

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Este trabajo presenta un estudio de empleo de geotextiles, para el refuerzo de pavimentos flexibles con criterios de durabilidad y resistencia, determinando la selección del geotextil adecuado para optimizar las mencionadas características, y así incentivar y normalizar el uso de este recurso presente en nuestro mercado, para este estudio tomaremos como sitio de aplicación el tramo carretero, Puente Jarcas - Piedra Larga.

En el campo de los pavimentos la utilización de geosintéticos se ha incrementado considerablemente en los últimos años, especialmente por la aparición de nuevos productos, que han extendido el ámbito de aplicación y la respuesta de los mismos al ser incorporados en los pavimentos.

En cuanto al aporte teórico y de formación profesional, el trabajo pretende mostrar los resultados de un análisis teórico-conceptual del aporte del uso de geosintéticos como refuerzo en pavimentos flexibles, con bases granulares. Para el logro de estas funciones se emplean fundamentalmente tres tipos de productos: geotextiles, geomembranas y geomalla, sin embargo, el mecanismo de trabajo para su uso no es aun claramente entendido, lo que dificulta la formulación de procedimientos de diseño confiables.

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación académica

El tema de investigación, pretende introducir los geotextiles en los pavimentos flexibles. Esta investigación nos permitirá aplicar los conocimientos adquiridos en Metodología de la investigación científica, mecánica de suelos, diseño de pavimentos y conceptos y bibliografía general de las materias de mención de vías. En términos generales nos permitirá mostrar los conocimientos adquiridos durante nuestra estancia en la carrera.

1.2.2 Justificación técnica

Para poder conocer o tener un buen diseño de pavimento con geotextiles es necesario contar con un buen manejo de información mecánica del campo. Desde el punto de vista técnico, es de vital importancia disponer de información mecánica y técnica tanto de las carpetas de pavimento como de los geotextiles en esencia para efectuar un análisis completo de diseño, que permita identificar con precisión el tipo de geotextil a utilizar y así poder aprovechar las ventajosas intervenciones del mismo, en el diseño de pavimentos tanto en resistencia como en vida útil, a través del refuerzo de los materiales granulares de base y protección de la subrasante.

1.2.3 Justificación social

El tema de investigación ayudará a toda la población del departamento, ya que lo que se pretende es implementar una metodología de selección que permita construir carreteras y vías pavimentadas más resistentes y con mayor vida útil aportando a la economía gubernamental y a la calidad de vida de la población en general.

1.2.4 Justificación de aplicabilidad del proyecto

El proyecto pretende estudiar y determinar cuál de las dos opciones de geotextiles disponibles en nuestro mercado, ya sea la geomalla biaxial o la geomalla triaxial, es más adecuada en términos de durabilidad y resistencia para reforzar pavimentos flexibles.

La aplicabilidad de este proyecto se justifica por varias razones importantes:

- **Importancia de la infraestructura vial:** Los pavimentos flexibles son una parte esencial de la infraestructura vial. Mantenerlos en buenas condiciones es crucial para garantizar la conectividad y el flujo eficiente de vehículos, lo que, a su vez, tiene un impacto significativo en la economía y la calidad de vida de la población.
- **Desafíos en la construcción y mantenimiento:** La construcción y el mantenimiento de pavimentos flexibles pueden ser costosos y requieren una planificación cuidadosa. El uso de geotextiles en la construcción o rehabilitación de pavimentos flexibles es una práctica común en nuestro continente para mejorar su durabilidad y resistencia. Sin embargo, la elección del tipo de geotextil adecuado es fundamental para el éxito del proyecto y familiarizarnos con una correcta selección de los mismos es de vital importancia debido a que se trata de una importante inversión que genera beneficios y retribución económica cuantiosa a mediano y largo plazo.

- Impacto económico: El uso de geotextiles inadecuados puede llevar a un deterioro prematuro del pavimento, lo que resulta en costos adicionales significativos para la reparación y el mantenimiento. Por lo tanto, la selección del geotextil adecuado puede tener un impacto económico positivo al reducir los costos a largo plazo, agregando que, en el tramo en estudio, “Puente Jarcas - Piedra Larga”, se trata de un tramo de circulación de vehículos de transporte pesado, que evidentemente se ha visto deteriorado, donde se puede evidenciar que la prevención de dichos daños, se puede lograr con la implementación correcta de geotextiles existentes en nuestro medio.
- Innovación en materiales y tecnología: Los avances en la tecnología de geotextiles, han dado lugar a una variedad de opciones, como las geomallas biaxiales y triaxiales. Investigar y evaluar estas opciones con criterios de durabilidad y resistencia es esencial para mantenerse al día con las últimas innovaciones y garantizar una construcción de calidad.
- Sostenibilidad y medio ambiente: La selección de geotextiles adecuada no solo puede aumentar la durabilidad de los pavimentos, sino que también puede contribuir a la sostenibilidad al reducir la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes. Esto, a su vez, puede reducir el impacto ambiental asociado con la construcción y el mantenimiento de carreteras.
- Beneficio para la comunidad: Un pavimento flexible de alta calidad reduce las interrupciones en el tráfico, mejora la seguridad vial y proporciona una mejor experiencia de conducción para los usuarios de la carretera, lo que beneficia directamente a la comunidad.
- En resumen, el proyecto tiene una aplicabilidad importante y justificada debido a su impacto en la infraestructura vial, la economía, la sostenibilidad y la calidad de vida de la población. La elección adecuada de geotextiles para reforzar pavimentos flexibles es esencial, y esta investigación proporciona información valiosa para tomar decisiones informadas en futuros proyectos de construcción y mantenimiento de carreteras.

1.3 Planteamiento del problema

1.3.1 Situación problemática

El presente estudio pretende optimizar características y criterios como la durabilidad y resistencia en pavimentos flexibles mediante un material que en nuestro medio todavía no está siendo aprovechado como pudiera hacerse con los geotextiles, en este caso, aplicados a pavimentos flexibles.

En nuestro medio, no se ha podido aprovechar de manera óptima estos nuevos insumos para pavimentos como los geotextiles debido a que no existe un determinado estudio de selección de geotextiles en el diseño de pavimentos que aproveche los beneficios reales de estos nuevos materiales.

Sin embargo, al no conocer el estudio para la selección adecuada de este tipo de refuerzo en pavimentos, se ocasiona un estancamiento en la construcción en nuestro medio con carreteras pavimentadas con la durabilidad y resistencia convencional, cuando actualmente, tenemos a disposición materiales que pueden mejorar, optimizar y economizar nuestras obras viales de una manera más moderna, y para ello es necesario realizar estudios de selección como el presente que nos abra un camino a la utilización de estos recursos.

Es por las razones expuestas que es necesario un estudio de selección de geosintéticos, y en el caso del presente, de geotextiles en pavimentos flexibles, permitiéndonos probar de manera real, cuáles son los beneficios de una selección adecuada para generar así vías más durables y resistentes que a su vez, aportan a la economía tanto en mantenimiento como vida útil de las carreteras con pavimento flexible.

El uso de geotextiles es una alternativa que puede ser aprovechada en su totalidad para la mejoría de las propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles, tanto en resistencia como en vida útil, siempre y cuando dichos geotextiles sean seleccionados en el diseño de la manera correcta.

1.3.2 Formulación del problema

¿Cómo se puede determinar el comportamiento de geotextiles en el diseño de mezclas asfálticas con los criterios de resistencia y durabilidad en pavimentos flexibles?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de geotextiles mediante criterios de durabilidad y resistencia para mejorar la eficiencia de refuerzo en pavimentos flexibles del tramo Puente Jarcas - Piedra Larga, estableciendo relaciones significativas entre estas variables de acuerdo a la normativa vigente.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar las ubicaciones específicas de los materiales utilizados en las capas del pavimento del Tramo Puente Jarcas-Piedra Larga.
- Realizar ensayos de caracterización normados en los sitios previamente identificados para comprender las propiedades del suelo en profundidad.
- Evaluar y cuantificar el impacto del uso de geotextiles en términos de aumento de resistencia y durabilidad de los pavimentos flexibles existentes.
- Comparar y determinar cuál de los tipos de geotextil, ya sea geomalla biaxial o geomalla triaxial, ofrece el mayor incremento en el refuerzo de los pavimentos flexibles estudiados en el contexto del Puente Jarcas Piedra-Larga.

