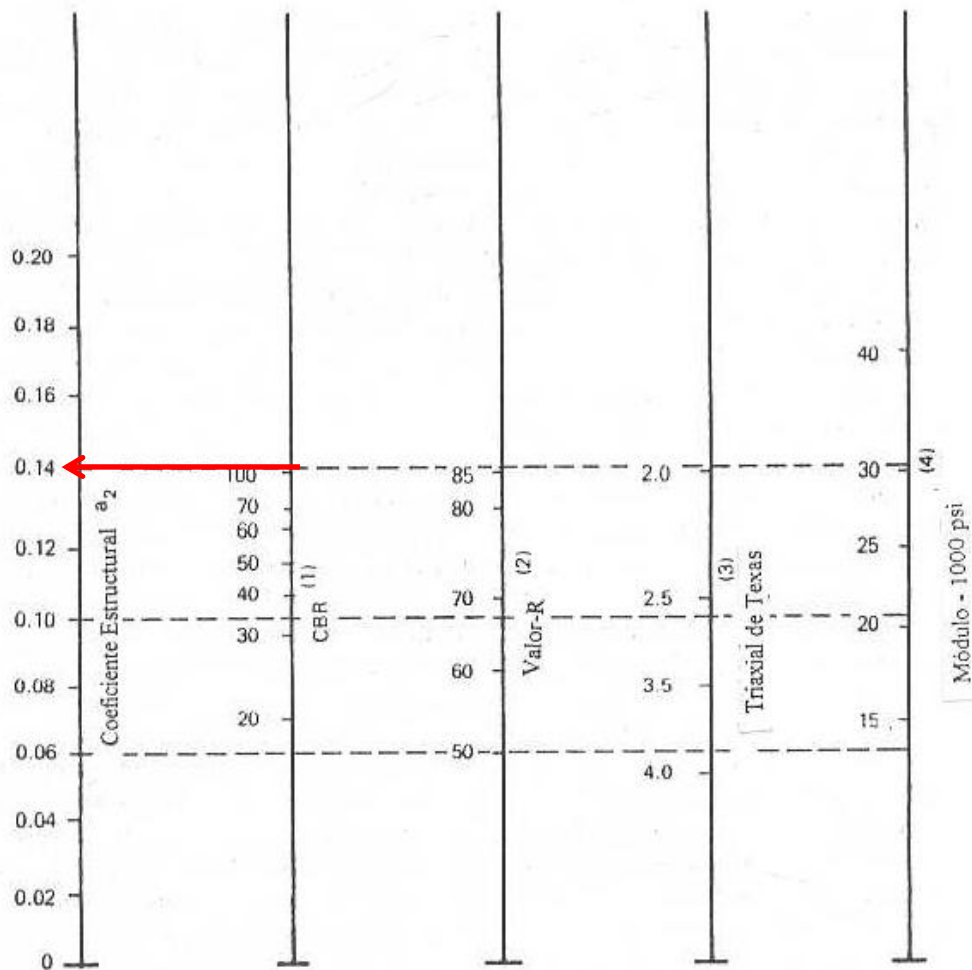
- Base granular

De acuerdo a la norma NTE CE-010 PAVIMENTOS URBANOS, para pavimentos flexibles se recomienda un CBR del material de relleno con un valor de 80% como mínimo. De la misma forma que para el caso del coeficiente de la carpeta

asfáltica, se toma como referencia la Figura 31 para obtener el valor del coeficiente estructural para esta capa considerando un material con un CBR de 100%. En este caso se obtiene que $a_2=0.14/\text{pulg.}$

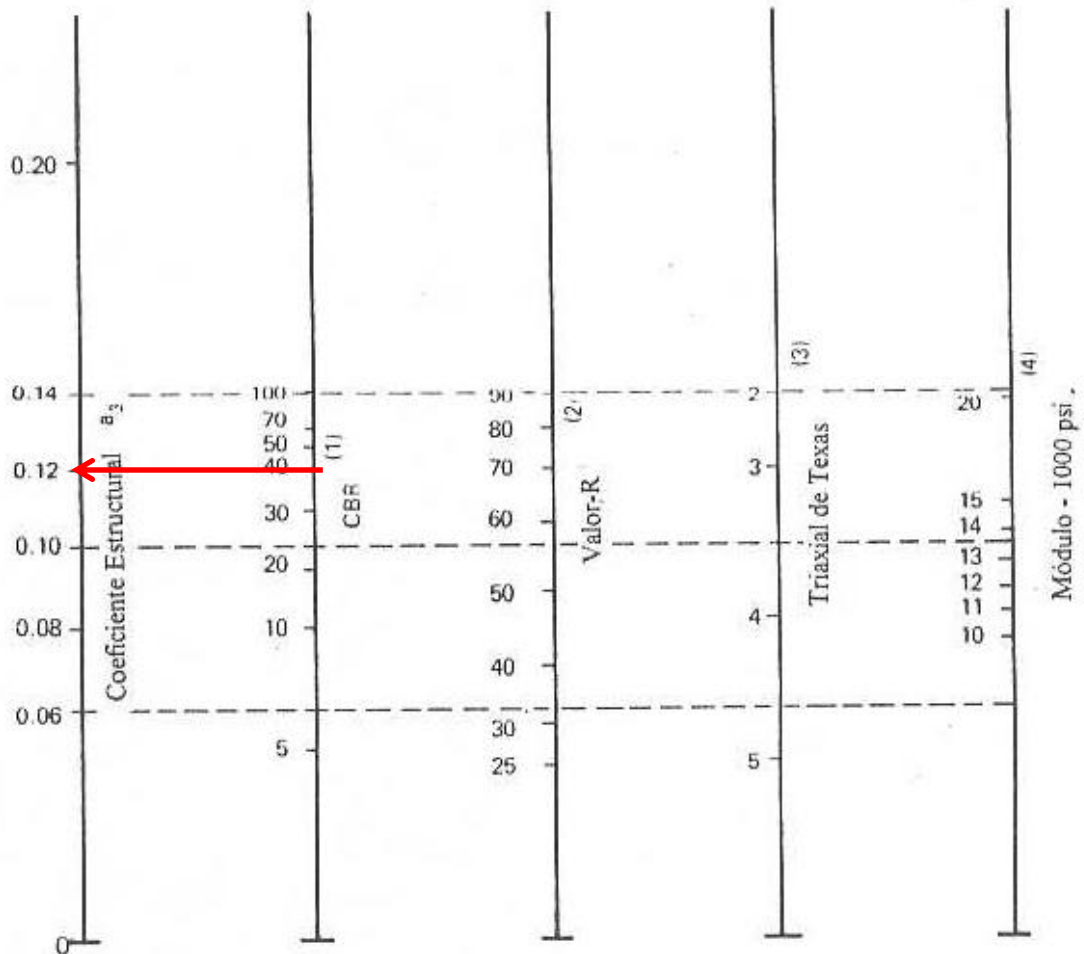
- Subbase granular

De la misma manera que para el caso de la capa de base, nos referimos a la norma NTE CE-010 PAVIMENTOS URBANOS, y se ve que para este caso se recomienda un CBR del material de relleno con un valor de 40% como mínimo. Tomando como referencia la Figura 32 para obtener el valor del coeficiente estructural para esta capa, en este caso se tiene que $a_3=0.12/\text{pulg.}$