1.5 Formulación de la hipótesis

Si incorporamos geomallas biaxiales y triaxiales en la construcción de pavimentos flexibles en el tramo Puente Jarcas - Piedra Larga entonces incrementará significativamente la resistencia y durabilidad de estos pavimentos en comparación con métodos convencionales sin geotextiles, debido a una mejor distribución de cargas y reducción de deformaciones.

1.6. Criterios de diseño metodológico

1.6.1 Unidad de estudio

Unidad de muestra: Ensayo de Laboratorio de Suelos, Tecnología del Hormigón y Asfaltos.

Población: Todos los ensayos de Laboratorio de Suelos, Tecnología del Hormigón y Asfaltos.

Muestra: Ensayos que ayuden a determinar la resistencia y durabilidad.

1.7 Alcance de la investigación

Este trabajo tiene como finalidad investigar sobre el comportamiento de los geotextiles en el desempeño mecánico del pavimento como una alternativa en beneficio técnico.

Por medio de este trabajo se busca realizar una comparación entre el pavimento convencional de capas granulares y carpeta asfáltica con otro pavimento constituido por las mismas capas de pavimento y un geotextil entre las capas a objeto de darle mayor refuerzo, colocando el geotextil en diferentes posiciones del cuerpo del pavimento entre las capas constituyentes.

Se buscará de manera amplia los conocimientos bibliográficos de los diferentes geotextiles entre las capas de un pavimento, sus características y propiedades además de la expectativa esperada por los fabricantes de geotextiles en este tipo de intervenciones en pavimentos.

También se analizará algún manual que cuente con las especificaciones correspondientes a los fabricantes de geotextiles como Macaferri, Pavco, etc., para conocer por los fabricantes las características y propiedades de los diferentes geotextiles y sus usos recomendados de manera que algunos de ellos puedan utilizarse en nuestra investigación. El capítulo uno estará dedicado a la presentación del proyecto, de modo que para la siguiente asignatura Proyecto de Grado II, el proyectista tenga los conocimientos previos para realizar la ejecución, obtención de resultados, finalizar el proyecto satisfactoriamente y poder hacer críticas del mismo.

El fundamento teórico estará respaldado por la bibliografía recopilada que se colocará como alcance el estudio general de los pavimentos, sus componentes, sus propiedades y características, a través de la recopilación de información bibliográfica mediante tesis, libros o revistas y normas establecidas para poder tener un conocimiento más a fondo de este tema. Como un segundo plano se pretende alcanzar los conocimientos de las caracterizaciones de los geotextiles y sus aplicaciones particularmente en pavimentos y sus ventajas en algunas de sus propiedades para la utilización en proyectos de nuestro país. En la parte de aplicación práctica se desarrollará desde la caracterización de los diferentes materiales que intervendrán en la investigación realizando todos los ensayos normalizados posibles de acuerdo a la disponibilidad de equipos en el laboratorio de nuestra universidad.

La caracterización de los materiales, ya sea los agregados, deberán cumplir ciertas normas de calidad las cuales van a determinar si el tipo de agregado es el correcto para lo que se pretende alcanzar con nuestro proyecto.

Conociendo las características de los materiales a usar, se procederá a la preparación de probetas que nos permitan la evaluación del comportamiento del geotextil entre las capas del pavimento para lo cual prepararemos probetas especiales que contengan una capa de geotextil en diferentes posiciones que evalúen su incidencia. Para evaluar la resistencia se aplicará carga axial sobre las probetas y así estimar su deformación en función a la carga axial, asimismo para evaluar el comportamiento del geotextil ante esfuerzos laterales se procederá al rompimiento de las probetas en sentido horizontal, aplicando carga en el punto de unión de capas con el geotextil de manera de evaluar la capacidad de adherencia o rompimiento.

Después de todo este procedimiento práctico se seguirá con el estudio de gabinete donde se obtendrá resultados a los cuales se hará críticas y autocríticas, también se procederá a las comparaciones pertinentes a este proyecto.

Una vez recopilada la información necesaria de la influencia de los geotextiles en las capas del pavimento, podremos tener criterios básicos para ver si tiene ventajas o desventajas el uso de geotextiles en capas del pavimento.

A partir de un análisis de resultados que nos muestren claramente el comportamiento que tienen los geotextiles en un pavimento dispuesto en alguna posición entre las capas del mismo, de manera que la resistencia que soporte las cargas permitirá inferir en la mayor o menor durabilidad del pavimento reforzado con geotextiles que permitirán establecer conclusiones y recomendaciones para nuestra investigación.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE GEOTEXTILES EN PAVIMENTOS

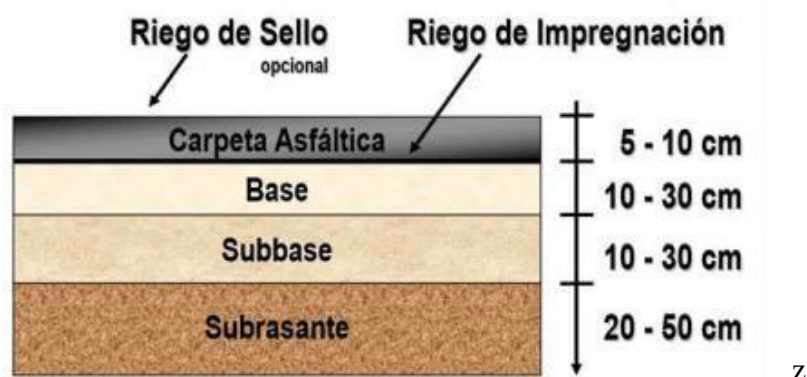
2.1 Definición de pavimento flexible

Desde las brechas hasta las grandes autopistas, los materiales y las técnicas han evolucionado, por lo que hay varios tipos de pavimento, y el flexible es uno de ellos. Con el paso del tiempo se han desarrollado diversas técnicas y métodos para la adecuada construcción de caminos.

Hoy encontramos autopistas de pavimento flexible y rígido que nos proporcionan caminos seguros y consistentes. En este caso hablaremos del pavimento flexible.

Se entenderá por pavimento flexible aquel que está compuesto por una capa o carpeta asfáltica es decir el pavimento flexible utiliza una mezcla de agregado grueso o fino (piedra machacada, grava y arena) con material bituminoso obtenido del asfalto o petróleo, y de los productos de la hulla. Esta mezcla es compacta, pero lo bastante plástica para absorber grandes golpes y soportar un elevado volumen de tránsito pesado.

Ilustración 1: Capas de un pavimento



Fuente: Pavimentos UTN

El uso de pavimentos flexibles se aplica fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como pueden ser vías, aceras o estacionamientos.

La construcción de pavimentos flexibles se realiza a base de varias capas de material. Cada una de las capas recibe cargas por encima de la capa. Cuando las supera la carga que puede sustentar traslada la carga restante a la capa inferior. De ese modo lo que se pretende es poder soportar la carga total en el conjunto de capas.

Las capas de un pavimento flexible que conforman un suelo se colocan en orden descendente en capacidad de carga. La capa superior es la que mayor capacidad de

soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto, la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la base. La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica y además de la base, sub-base y terracería.

La capa superficial o capa superior es la que se encuentra en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas. La capa base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados y puede estar estabilizada o sin estabilizar.

La capa sub-base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. En muchas ocasiones se prescinde de esa capa sub-base.

Las bases y subbases son capas de material pétreo adecuadamente seleccionadas para traspasar las cargas de la carpeta de rodadura a la subrasante (infraestructura). Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, la ubicación de estos materiales dentro de la estructura de un pavimento (superestructura), está dada por las propiedades mecánicas de cada una de ellas.

Algunas ventajas del pavimento flexible:

- Mayor drenabilidad: Las mezclas asfálticas de granulometría abierta proporcionan una drenabilidad mayor al permitir el desalojo del agua transversalmente sobre la macrotextura superficial que presentan, reduciendo el hidroplaneo y la proyección de agua.
- Confort: La sensación de confort que experimentan los pasajeros a bordo del vehículo es mayor sobre pavimentos asfálticos que sobre rígidos, debido a la naturaleza misma del pavimento asfáltico, su flexibilidad y a que las mezclas asfálticas se disponen en varias capas y no solo en una, como en el concreto (Del Val, 2010).

2.2 Componentes del pavimento flexible

2.2.1 Capa subrasante

Es la cota geométrica de la superficie del terreno natural, la cual puede estar conformada por un terraplén (caso de rellenos) o Talud en el caso de cortes, para ambos casos, se denomina subrasante. (Ramos, 2018).

Ilustración 2: Capa subrasante



Fuente: Plataforma de asfaltos VISE

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.

Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR y la compresión simple son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas tales como el ensayo del módulo resiliente, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- Propiedades ingenieriles: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante.

Para el establecimiento de una adecuada base para los distintos pavimentos contemplados en el proyecto, la subrasante debe estar libre de materia orgánica, escombros, basuras o material inestable. Si éstos existen, deben ser removidos y reemplazados por material

CBR no menor al 10%. Se deberá también eliminar toda la vegetación, tierra vegetal y cual tipo de suelo que pueda resultar perjudicial para la estructura.

En caso de presenciar raíces de árboles que dificulten la ejecución de los pavimentos, se deberá aplicar herbicida permitido por la normativa ambiental vigente y que sea aplicado por personal calificado para evitar rebrotes.

En las áreas en donde el proyecto contemple la ejecución de pavimentos, se debe realizar un escarpe de a lo menos 0,2 m de profundidad, para luego proceder con la compactación.

Una vez que las excavaciones o rellenos hayan alcanzado los niveles de subrasante definidos en el proyecto, se debe proceder a la compactación de la siguiente forma:

La compactación se debe realizar exclusivamente por medio de elementos mecánicos, con distintos tipos de rodillo según el tipo de suelo. Se debe procurar que la compactación proporcione una superficie de apoyo homogénea.

La subrasante se deberá compactar con una humedad cercana a la óptima necesaria, hasta obtener una densidad mayor o igual al 90% de la DMCS del Proctor Modificado, o al 80% de la Densidad Relativa, según corresponda.

El espesor efectivo de compactación deberá ser por lo menos de 15 cm superiores de la subrasante, perfilando la superficie hasta lograr los niveles y pendientes definidos en el proyecto.

La subrasante en ningún caso podrá estar constituida por suelos orgánicos o arcillas tipo expansivas

2.2.2 Capa sub-base

Es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y su función es: Reducir el costo de pavimento disminuyendo el espesor de la base. Proteger a la base aislándola de la terracería, ya que, si el material de la terracería se introduce en la base, puede sufrir cambios volumétricos generados al cambiar las condiciones de humedad dando como resultado una disminución en la resistencia de la base. Proteger a la base impidiendo que el agua suba por capilaridad. Transmitir y distribuir las cargas a las terracerías.

2.2.3 Capa base

Es la capa de material que se construye sobre la subbase. Los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que los de la subbase y su función es la de tener la

resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos. Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub base. Aunque exista humedad la base no debe de presentar cambios volumétricos perjudiciales.

2.2.4. Capa de rodadura

En el caso de los pavimentos flexibles, está constituida por un material pétreo, al que se adiciona un producto asfáltico que tiene por objeto servir de aglutinante. Esta capa trasmite las cargas inducidas por el tráfico hacia la capa de base en la que se apoya, además que provee una superficie adecuada para el rodamiento del tráfico. También debe poseer la menor permeabilidad posible, con el fin de que el agua superficial drene en su mayor parte sobre ésta, reduciendo la cantidad de agua que llegue a la base. En general, la carpeta de rodamiento de mayor calidad se construye con mezcla asfáltica producida y colocada en caliente.

2.3. Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer, 2004)

Una mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos queden cubiertos por una película uniforme de asfalto. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma en el pavimento. (Cepeda Aldape, 2002)

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos gruesos y finos, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto.

El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Padilla Rodríguez)

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el método Marshall, el método Hveem y actualmente el método que se utiliza en EEUU. es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall. Debido a las condiciones económicas los países como el nuestro continúan utilizando el método Marshall.

2.3.1 Clasificación de las mezclas asfálticas

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones que pueden ser diversas: (Urrego & Ruiz Ramirez, 2016).

Por Fracciones de agregado pétreo empleado

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico (Urrego & Ruiz Ramirez, 2016)

Por la temperatura de puesta en obra

- **Mezclas asfálticas en caliente:** Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Esta planta contraflujo produce concreto asfáltico en caliente y está compuesta por un sistema de dosificación de áridos, una zona de secado y mezclado, un sistema de almacenamiento y calentamiento de asfalto y combustible, un sistema de filtrado y recuperación de finos y un silo de almacenamiento de mezcla asfáltica.
- Algunas de las ventajas de las mezclas asfálticas en caliente son que poseen: estabilidad, durabilidad, flexibilidad y alta resistencia a las bajas temperaturas. Además de las mezclas asfálticas en caliente también son muy utilizadas las

mezclas asfálticas en frío, pero estas últimas tienen distintas características como que están compuestas por agregados minerales con asfalto emulsionado y son mezcladas a temperatura ambiente.

2.3.2 Características de las mezclas asfálticas en caliente

Estas mezclas en caliente, tienen buen comportamiento en servicio cuando son proyectadas, construidas y apoyadas correctamente. Se deben tener en cuenta para este fin, las siguientes características de servicio:

Durabilidad

La mezcla debe ser resistente a los agentes climáticos, particularmente a la acción desintegrante del agua y al alto tránsito. Depende fundamentalmente de la utilización de agregados pétreos sanos, y duros, de un adecuado contenido de cemento asfáltico, de la compactación relativa de la mezcla, del contenido de vacíos, de la calidad del filler en el caso de usarse y de que el material que pasa el tamiz N°40 de la mezcla no tenga plasticidad.

Resistencia al deslizamiento

Es necesario contar con un porcentaje de cemento asfáltico óptimo y con un porcentaje de vacíos adecuado. Un exceso de cemento asfáltico en la capa de rodamiento es la causa más común de deslizamiento; bajo contenido de cemento asfáltico (o una falta de adherencia) y agregados que se pulan con el tránsito, originan una falta de fricción entre los neumáticos y el pavimento durante la acción del frenado, sobre todo en períodos de lluvia o alta humedad. Es necesario contar con un porcentaje de vacíos suficientes, como para que el aumento de densidad de la mezcla por la reiteración de cargas, no sea motivo de afloración del cemento asfáltico.

Flexibilidad

Es la capacidad de deformarse elásticamente que tiene la mezcla asfáltica, para acompañar sin agrietamientos, ni roturas, las pequeñas deflexiones que sufre la base bajo cargas, por otra parte, debe tener cierto carácter plástico que le permita relajar las tensiones provocadas por las diferencias de temperatura y adaptarse al movimiento de las estructuras viales manteniendo uniforme e íntimo contacto con las capas de apoyo no asfálticas. Está influenciada por la rigidez del cemento asfáltico usado (medido por la penetración o la

viscosidad y su susceptibilidad térmica), por un adecuado porcentaje de cemento asfáltico óptimo; por la relación filler-betún y por la relación estabilidad-fluencia.

Estabilidad

Puede definirse como la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bajo la acción del tránsito. La mezcla asfáltica compactada es sometida en estado de compresión semi-confinada a esfuerzos de corte. Depende su comportamiento de la forma, tamaño y textura superficial de los agregados; dureza y cubrición de los mismos; características del cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo; relación filler-betún y grado de compactación.

Compactibilidad

La mezcla debe permitir una fácil distribución y una correcta densificación. Los factores que influyen son: tipo de cemento asfáltico; porcentaje óptimo del mismo, granulometría, textura y rugosidad del agregado y muy particularmente la forma de las partículas del agregado mineral y la relación filler-betún. Un adecuado porcentaje de arena natural redondeada, asegura una buena trabajabilidad.

El cumplimiento de estas cinco características mencionadas, involucra además de los factores mencionados para cada una de ellas, el especial cuidado de las temperaturas y procesos de mezclado, aplicación y compactación.

La durabilidad de los asfaltos

Todos los materiales bituminosos utilizados en la construcción de capas de rodadura asfáltica cambian con el tiempo de una u otra forma bajo la acción de factores externos e internos. La consistencia del asfalto cambia con la temperatura haciéndose más blando en tiempo cálido y más duro en tiempo frío. el asfalto expuesto a la intemperie se endurece constantemente mayor o menor grado como resultado de la acción del clima y el tránsito o por un mal manejo Durante los procesos de mezclado en planta en obra. estas alteraciones van a influir en su comportamiento en obra, en su durabilidad (medida por el grado de resistencia a dichos cambios) y en su prematuro envejecimiento (cambios anómalos producidos por influencia externa e interna) (Lozano, 2006, pág. 188).