- (1) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada promediando correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 31. Obtención de a_2 para caso de estudio (AASHTO, 1993)



- (1) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Illinois
- (2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming
- (3) Escala derivada de las correlaciones obtenidas de Texas
- (4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Figura 32. Obtención de a_3 para caso de estudio (AASHTO, 1993)

- Coeficientes de drenaje

Para el caso de los coeficientes m_2 y m_3 se asumen algunas condiciones desfavorables para este proyecto teniendo en cuenta de que alguna falla en el sistema de drenaje de la vía es crítica para la vida útil de la estructura del pavimento. Por esta razón, se considera una condición de drenaje “regular” y un porcentaje de tiempo en el cual la estructura estará expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación entre 1 y 5%. Con estos valores y de acuerdo a la Tabla 05 se obtienen los coeficientes de $m_2=1.00$ y $m_3=1.00$.

Con todos estos valores, se procede a realizar el diseño de la estructura del pavimento para cada una de las zonas planteadas inicialmente. El resumen de los espesores obtenidos puede apreciarse en la Tabla 11; mientras que los cálculos desarrollados para la obtención de los mismos pueden verse en el Anexo 03. Para poder apreciar mejor el aporte del refuerzo de la geomalla con respecto a la sección no reforzada, se opta por mantener constante el espesor de la carpeta asfáltica y de la subbase granular modificando únicamente el espesor de la base granular (donde se colocará el refuerzo). Además, se intenta mantener un espesor constante de las otras dos capas que conforman la estructura del pavimento fijando; por esta razón, en casi todos los casos, el espesor de la carpeta asfáltica es 10mm y el espesor de la subbase granular es 30mm.

SECCIÓN DE DISEÑO	CARPETA ASFÁLTICA (mm)	BASE GRANULAR (mm)	SUBBASE GRANULAR (mm)
1	12	33	30
2	10	19	10
3	10	32	30
4	10	30	30
5	10	29	30
6	10	25	30
7	12	31	30
8	10	27	30
9	12	40	40

Tabla 11. Espesores no reforzados obtenidos

3.2.2 Propuesta con geomallas

Para realizar este diseño se utiliza el método al que hace referencia la normativa AASHTO R-50 tomando los valores obtenidos en el diseño de la sección no reforzada y utilizando el valor de TBR que se le asigna a cada uno de los refuerzos a partir de las recomendaciones del proveedor del material.

De acuerdo a la metodología a la que se hace referencia, se empieza definiendo si es o no aplicable el uso de geosintéticos de acuerdo a las características de este proyecto en particular. Se considera el uso de geomallas como un solo caso, haciendo un ajuste en el diseño final de acuerdo a los valores de TBR para cada tipo

en especial: geomallas biaxiales y multiaxiales; para ello, se necesitan conocer las características de la subrasante y el espesor de la capa a reforzar (en este caso la base). Para este proyecto se tenía una subrasante firme ($CBR > 8$) y una capa de base granular que estaba en el rango entre 150 y 300 milímetros, en la mayoría de los casos. Bajo estas condiciones, y utilizando la Tabla 06, se puede ver que el uso de geomallas extruidas (como es el caso) es usualmente aplicable.

El segundo paso hace referencia al diseño de la sección no reforzada. Como ya se mencionó anteriormente, se tomaron los espesores que resultaron del diseño descrito en la Sección 3.2.1. Luego, utilizando como referencia la Tabla 07, se determinan los beneficios que se buscan con este diseño. En este caso se busca reducir la sección de la vía a través del refuerzo de la capa de base; sin embargo, es importante señalar que también se podría tener un incremento de la vida útil de la vía, como un beneficio secundario, en algunos casos.

Se utiliza el valor de TBR definido para cada uno de los refuerzos a utilizarse en el diseño. Para el caso de las geomallas biaxiales y multiaxiales se opta por utilizar un valor de TBR para cada caso en específico. Esto se debe a que se han desarrollado más investigaciones a lo largo de los años y se ha determinado que hay diversos factores que afectan el aporte de una geomalla dentro de una sección de pavimento reforzado. Esta variación se ve reflejada en diversos valores de TBR obtenidos a partir del uso del software SPECTRA PAVE 4 PRO desarrollado por TENSAR. El resumen de los resultados obtenidos puede verse en la Tabla 12 y en la Tabla 13 para cada caso por separado, mientras que el reporte de los cálculos se puede ver en los Anexos 04 y 05.

SECCIÓN DE DISEÑO	CARPETA ASFÁLTICA (mm)	BASE GRANULAR (mm)	SUBBASE GRANULAR (mm)
1	12	23	30
2	10	15	10
3	10	21	30
4	10	19	30
5	10	18	30
6	10	15	30
7	12	20	30
8	10	16	30
9	12	30	40

Tabla 12. Espesores de secciones reforzadas con geomallas biaxiales

SECCIÓN DE DISEÑO	CARPETA ASFÁLTICA (mm)	BASE GRANULAR (mm)	SUBBASE GRANULAR (mm)
1	12	19	30
2	10	15	10
3	10	17	30
4	10	15	30
5	10	15	30
6	10	15	30
7	12	16	30
8	10	15	30
9	12	25	40

Tabla 13. Espesores de secciones reforzadas con geomallas multiaxiales



4. RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en el capítulo 03, se procede a realizar una evaluación técnica y económica de las secciones resultantes con el fin de evaluar si el refuerzo de bases granulares con geomallas es conveniente desde ambos puntos de vista.

4.1 Comparación técnica

Para el caso de la comparación técnica, se evalúa el desempeño de las secciones finales obtenidas en función de los parámetros de diseño iniciales.

En la Tabla 14 y en la Figura 33 podemos apreciar el espesor final para cada caso de diseño. Se puede ver que hay una reducción en los espesores de las secciones reforzadas respecto a la sección no reforzada en cada caso.

SECCIÓN DE DISEÑO	NO REFORZADO (cm)	REFORZADO CON BX (cm)	REFORZADO CON TX (cm)
1	33	23	19
2	19	15	15
3	32	21	17
4	30	19	15
5	29	18	15
6	25	15	15
7	31	20	16
8	27	16	15
9	40	30	25

Tabla 14. Espesores obtenidos para cada caso de diseño

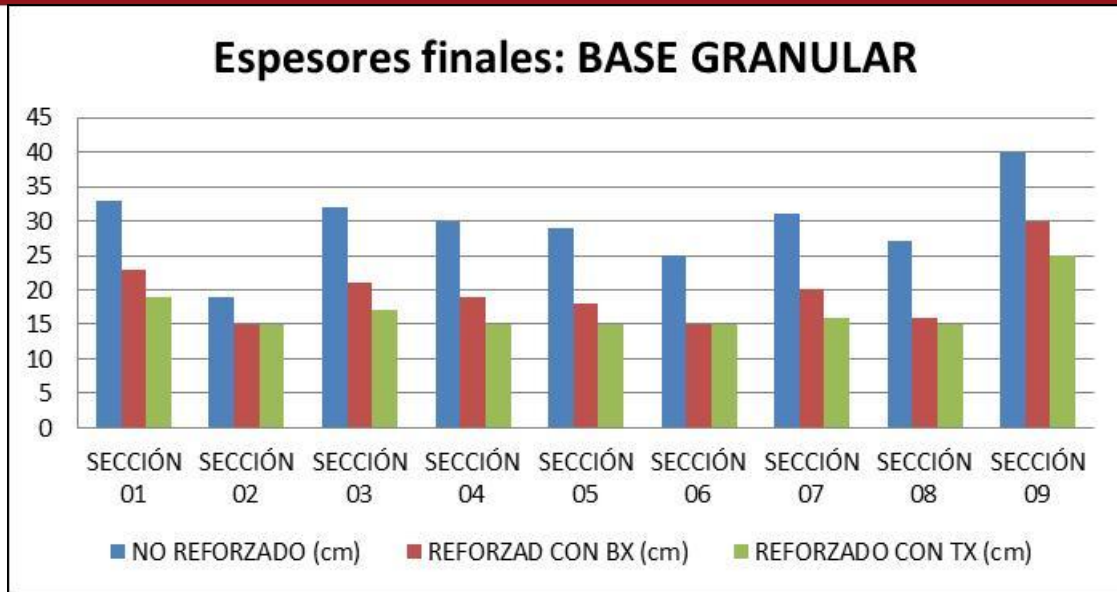


Figura 33. Espesores finales de capa de base granular para cada sección analizada

Esta diferencia se puede apreciar mejor en la Figura 34 donde se muestra la reducción del espesor de la capa de base granular expresado como un porcentaje del espesor inicial de la sección no reforzada.

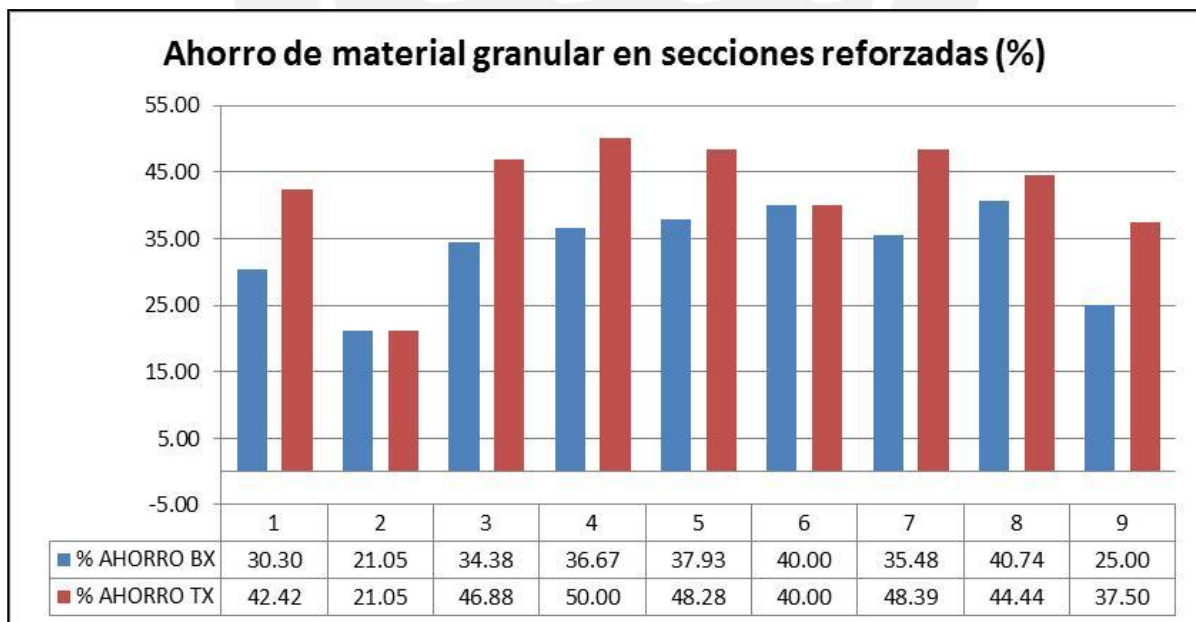


Figura 34. Ahorro de material granular en secciones reforzadas

Los espesores finales en cada uno de los casos se calculan para poder satisfacer las condiciones de diseño iniciales; es decir, para poder soportar las cargas de tráfico medidas en cada una de las secciones. Incluso, en algunos casos, la sección reforzada supera ampliamente el tráfico de diseño asumido tal y como se puede ver en la Figura 35.