2.4. Definición de durabilidad de un cemento asfáltico

La durabilidad de un cemento asfáltico se define como su capacidad para mantener las propiedades ligantes y cohesivas de la mezcla, antes y después de envejecido. Las cualidades del cemento asfáltico deben mantenerse a lo largo de la vida útil del pavimento con el objeto de que cumpla la misión que tiene encomendada. A favor de esa inalterabilidad juega un papel importante la naturaleza del material, constituido por hidrocarburos de distintos grados de polaridad, y por el contrario, a favor de esta evolución factores internos y externos. Entre los internos, el propio sistema coloidal, muestra una cierta tendencia a evolucionar hacia la gelificación con el consiguiente aumento de la dureza y fragilidad, mientras que las condiciones climáticas, la intensidad del tránsito, las características propias de la mezcla asfáltica diseñada y el proceso constructivo son factores externos que disminuyen la durabilidad del ligante asfáltico e inciden en el comportamiento de la estructura de pavimento.

La durabilidad de una mezcla asfáltica hace referencia a la capacidad que tiene para resistir la acción del tránsito y clima sin fisurarse, deformarse o desintegrarse, durante la vida útil de la estructura del pavimento, y está ligado a las propiedades fisicoquímicas de ligante, quienes, a su vez, regulan su comportamiento reológico, además de las propiedades propias de la mezcla (Lozano, 2006, págs. 188-189).

2.4.1 Factores que afectan la durabilidad

Las características del cemento asfáltico son un factor de primordial importancia en la durabilidad de las capas de rodadura asfálticas, si los diseños de la estructura del pavimento y de la mezcla han sido los correctos y se ha realizado un buen control de calidad sobre el proceso constructivo.

Existen seis factores que contribuyen al proceso de envejecimiento de un cemento asfáltico durante el proceso de mezclado y/o servicio:

La oxidación es la reacción del oxígeno del aire con los componentes químicos del cemento asfáltico. La velocidad y la magnitud de la oxidación dependerán de las características del cemento asfáltico y de la mezcla asfáltica, así como de la temperatura del aire.

La volatilización es la evaporación de los solventes más livianos. Inicialmente, es función de la temperatura. No es un factor que contribuya al envejecimiento a largo plazo del asfalto bajo las condiciones de servicio.

La polimerización es una combinación de moléculas afines para formar enlaces débiles carbono en grandes cadenas lineales causando un endurecimiento progresivo del cemento asfáltico. No existe una evidencia científica de que sea un factor importante en el envejecimiento del asfalto en servicio.

La tixotropía Es el endurecimiento progresivo por la formación de una estructura dentro del asfalto durante un período de tiempo, la cual puede ser destruida por recalentamiento o durante el servicio de la mezcla asfáltica. La tripsotropia está asociada a pavimentos que tienen poco o nulo tránsito.

La sinéresis es una reacción de oxidación mediante la cual los aceites menos viscosos fluyen hacia la superficie de la película de l-gante, Por lo cual el cemento asfáltico se endurece rápidamente.

La separación es la remoción de los aceites, resinas y asfaltenos que constituyen el cemento asfáltico, causando una absorción selectiva de agregados de alta porosidad.

Todos estos factores contribuyen al envejecimiento prematuro de un cemento asfáltico que van a actuar en mayor o menor grado según las siguientes condiciones o etapas de trabajo:

- a) El proceso de mezclado en la planta
- b) Durante la vida útil del pavimento (Lozano, 2006, págs. 189-190)

2.5 Envejecimiento del cemento asfáltico en el proceso de mezclado en la planta

Está bien identificado el endurecimiento que se produce en los ligantes por efecto de su “largo” tiempo de permanencia, altas temperaturas en los tanques de almacenamiento, y sobre todo durante el proceso de mezclado, dónde son pulverizados en caliente y colocados sobre la superficie mineral. Debido al espesor de película tan delgado y a las altas temperaturas a la que es sometido, el asfalto pierde fracciones volátiles. La operación de mezclado en planta y en caliente de ligante asfáltico y los agregados, a pesar de ser un proceso de corta duración (alrededor de 30 segundos), es muy crítica debido al espesor tan pequeño de la

película de asfalto que recubre la partícula de agregado (0,005 a 0,010 mm de espesor). El cemento asfáltico, una vez calentado en los tanques de almacenamiento, se ve sometido a un sobrecalentamiento producido por el contacto con los agregados.

Mientras se mantienen grandes cantidades de cemento asfáltico a una temperatura elevada en los tanques de almacenamiento, no se presentan cambios sensibles en sus propiedades. Sin embargo, cuando se mezcla el asfalto caliente con los agregados también calientes extendiéndolos en películas delgadas sobre su superficie durante el proceso de mezclado, las condiciones son muy favorables a la pérdida de las fracciones más livianas, a la oxidación y a la adsorción-absorción de ciertos componentes por parte de los agregados. El control de la temperatura del asfalto y de los áridos, así como la reducción al mínimo del tiempo de mezclado, disminuyen en gran parte, el riesgo de un potencial endurecimiento perjudicial.

Durante el mezclado, tanto la evaporación como la oxidación son mucho más rápidas que la temperatura del pavimento. Asimismo, la naturaleza de las reacciones que se presentan a temperaturas altas como a temperaturas bajas son muy variables, lo que genera cambios en su comportamiento reológico (Lozano, 2006, págs. 190-191).

2.5.1 Proceso de envejecimiento del cemento asfáltico en el pavimento

Este es un proceso de larga duración. Aunque el cemento asfáltico es sometido a temperaturas moderadas, las características propias de la mezcla pueden llegar a afectar de manera irreversible su durabilidad. Una vez puesta en obra la acción de los agentes atmosféricos, sobre todo la acción del oxígeno, catalizada por la radiación ultravioleta de la luz solar, y la elevación de temperatura propician la oxidación de las moléculas más susceptibles y como consecuencia un envejecimiento del ligante. Los asfaltos tienen una gran capacidad para absorber la luz, la reacción de oxidación del asfalto catalizada por la luz (foto-oxidación), tiene lugar en los primeros cinco micrones película de asfalto expuesta. En ausencia de luz esta oxidación es más lenta, tiene lugar especialmente en el interior de la capa asfáltica. La velocidad de reacción de oxidación está influenciada por

la temperatura del aire y es duplicada por cada 10°C de aumento de la misma, lo cual hace que la temperatura del aire sea un factor que incida en la velocidad y magnitud de la oxidación del cemento asfáltico. Los pavimentos más expuestos a la acción de la luz y aire serán los que se construyan en climas tropicales, por lo cual es recomendable que las mezclas asfálticas diseñadas tengan mayor contenido de asfalto, compatible con sus características mecánicas, para proveer un mayor espesor de película de ligante, con lo cual el oxígeno tendrá un largo camino por difundir a través de la misma.

Otro factor que provoca el endurecimiento de ligante asfáltico es la característica de los finos. Aunque no se ha comprobado que el incremento de finos durante la vida del pavimento cause un alto grado de rigidización del asfalto y la capa asfáltica, si se aumenta la viscosidad del asfalto, alterando muy poco sus características reológicas.

De todos los factores descritos como causales de envejecimiento del asfalto, la principal causa de endurecimiento y fragilidad del asfalto con el tiempo es la oxidación atmosférica de ciertas moléculas del asfalto, por la formación de grupos funcionales que contienen oxígeno, altamente polares y de fuerte interacción química.

Como resultado final, los ligantes presentan una mayor o menor evolución o envejecimiento. dichas alteraciones van a modificar sus propiedades de flujo y su consistencia; el cemento asfáltico va perdiendo su poder gigante, se torna frágil y quebradizo permitiendo que el agua penetre a través de la película y desplace el asfalto con el consiguiente deterioro de la mezcla. En esta etapa la evaporación no es importante debido a las altas temperaturas moderadas que se presentan en la mezcla asfáltica y el alto peso molecular de los compuestos del asfalto.

En servicio, el envejecimiento del cemento asfáltico es función del tiempo, la temperatura, el contenido delirante asfáltico, la absorción del agregado, el espesor de película alrededor de las partículas y las características propias del ligante asfáltico.

En este aspecto, juegan un papel muy importante los controles sobre el diseño de la mezcla y el proceso constructivo de que organismos técnicos encargados de los

misimos. Se puede aumentar la durabilidad de una estructura de pavimento si aumentamos la durabilidad de la mezcla asfáltica mediante una adecuada compactación, minimizando el contenido de vacíos. Este factor, unido a un bajo contenido de cemento asfáltico, es quizá el que más contribuya al envejecimiento del asfalto. Se debe evitar que el aire y el agua circulen libremente por la mezcla asfáltica compactada con el fin de disminuir los riesgos de que se presente un endurecimiento prematuro que conlleve a su rigidización y posterior fisuramiento por fatiga o cambios térmicos de la capa de rodadura asfáltica.