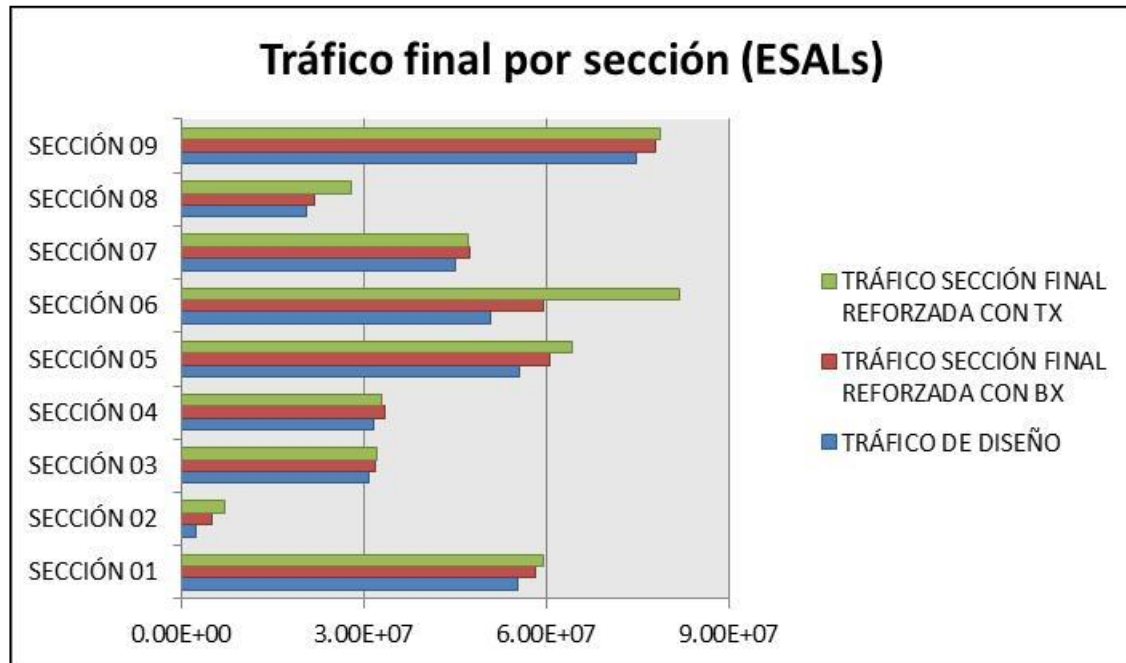


Figura 35. Tráfico final que soportará cada sección de diseño

La reducción del espesor de la base granular está directamente relacionada con el valor de TBR asumido para cada caso de estudio. Como se mencionó anteriormente, este valor varía de acuerdo a las condiciones específicas de cada sección de diseño. Esto se ve reflejado en la Tabla 15 donde se puede apreciar esta variación tanto para geomallas biaxiales y multiaxiales. En el caso de las geomallas biaxiales, tenemos valores de TBR desde 2.01 hasta 3.3; mientras que para las geomallas multiaxiales, los valores de TBR varían entre 2.86 y 4.52.

	GEOMALLA BX	GEOMALLA TX
SECCIÓN 01	2.32	3.27
SECCIÓN 02	3.3	4.52
SECCIÓN 03	2.42	3.43
SECCIÓN 04	2.53	3.6
SECCIÓN 05	2.53	3.53
SECCIÓN 06	2.73	3.74
SECCIÓN 07	2.37	3.34
SECCIÓN 08	2.58	3.59
SECCIÓN 09	2.01	2.86

Tabla 15. TBR utilizado para cada caso de diseño

4.2 Comparación económica

En este caso se realiza una evaluación económica teniendo en cuenta, por un lado, los insumos involucrados en las tres alternativas planteadas; y, por otro, el costo total de la construcción de la sección (reforzada y no reforzada). Para hacer la primera evaluación consideramos como insumos el material granular necesario para conformar el espesor requerido en cada sección de diseño y el material de refuerzo a colocar. Además, se considera el ancho de la vía igual a 7.0m para poder calcular los costos totales por metro lineal de sección. El resumen del metrado de materiales y los costos parciales de cada una de las secciones se puede ver en el Anexo 06.

SECCIÓN DE DISEÑO	COSTO SECCIÓN NO REFORZADA (S/. / metro lineal)	COSTO SECCIÓN REFORZADA CON BX (S/. / metro lineal)	COSTO SECCIÓN REFORZADA CON TX (S/. / metro lineal)
1	88.96	97.28	96.30
2	51.22	75.72	85.52
3	86.27	91.89	90.91
4	80.87	86.50	85.52
5	78.18	83.80	85.52
6	67.39	75.72	85.52
7	83.57	89.20	88.21
8	72.79	78.41	85.52
9	107.83	116.15	112.47

Tabla 16. Costo de materiales para cada sección de diseño

En la figura 36 se muestra mejor la diferencia entre las tres propuestas planteadas para cada una de las secciones.

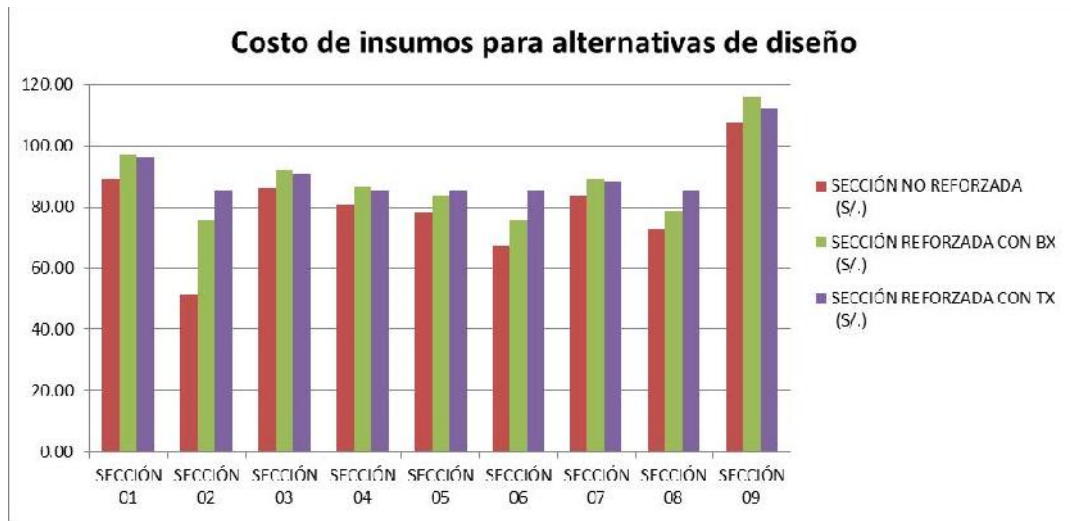


Figura 36. Costo de insumos para cada alternativa de diseño

Para poder hacer un análisis más real de las secciones analizadas, tomaremos en cuenta no solo el costo de los insumos sino el de su colocación. Para esto consideramos los costos unitarios de las partidas involucradas: colocación de base granular e instalación de geomalla de refuerzo. Los análisis de precios unitarios detallados pueden verse en el Anexo 007. En la Tabla 17 se puede apreciar el monto final considerado para cada una de las secciones en función de los costos indicados en el Anexo 08.

SECCIÓN DE DISEÑO	COSTO SECCIÓN NO REFORZADA (S/.)	COSTO SECCIÓN REFORZADA CON BX (S/.)	COSTO SECCIÓN REFORZADA CON TX (S/.)
1	140.68	137.64	131.37
2	81.00	103.54	114.32
3	136.42	129.12	122.84
4	127.89	120.59	114.32
5	123.63	116.33	114.32
6	106.58	103.54	114.32
7	132.15	124.85	118.58
8	115.10	107.80	114.32
9	170.52	167.48	156.95

Tabla 17. Costos de materiales instalados para cada sección de diseño

En la Figura 37 se puede ver el ahorro obtenido en las secciones reforzadas respecto a la alternativa no reforzada.

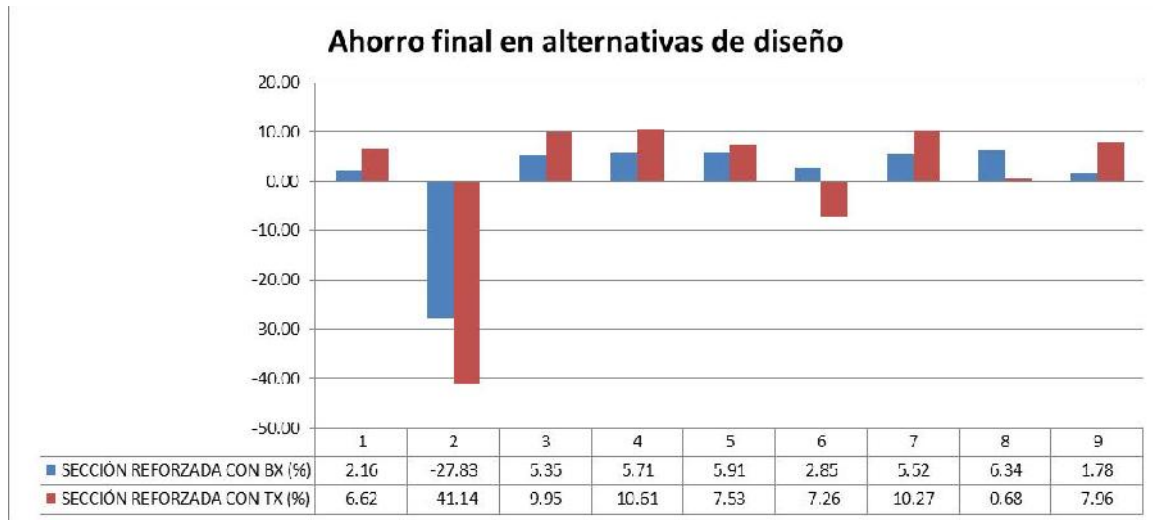


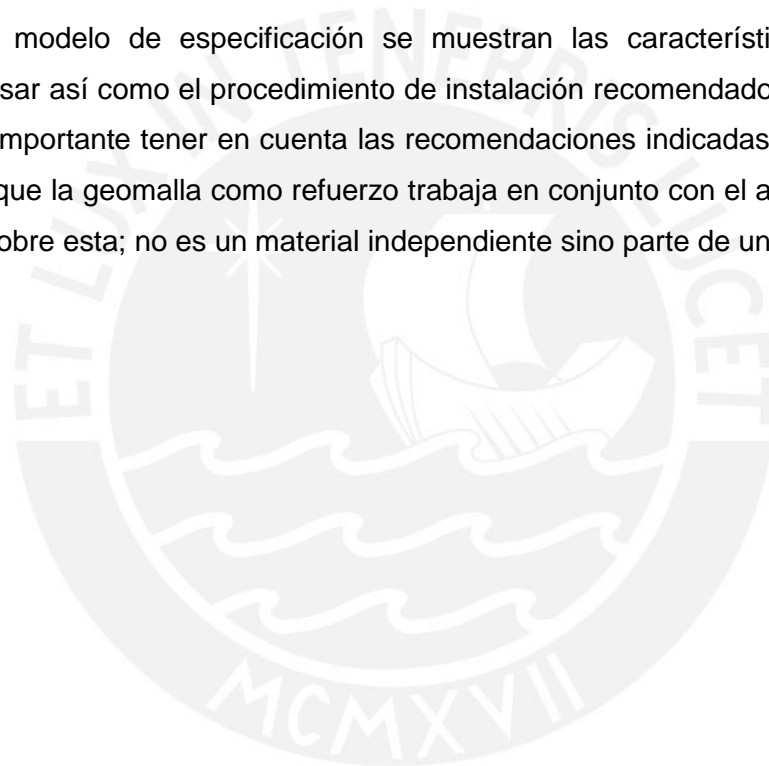
Figura 37. Ahorro final en alternativas de diseño



5. PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

De acuerdo a la información planteada en este trabajo y a la experiencia que se ha tenido con el uso de estos materiales desde su introducción al mercado peruano se cree que es importante introducir el uso de las geomallas como una alternativa al refuerzo de bases granulares en el caso que sean técnica y económicamente adecuadas. Con este motivo se presenta un modelo de especificación técnica en el Anexo 09 para los dos materiales presentados en este trabajo (geomallas biaxiales y geomallas multiaxiales) tomando como referencia el documento “MANUAL DE CARRETERAS – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN EG-2013” preparado por el MTC.

En este modelo de especificación se muestran las características del material geosintético a usar así como el procedimiento de instalación recomendado para su correcta colocación. Es importante tener en cuenta las recomendaciones indicadas por el proveedor del material ya que la geomalla como refuerzo trabaja en conjunto con el agregado granular que se coloca sobre esta; no es un material independiente sino parte de un sistema.