Se puede afirmar que la durabilidad de una mezcla asfáltica y por lo tanto de la estructura del pavimento dependerá de la resistencia del cemento asfáltico a endurecerse por oxidación, del contenido de vacíos con aire presentes en la capa asfáltica y del contenido del ligante (Lozano, 2006, págs. 191-193).

2.6 Métodos de ensayo para medir la durabilidad del cemento asfáltico

Los objetivos primordiales de los trabajos de investigación sobre la durabilidad de los cementos asfálticos son:

- Conseguir mejorar la durabilidad
- Desarrollar métodos de laboratorio relativamente rápidos y económicos que permitan realizar una estimación correcta de la durabilidad del cemento asfáltico al ser utilizado en un pavimento.

Buscando cumplir el segundo objetivo de esta investigación existen muchas investigaciones, pero es poco probable, desarrollar un ensayo que permita predecir el comportamiento de un cemento asfáltico durante el mezclado y extensión en las mismas circunstancias que influyen en la vida útil del pavimento.

Es difícil elegir la propiedad o propiedades físicas del aglomerante que deben investigarse en los ensayos de durabilidad. La mayor parte de los investigadores han escogido la viscosidad, la ductilidad o la fragilidad como un índice de envejecimiento, pero es evidente que no puede confiarse en ningún ensayo, a menos que se haya hecho una correcta correlación con su comportamiento en obra. Los métodos utilizados para medir la durabilidad del cemento asfáltico se pueden dividir en dos categorías: los tradicionales y los nuevos métodos y criterios de evaluación.

2.6.1 Los métodos tradicionales

Busca relacionar los resultados obtenidos de los ensayos rutinarios: penetración 25°C, viscosidad a 60°C, punto de ablandamiento y película delgada.

2.6.2 Los nuevos métodos y criterios de evaluación

Utilizan la tecnología desarrollada por SHRP. Además de estos métodos de ensayo, se puede hacer uso de otros, tales como: la espectroscopía de absorción infrarroja, espectroscopía por resolución magnética nuclear, la cromatografía de exclusión por tamaño y la cromatografía líquida de alto rendimiento (Lozano, 2006, págs. 200-201).

2.7 Suelo

Es una estructura multicapa de tipo agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con líquidos y gases que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. (Hernandez et al., 2016).

El objetivo de cualquier sistema de clasificación de suelos para carreteras es el de tener la capacidad para predecir el comportamiento de la sub-rasante construida con un suelo dado, en base a algunas pruebas sencillas efectuadas en el suelo alterado. Mediante estos ensayos y también en base a la experiencia, es posible situarlos dentro de un grupo en el cual los suelos son de características similares.

El principal sistema de clasificación de los suelos para carreteras en Estados Unidos es la AASHTO propuesto inicialmente en 1931 y revisado posteriormente.

Las pruebas principales utilizadas por este sistema de clasificación son mecánicas y varias pruebas de laboratorio de rutina. Los principales ensayos son los límites de ATTERBERG que son: límite líquido, plástico y de contracción.

Las pruebas de rutina tienen el objetivo de describir las propiedades físicas del suelo. Cabe hacer notar que los ensayos de límites deben ser con suelos que pasen el tamiz N° 40.

Entre los procesos mecánicos tenemos la granulometría de los suelos, límite líquido, límite plástico y límite de contracción.

También se debe calcular el índice de plasticidad que es la diferencia entre el límite líquido y plástico. En base a estos ensayos se obtiene la clasificación del suelo según la AASHTO mostradas en las tablas.

2.7.1 Granulometría de los suelos

La granulometría de los suelos nos permite determinar la representación porcentual de los diferentes tamaños de las partículas que componen el suelo.

La distribución granulométrica es la propiedad más importante de los suelos granulares. Si el suelo contiene finos, la muestra se trata primero con un agente defloculante, se lava y se seca, para luego tamizarla.

Los resultados de los análisis mecánicos se presentan usualmente por una curva de distribución granulométrica. La forma de la curva es una indicación de la granulometría.

Un suelo bien graduado es aquel que contiene proporciones casi iguales de todos los tamaños de las partículas, y se caracteriza por tener una curva relativamente suave que cubre un amplio espectro de partículas.

Un suelo es uniforme, si una alta proporción de partículas está comprendida en una banda estrecha de tamaños.

Un suelo de graduación discontinua, es aquel que contiene partículas pequeñas y grandes, pero presenta una ausencia notable de partículas intermedias. Una indicación de la graduación puede expresarse a través de los coeficientes de uniformidad y de curvatura. En general, mientras mayor es el C_u , más amplio es el rango de tamaños de partículas en el suelo. Los suelos bien graduados tienen un $C_u > 4$ para gravas o $C_u > 6$ para arenas, mientras que C_c debe estar entre 1 y 3.

2.7.2 Límites de Atterberg

Para desarrollar el proceso de clasificación de suelos necesitamos conocer los límites de Atterberg.

Para conocer el comportamiento de los finos de un suelo, se utilizan índices que definen la consistencia del suelo en función de su humedad.

La magnitud de la plasticidad que presenta una arcilla en estado natural, depende de su composición mineralógica y de su contenido de humedad. Así, la consistencia varía desde un estado sólido (seco), pasando por un estado semisólido (de baja humedad) en donde el suelo se desmorona y no hay plasticidad, siguiendo por el estado plástico para contenidos altos de humedad y llegando a un estado líquido para contenidos de humedad muy altos.

Tabla 1: Límites del suelo



Fuente: Norma ASTM 1883

Límite de contracción (LC)

Se define como el contenido de agua bajo el cual, el cambio de volumen de la masa de suelo es constante (el suelo cambia de un estado sólido a semisólido).

Límite plástico (LP)

Se define como el contenido de agua con el cual, el suelo al ser enrollado en bastoncitos de 3,2 mm de diámetro, se desmorona, (el suelo cambia de un estado semisólido a un estado plástico).

Límite líquido (LL)

Se define como el contenido de humedad con el cual, una muestra de suelo cohesivo, luego de aplicar 25 golpes en la Cuchara de Casagrande, con una frecuencia de 2 golpes por segundo y una altura de caída de 1 cm, produce el cierre en aproximadamente 1 cm de una ranura efectuada sobre la muestra de suelo instalada en dicho aparato, el suelo cambia de un estado plástico a un estado líquido).

Determinados LL y LP, se puede obtener el IP (índice de plasticidad), el cual representa el rango de humedad en el cual el suelo se encuentra en estado plástico.

$$IP = LL - LP$$

2.7.3 Suelo altamente deformable

Son suelos formados de partículas derivadas de la descomposición química y mineralógica que sufren los constituyentes de las rocas, generalmente por meteorización física o química.

Son suelos plásticos que cuando están húmedos y cuando están secos son muy duros, tienen además permeabilidad extremadamente baja. (Cuzcano, 2018).

La deformación de un terreno es condicionante de fundamental importancia para la elección y tipo de cimentaciones.

Las relaciones entre tensiones y deformaciones del terreno permiten evaluar los asientos

(movimientos verticales) y los movimientos horizontales que una estructura puede sufrir. Cuando se aplica un esfuerzo se produce una deformación que se obtiene a partir de la relación tensión/deformación, que por lo general es una relación compleja.

El grado de deformación depende de la naturaleza del terreno, del tipo de estructura, del índice de huecos del suelo y de la forma que es aplicada la carga. Es usual el empleo de fórmulas de la teoría de la elasticidad lineal, para condiciones adicionales de homogeneidad e isotropía.

Deformación permanente

Es un tipo de deterioro del material, como consecuencia a la aplicación de cargas y descargas, dichas deformaciones se pueden recuperar si no exceden el límite de capacidad de carga, lo cual se debe a los efectos combinados de elevadas cargas de tránsito o por acción del clima.

La deformación permanente puede presentarse en las diferentes capas que componen la estructura del pavimento, inclusive a nivel de la subrasante. Las causas que la originan son diversas.

Es por ello que la elaboración de un proyecto de pavimentos asfálticos debe ser integral y muy cuidadosa en cuanto a la calidad de los materiales seleccionados, el diseño de la mezcla asfáltica y el diseño estructural del pavimento.

Así, se hace necesario realizar un estudio detallado del tráfico, el tipo de suelos que conforman la subrasante, las condiciones de drenaje, el clima y otros factores externos como los procesos constructivos.

La deformación permanente, en sus diferentes formas, es una de las fallas más importantes e incidentes en el comportamiento de los pavimentos asfálticos.

Por ese motivo, es importante elaborar un estudio bibliográfico dirigido a identificar las principales causas que generan este tipo de falla, puesto que su conocimiento contribuirá a tomar las precauciones necesarias para evitar el deterioro prematuro de los pavimentos.

2.7.4 Falla

Es producto de una deficiencia del pavimento, la cual es ocasionada de forma inmediata o posteriormente, producida por la reducción en la capacidad de carga de este. En su etapa más crítica, la falla se manifiesta en la obstrucción generalizada del pavimento, a la que se asocia precisamente el índice de servicio.

Los pavimentos, tanto flexibles como rígidos, no fallan o colapsan repentinamente, sino que lo hacen en forma gradual y progresiva. La continua acción fundamentalmente de las sollicitaciones del tránsito y clima siempre tienen una manifestación en la superficie del pavimento. Se entiende por “daño” o “falla” en un pavimento toda indicación de un desempeño insatisfactorio del pavimento, es decir, todo apartamiento de un comportamiento definido como “perfecto”.

Al evaluar los daños no sólo es necesario precisar el tipo de que se trata sino también efectuar una categorización del orden de magnitud, grado o intensidad. El problema puede complicarse más entonces, si se tiene en cuenta que el concepto de severidad puede ser eminentemente subjetivo si queda librado a la opinión personal o nivel de exigencia particular de quien recoge la información. Como consecuencia, se hace difícil la definición de niveles de mantenimiento consistentes y la obtención de conclusiones válidas, acerca de la eficacia de ciertas reparaciones, del impacto de estas en la condición del pavimento, etc.

Ilustración 3: Patologías del asfalto



Fuente: Inova civil

Modos de falla

Los daños se han clasificado encuadrándolos dentro de diferentes modalidades de falla. Existen diversas formas de clasificación en ese sentido.

- Tratándose de pavimentos flexibles y mixtos, se han establecido 4 modos de fallas a saber:

- Deformaciones Permanentes, aquellas distorsiones o variaciones del perfil transversal y/o longitudinal del pavimento;
- Figuraciones o Agrietamientos, las fracturas o discontinuidades visibles en la superficie;
- Desintegraciones, las disgregaciones y descomposición de la superficie de rodamiento del pavimento;
- Otros, incluyendo bajo esta clasificación los daños originados por exudaciones o bien por efecto de la acumulación de trabajos de mantenimiento (baches y reparaciones).

2.7.5 CBR

El CBR (California Bearing Ratio), consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo Proctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón. Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en porcentaje del valor de referencia. (Hernandez et al., 2016).

El ensayo CBR se emplea para evaluar la capacidad portante de terrenos compactados como terraplenes, capas de firme, explanadas, así como en la clasificación de terrenos.

Las siglas CBR significan Californian Bearing Ratio y proviene de que este ensayo fue desarrollado, antes de la segunda guerra mundial, por el Departamento de Transportes de California.

La prueba CBR de suelos consiste básicamente en compactar un terreno en unos moldes normalizados, sumergirlos en agua y aplicar un punzonamiento sobre la superficie del terreno mediante un pistón normalizado.

Se rige por la norma ASTM 1883 o por la norma UNE 103502 entre otras.

Ilustración 4: Probetas de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describen los detalles del ensayo de CBR.

Procedimiento CBR suelos

La prueba del CBR consiste en determinar la carga que hay que aplicar a un pistón circular de $19,35 \text{ cm}^2$ para introducirlo en una muestra de suelo a una velocidad de $1,27 \text{ mm/min}$ y hasta obtener una penetración de $2,54 \text{ mm}$.

A través de este procedimiento se determina lo que se llama el Índice CBR que es la relación entre la carga determinada y la que se obtiene por el mismo procedimiento para una muestra tipo de roca machacada. Se expresa en porcentaje.

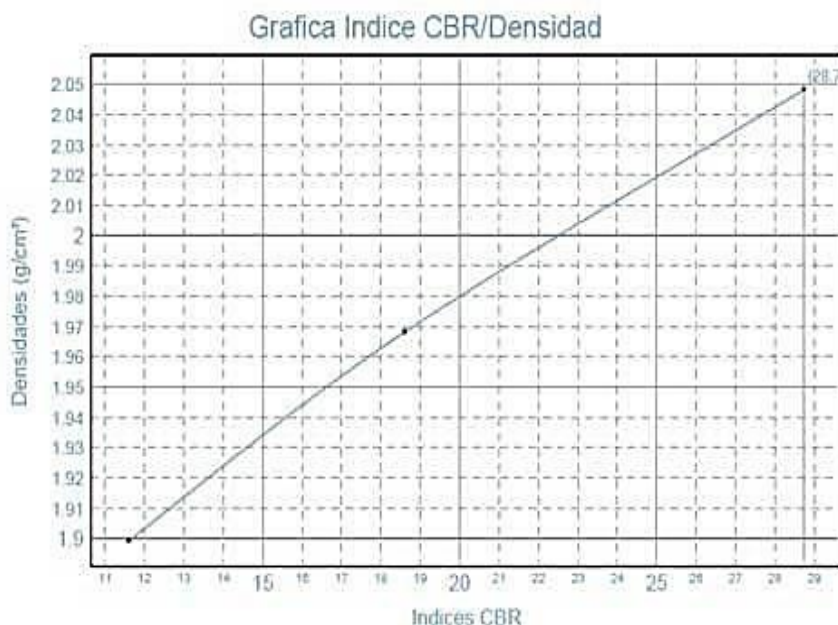
El procedimiento de ejecución de la prueba CBR consta de los siguientes pasos:

1. Determinación de la humedad óptima y densidad máxima de las muestras de suelo mediante el ensayo Proctor modificado o normal.
2. Añadir agua a una muestra de suelo para alcanzar la humedad óptima.
3. Compactar la muestra en tres moldes CBR estandarizados de $15,24 \text{ cm}$ de diámetro y $17,78 \text{ cm}$ de altura. La muestra se compacta en 3 capas por molde siendo la energía de compactación de cada molde de 15, 30 o 60 golpes por capa mediante una maza de $2,5 \text{ kg}$ que se deja caer libremente desde una altura de 305 mm .
4. Posteriormente se enraza el molde, se desmonta y se vuelve a montar invertido.
5. Se sumergen los moldes en agua (en algunas modalidades de ensayo no se sumerge la muestra).

6. Colocación de la placa perforada y el vástago, así como los pesos necesarios para calcular la sobrecarga calculada.
7. Colocar el trípode de medida sobre el borde del molde, coincidiendo el vástago del microcomparador.
8. Toma de medidas diarias del microcomparador durante al menos 4 días.
9. Sacar la muestra del agua, escurrir y secar exteriormente.
10. Aplicar la carga sobre el pistón de penetración mediante la prensa CBR y tomar las lecturas de la curva presión penetración.
11. Una vez finalizado el ensayo se debe presentar los resultados en una gráfica densidad seca – índice CBR similar a la mostrada a continuación. También conviene mostrar los datos de compactación, humedad, densidad, hinchamiento y absorción.

Tabla 2: Guía CBR

	1	2	3
Energía compactación (%)	100% (60 golpes)	50% (30 golpes)	25% (15 golpes)
Densidad (g/cm³)	2,05 g/cm³	1,97 g/cm³	1,90 g/cm³
Humedad (%)	6,9 %	6,6 %	6,6 %
Absorción (%)	3,8 %	3,9 %	4,2 %
Hinchamiento (%)	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Índice C.B.R.	28,7	18,6	11,6



Proctor de referencia:

PROCTOR NORMAL	
Densidad máxima	2,05 g/cm³
Humedad óptima	7,0 %
Compactación (100,00%)	2,05 g/cm³

Índice de CBR:

Compactación	Densidad	Índice CBR
95 %	1,95 g/cm³	16,4
98 %	2,01 g/cm³	23,7
100 %	2,05 g/cm³	28,7

Fuente: Guía de laboratorio de Suelos

Los resultados se muestran en gráficos de curvas densidad seca vs CBR. Este índice indica el porcentaje de presión ejercida por el pistón sobre el suelo para una penetración determinada con relación a la presión correspondiente a la misma penetración en una muestra tipo.