6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado de las diferentes secciones estudiadas podemos concluir lo siguiente:

- Los espesores de las secciones no reforzadas son mayores en todos los casos a los espesores obtenidos en las secciones reforzadas (tanto con geomallas biaxiales como con multiaxiales). Esta diferencia es, en promedio, de alrededor de un 35%, para el caso de las secciones reforzadas con geomallas biaxiales; mientras que llega a ser casi un 45%, en promedio, para el caso del refuerzo con geomallas multiaxiales.
- La reducción de los espesores de las secciones reforzadas con geomallas biaxiales varían entre 21.05% y 40.74%. Cuando utilizamos geomallas multiaxiales, esta variación está entre 21.05% y 50%. Podemos apreciar que la reducción mínima en ambos casos es igual. Esto se debe a que en ambos casos predomina el criterio del espesor mínimo de la capa de base granular a conformarse. Es decir, se recomienda colocar un espesor de 15cm como mínimo que asegure la correcta colocación, compactación y densificación del material. A pesar de que el cálculo, en cada uno de los casos, pueda arrojar una sección menor, se descarta siguiendo el criterio antes descrito. Sin embargo, esto no significa que no se pueda lograr un beneficio con la colocación de alguno de estos refuerzos; en la Figura 35 se puede apreciar que hay un importante incremento en el tráfico que pueden soportar las secciones reforzadas. Esto quiere decir que, de colocarse algún refuerzo, podríamos aumentar la vida útil de la vía (al doble para el caso del refuerzo con geomallas biaxiales; y al triple para el caso de las geomallas multiaxiales si analizamos la sección 02).
- Siguiendo el criterio del espesor mínimo que se debe mantener, podemos ver que hay más secciones que muestran un aumento considerable en el tráfico final que pueden soportar (secciones 06 y 08 reforzadas con geomallas multiaxiales). Esto indica que se podría tomar como un factor de seguridad adicional para la sección o se podría reducir alguna de las otras capas que conforman la estructura del pavimento hasta llegar al tráfico de diseño. Para efectos de este trabajo, como se mencionó anteriormente, se ha optado por variar solo el espesor de la base granular para poder hacer una comparación más equitativa. Sin embargo, se podría reducir también alguna de las otras capas que conforman la estructura para poder obtener una sección óptima.

- Se ha podido apreciar durante la revisión de la información descrita en capítulos anteriores que hay diversos factores que influyen en el aporte que brinda la geomalla al momento de reforzar la capa de material granular donde se coloca. A continuación veremos algunos gráficos donde se muestra la variación de los valores de TBR, tanto para geomallas biaxiales como para multiaxiales, para diferentes parámetros de diseño como el tráfico que soportará la sección (ESALs) y el PSI.

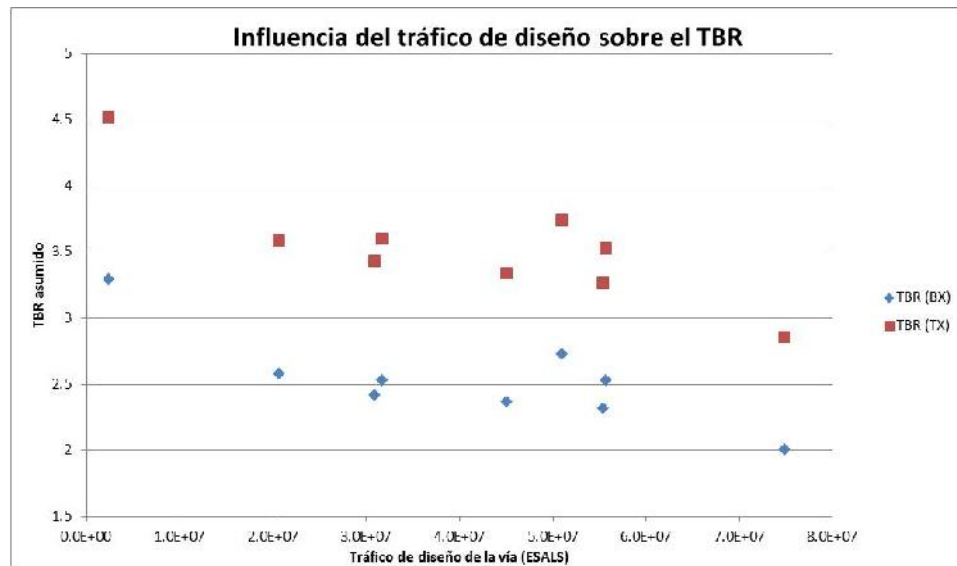


Figura 38. Influencia del tráfico de diseño sobre el TBR utilizado

En este caso vemos que hay una tendencia (en ambos casos de refuerzo) de tener mayores valores de TBR para un Tráfico de diseño menor.

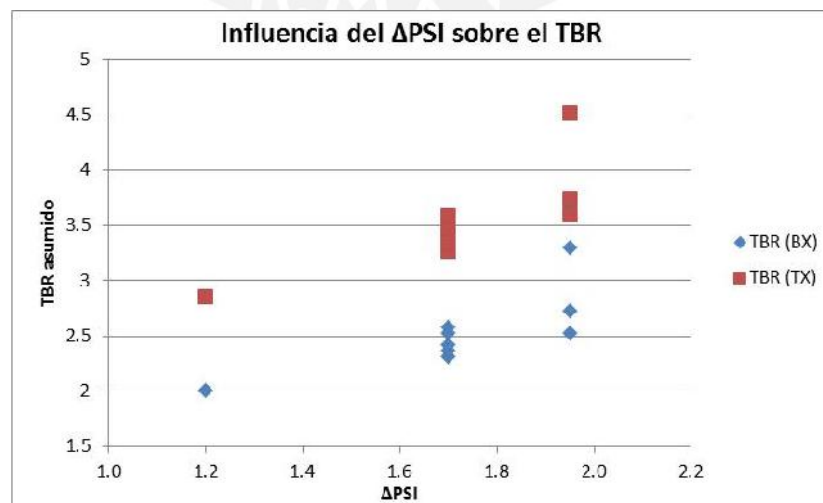


Figura 39. Influencia del PSI sobre el TBR utilizado

En este caso vemos que hay una tendencia (en ambos casos de refuerzo) de tener mayores valores de TBR para una diferencia entre la serviciabilidad inicial y final mayor.

- Podemos relacionar ambos casos con el espesor final de la sección reforzada. Es decir, al tener un tráfico de diseño menor, se necesita un espesor menor; mientras que para un PSI mayor, se da la misma situación. Con esto en mente, podríamos concluir que se tendrá un mayor aporte de la geomalla con espesores de base reforzada menores. Esto se puede apreciar mejor en la Figura 40.

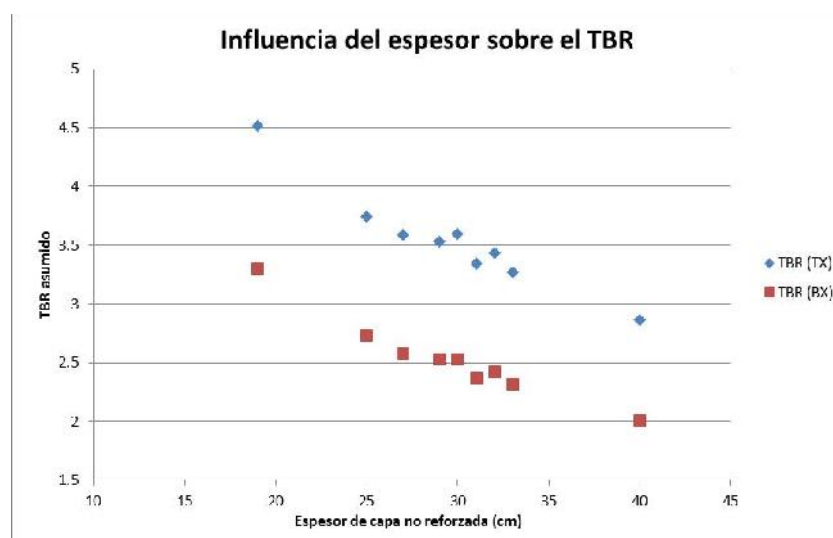


Figura 40. Influencia del espesor de la sección sobre el TBR utilizado

En este caso vemos que hay una relación directa entre el espesor de la capa no reforzada y el TBR del caso reforzado: a menor espesor, tenemos un mayor aporte de la geomalla. Esta condición se produce debido a la influencia de los mecanismos de refuerzo que se han descrito anteriormente. Como se mencionó, el más importante para el caso de refuerzo de bases granulares es el confinamiento lateral; en este caso, al tener un espesor menor, se puede obtener un mejor confinamiento (Figura 15). La trabazón será casi total en toda la capa, asegurando un mejor comportamiento y por lo tanto una mayor influencia. Sin embargo, en el caso en el que la capa reforzada tenga un espesor mayor, habrá zonas que no estarán confinadas y la trabazón no será constante a lo alto de toda la sección. Por esta razón se obtienen valores de TBR más bajos ya que el aporte de la geomalla no está siendo completamente efectivo.

- Otro factor importante dentro de la variación de los valores de TBR es la resistencia de la subrasante. Para ver su influencia tomaremos como referencia la sección 01 variando solo el valor del módulo de resiliencia de la subrasante y considerando un refuerzo con geomallas multiaxiales. El resultado de este análisis se puede ver en el Figura 41.

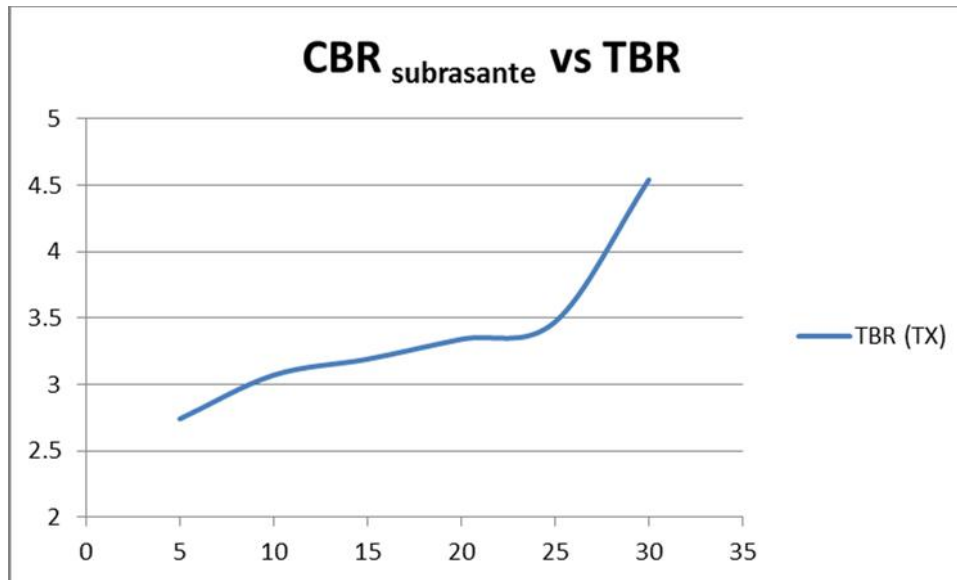


Figura 41. Influencia del CBR de la subrasante sobre el TBR utilizado

Podemos ver que a medida que la subrasante se hace más firme (tiene un CBR más alto), encontramos que el aporte del refuerzo es mayor.

- Es importante que notemos que el cálculo de las propiedades características del terreno natural influye directamente en el diseño, un cambio en las condiciones de CBR asumidas puede hacer que la sección no se comporte de la misma manera. Generalmente estos ensayos se realizan en el laboratorio; sin embargo, las condiciones in-situ muchas veces difieren debido a factores como el porcentaje de vacíos presentes, presencia de materia orgánica, etc. Es por esta razón que se recomienda hacer ensayos de medición en campo (CBR in-situ, PDC, etc) para poder determinar los valores reales con los que se trabajará durante la etapa de diseño.
- En los casos en los que nos encontramos con suelos blandos (valores de CBR bajos), la geomalla, a pesar de no tener un aporte estructural considerable, tiene una gran influencia en la reducción de la variabilidad de los valores obtenidos en campo.

Tenemos que tener en cuenta que la geomalla permitirá formar una plataforma más uniforme sobre la cual se apoyará la estructura del pavimento. Esto puede reducir los asentamientos diferenciales que podrían producir fisuras en la carpeta antes de lo estimado.