Cabe comentar que el índice CBR no es una propiedad intrínseca del suelo si no que depende de las condiciones de humedad-densidad del suelo.

También puede calcularse el CBR in situ sobre el terreno natural o en laboratorio sobre muestras inalteradas.

No obstante, los resultados y valores CBR hay que tomarlos con cierta precaución puesto que es un ensayo que presenta cierta dispersión de resultados (al igual que el **SPT**), no refleja las condiciones a las que estará sometido el suelo y es una prueba poco fiable para suelos con CBR elevados.

Ilustración 5: Prensa de compactación CBR



Fuente: Elaboración propia

Correlaciones ensayo CBR

A pesar de lo anterior, es un ensayo muy habitual y suele correlacionarse con el módulo de elasticidad del suelo. A continuación, se presenta una de las relaciones más habituales.

$$E=65*(CBR)^{0,65} \text{ (en Kp/cm}^2\text{)}$$

Igualmente, cuando no es posible realizar el ensayo CBR puede estimarse a partir de otros ensayos como es el ensayo SPT de acuerdo a relaciones como la mostrada a continuación:

Tabla 3: Relación CBR – SPT

N_{SPT}	Material granular	5	10	12	15	20	25	30
	Material cohesivo	2	5	7	10	15	17	20
CBR estimado		1	2	3	5	10	20	30

Fuente: Guía de Laboratorio de suelos

Capacidad Portante

En cimentaciones se denomina capacidad portante a la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

Por tanto, la capacidad portante admisible debe estar basada en uno de los siguientes criterios funcionales:

- Si la función del terreno de cimentación es soportar una determinada tensión independientemente de la deformación, la capacidad portante se denominará carga de hundimiento.
- Si lo que se busca es un equilibrio entre la tensión aplicada al terreno y la deformación sufrida por este, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterios de asiento admisible.

De manera análoga, la expresión capacidad portante se utiliza en las demás ramas de la ingeniería para referir a la capacidad de una estructura para soportar las cargas aplicadas sobre la misma.

Las propiedades mecánicas de un terreno suelen diferir frente a cargas que varían (casi)instantáneamente y cargas casi permanentes. Esto se debe a que los terrenos son porosos, y estos poros pueden estar total o parcialmente saturados de agua. En general los terrenos se comportan de manera más rígida frente a cargas de variación casi

instantáneamente ya que, estas aumentan la presión intersticial, sin producir el desalojo de una cantidad apreciable de agua.

En cambio, bajo cargas permanentes la diferencia de presión intersticial entre diferentes partes del terreno produce el drenaje de algunas zonas.

En el cálculo o comprobación de la capacidad portante de un terreno sobre el que existe una construcción debe atenderse al corto plazo (caso sin drenaje) y al largo plazo (con drenaje). En el comportamiento a corto plazo se desprecian todos los términos excepto la cohesión última, mientras que en la capacidad portante a largo plazo (caso con drenaje) es importante también el rozamiento interno del terreno y su peso específico.

Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

Por tanto, la capacidad portante admisible debe estar basada en uno de los siguientes criterios funcionales: Si la función del terreno de cimentación es soportar una determinada tensión independientemente de la deformación, la capacidad portante se denominará carga de hundimiento. Si lo que se busca es un equilibrio entre la tensión aplicada al terreno y la deformación sufrida por éste, deberá calcularse la capacidad portante a partir de criterios de asiento admisible.

2.8 Aditivos en el pavimento

2.8.1. Función de geosintéticos en el pavimento

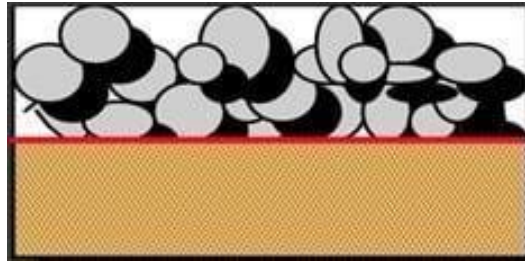
Designan un producto que en su composición esté fabricado a base de polímeros sintéticos o naturales. Estos se fabrican con formas de láminas, fieltros o estructuras tridimensionales para ser empleados principalmente en suelos o materiales en función de la ingeniería civil. Su clasificación depende del tipo de material o método de fabricación. (PAVCO, 2012).

Los geosintéticos son materiales, principalmente fabricados con productos derivados del petróleo, originalmente usados en aplicaciones de ingeniería geotécnica, utilizados para mejorar, cambiar o mantener las características del suelo con el que interactúan.

Los geosintéticos cumplen varias funciones. A manera de ubicarlos adecuadamente, podemos dividirlos en:

Separación

Ilustración 6: Separación

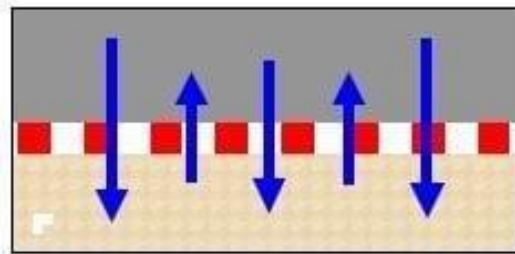


Fuente: Tecnología de los materiales UAP

Es la función que por medio de geosintéticos porosos y flexibles, previenen la mezcla de dos estratos o materiales diferentes evitando la contaminación entre ellos, conservando las cualidades físicas y mecánicas de cada uno.

Filtración

Ilustración 7: Filtración

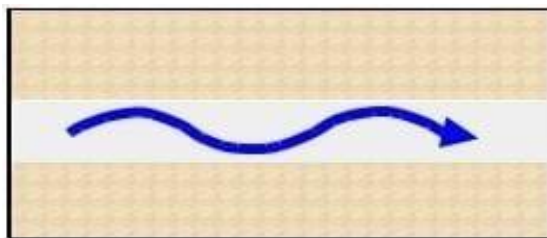


Fuente: Tecnología de los materiales UAP

Es la función que por medio de geosintéticos porosos, flexibles y permeables, en presencia de agua entre dos estratos o materiales diferentes, permite el paso del fluido, evitando la migración de finos o que las partículas se mezclen o contaminen entre sí, aun estando sometidos a un trabajo de carga o compresión.

Drenado

Ilustración 8: Drenado

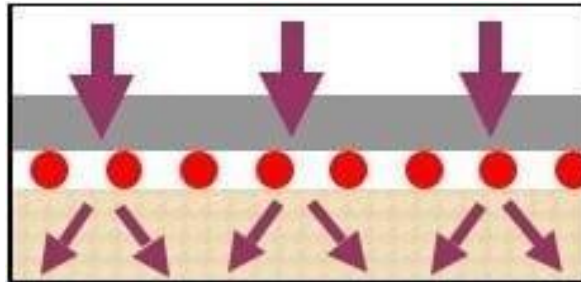


Fuente: Tecnología de los materiales UAP

A través de geosintéticos, se permite un régimen de flujo entre dos estratos, transportando fluidos o gases a través del plano del geosintético aún sometido a un trabajo de compresión o carga.

Refuerzo

Ilustración 9: Refuerzo

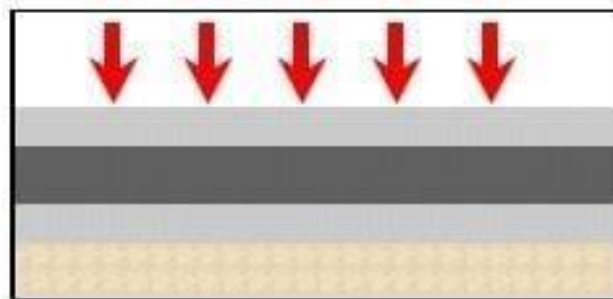


Fuente: Tecnología de los materiales UAP

Es la función por medio de geosintéticos, se aumenta la capacidad de carga de un terreno, teniendo como resultado una superficie más estable; esto se logra por medio de la distribución de cargas, resultado de la interacción o fricción a la que son sometidos los geosintéticos.

Protección

Ilustración 10: Protección

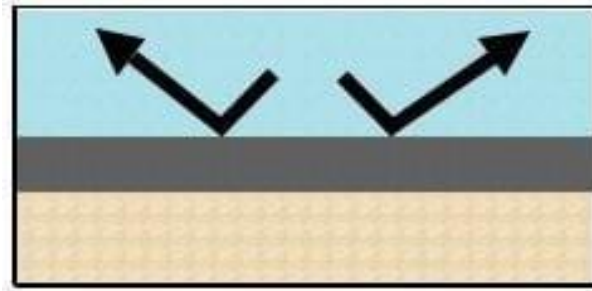


Fuente: ResearchGate

Es la función de recibir, absorber y mitigar una fuerza ejercida sobre una superficie contra los elementos que puedan ocasionar un daño a ésta.