- En el análisis económico realizado vemos que hay una gran diferencia cuando comparamos el costo de los insumos involucrados en la comparación planteada y el costo final de la instalación de los mismos. En la Figura 36 vemos que el costo de la sección no reforzada es menor ya que el precio del material granular considerado no justificaría el uso de algún tipo de refuerzo para reducir el espesor de la base granular. Esto quiere decir que a pesar de que hay una reducción en el espesor de la capa de base granular, el precio del mismo debería ser mayor para que las alternativas de refuerzo con geomallas sean viables. Sin embargo, si consideramos el costo de la instalación de los materiales, vemos que en la mayoría de los casos hay una reducción del costo total a favor de las secciones reforzadas.
- Una de las razones por las que se encuentra un costo mayor de la construcción de las secciones reforzadas es que el espesor inicial no reforzado no permite una gran reducción (criterio del espesor mínimo recomendado). Así mismo, se aprecia que en la sección 06 el ahorro es mayor para la sección reforzada con geomallas biaxiales, se puede seguir la misma lógica para entender este fenómeno.
- Se mencionó anteriormente que el costo de la colocación del material granular era un factor importante en el análisis económico realizado. El costo de este insumo puede verse afectado por diversas variables como la disponibilidad del material, la distancia de transporte desde la cantera más cercana disponible, etc. En la Figura 37 se puede ver la variación del costo de la construcción de la estructura planteada cuando varía el precio del material granular a colocarse. Este análisis puede hacerse para determinar las zonas, dentro de un proyecto, donde es económicamente viable considerar una sección alternativa reforzada con geomallas o las zonas dentro de nuestro país, con dificultades de acceso en muchos casos, donde es importante considerar este material como una opción de diseño. Para este caso hemos analizado la sección 04 de diseño y podemos apreciar que la sección reforzada con BX se vuelve rentable cuando el precio del material granular es mayor a \$12/m³;

mientras que la sección reforzada con TX es rentable para valores mayores a \$7/m³. Este análisis se puede hacer para determinar el tramo de la vía donde es económicamente viable el uso de una sección alternativa reforzada con geomallas.

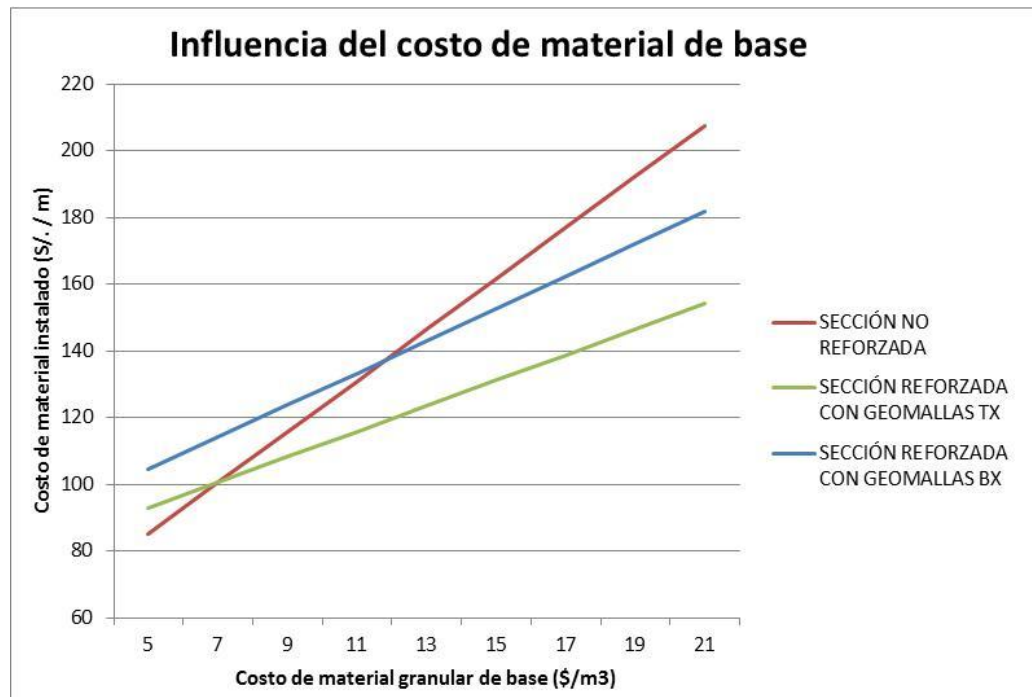


Figura 42. Influencia del costo del material de base sobre el costo de la sección instalada

- Como se puede ver, a partir de los resultados obtenidos, el uso de geomallas como refuerzo de bases granulares es una buena alternativa para disminuir los costos de construcción, tiempos de instalación, etc. Para poder difundir su uso se recomienda un mayor estudio de sus propiedades y su aporte estructural dentro de la capa a reforzarse. Para ello, se deben fomentar investigaciones con agregados, tipos de suelo y bajo condiciones de tráfico locales que permitan ajustar los parámetros determinados por los fabricantes de este tipo de materiales a la realidad peruana.

7. BIBLIOGRAFÍA

- **AASHTO**. *Design of pavement structures*. Washington D.C. 1993. 624 p.
- **AASHTO**. *Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate base Course of Flexible Pavement Structures PP 46-01*. 2003. 4 p.
- **AASHTO**. *Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate base Course of Flexible Pavement Structures R 50-09*. 2009. 4 p.
- **AASHTO**. *GMA White Paper II*. 2000. 279 p.
- **CENTURIÓN, C y SILVA, J**. *Resumen de estudios para calcular el CBR de diseño en el tope del mejoramiento de subrasantes con geomallas*. Lima. 2010. 10 p.
- **GIROUD, J.P y HAN, JIE**. *Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. II. Calibration and applications*. 2004. 11 p.
- **GIROUD, J.P y NOIRAY L**. *Geotextile Reinforced Unpaved Road Design*. 1981.
- **KOERNER, ROBERT M**. *Designing with Geosynthetics*. 5a ed. New Jersey. Prentice Hall. 2005. 796 p.
- **NAJARRO, ABEL**. *Tesis: Diseño y aplicación con geomallas en la carretera Iquitos-Nauta*. Ayacucho. 2006. 208 p.
- **TENSAR**. *SpectraPave4 PRO User´s Manual*. 2013. 32 p.
- **TENSAR**. *Triax RD Project Summary 081809 COE APT TEST*. Vicksburg. 2009.
- **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS**. *Use of geogrids in pavement construction. Technical Letter ETL 1110-1-189*. Washington D.C. 2003. 38 p.
- **U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA)**. *NHI Course No. 132013 Geosynthetic Design & Construction Guidelines Reference Manual*. 2008. 92 p.
- **VALENCIA, RODRIGO**. *Nuevas tendencias en el diseño y construcción de carreteras reforzadas con geomallas*. San José. 2009. 19 p.
- **WEBSTER, S.L**. *Geogrid Reinforced Base Courses for Light Aircraft, Department of the Army Waterways Experiment Station, Corps of Engineer*. Mississippi. 1992