Impermeabilizar

Ilustración 11: Impermeabilizar



Fuente: IOP Publishing

Es la función por medio de la cual se coloca una frontera o barrera impermeable, aislando dos estratos diferentes y evitando la impregnación de uno con el otro.

2.8.2 Tipos de geosintéticos y sus características

Existe una gran variedad de productos geosintéticos que se han desarrollado para cumplir las funciones anteriormente mencionadas, y la tendencia en su uso ha ido en aumento y seguirá incrementándose en razón a la innovación tecnológica y la sustentabilidad.

Los geosintéticos más conocidos y utilizados son:

Geomembrana

Ilustración 12: Geomembrana



Fuente: IOP Publishing

Barreras sintéticas de muy baja permeabilidad, fabricadas a base de un polímero termoplástico, utilizadas principalmente para revestir superficies.

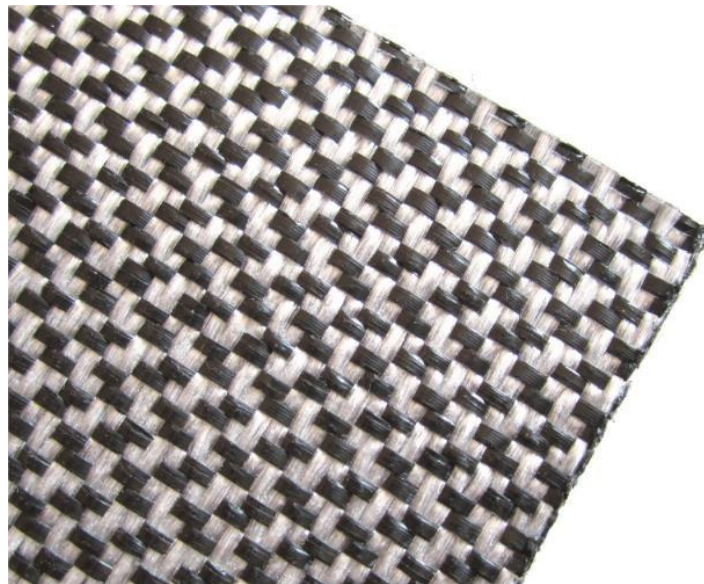
Su principal función es contener materiales y/o sustancias, previniendo el flujo de líquidos y vapores fuera de ésta.

Clasificación (por su componente principal):

- Polietileno (hdpe, lldpe, vldpe)br Cloruro de polivinilo flexible (f-pvc)br Polipropileno (fpp, fpp-r).
- Polietileno clorosulfonadas (cspe-r).
- Terpolímero de etileno propileno dieno (epdm, epdm-r).
- Aleación interpolímero de etileno (eia-r).

Geotextil

Ilustración 13: Geotextil



Fuente: LDM Construcción

Son textiles que, usados con el suelo, roca o cualquier material terreo, mejoran el desempeño y reducen el costo de las obras civiles. Se clasifican, en general en:

- No tejidos (Non-woven).
- Tejidos (Woven).

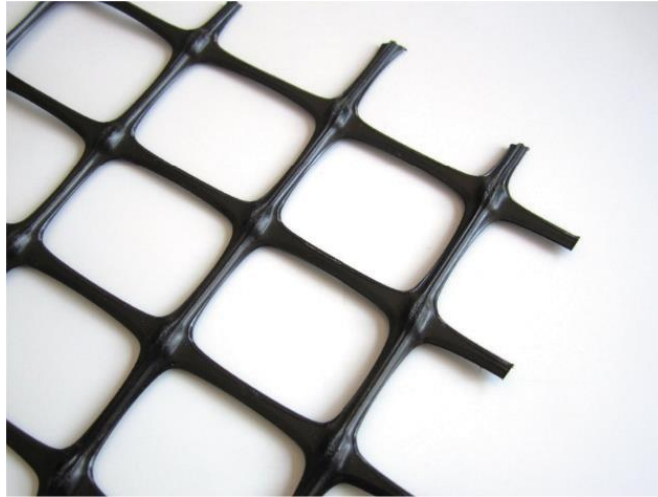
Aplicaciones más usuales:

- Drenaje sub superficial.
- Filtro bajo enrocados o sistemas rígidos. Construcción de barreras contra sedimentos, capas de reasfaltados.
- Estabilización de vías para vehículos y vías férreas.

- Suelos mecánicamente estabilizados (MSE).
- Taludes reforzados o muros de contención.
- Cimentación de terraplenes sobre suelos blandos.

Geomalla

Ilustración 14: Geomalla



Fuente: LDM Geotextiles en carreteras

Las geomallas son elementos compuestos por filamentos, que pueden ser extruidos (una sola pieza), tejidos o soldados, que forman un entramado y que en combinación a un elemento de relleno ofrece el trabajo de tensión. Su función es aumentar la capacidad de carga de un terreno; esto se logra por medio de la distribución de cargas, resultado de la interacción o fricción a la que es sometido.

Tipos de Geomallas:

- Uniaxial
- Biaxial
- Triaxial

Aplicaciones comunes:

- Refuerzo de cimentaciones en suelos blandos.
- Estabilización de suelos de cobertura sobre geomembranas.
- Para incrementar la capacidad de carga.
- Refuerzo de caminos pavimentados y no pavimentados.
- Refuerzo de plataformas de construcción.
- Estabilización y construcción de terraplenes y presas de tierra.

- Reparación en taludes y deslizamientos.

Georedes

Ilustración 15: Georedes



Fuente: LDM Geotextiles en carreteras

Son elementos tridimensionales que en su estructura presentan un área hidráulica, que permite el paso de un fluido entre dos estratos a compresión o carga.

Geocompuestos

Ilustración 16: Geocompuestos



Fuente: SAI Geocompuestos

Es la unión de dos o tres geosintéticos (excepto los GCL que son la unión de un geotextil con un material natural, arcilla expansiva), mismos que combinan sus múltiples funciones en su aplicación.

Tipos:

- Geotextil – geored
- Geotextil – geomalla
- Geotextil – geored – geotextil
- Geotextil – geored – geomembrana
- Geotextil – núcleo de poliestireno
- Geotextil – estructura tubular plana
- Geotextil – arcilla expansiva (gcl's)
- Geomembrana – arcilla

Geomantas / Biomantas / Geoesteras

Ilustración 17: Geomantas



Fuente: SAI Geocompuestos

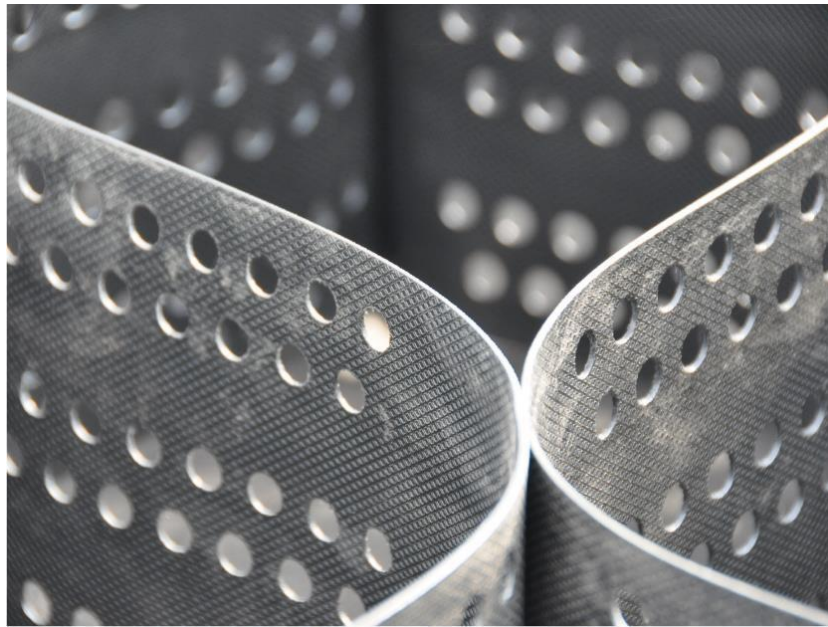
También llamadas mantas para control de erosión, son sistemas de control de erosión superficial. Sus elementos laminares, de dos o tres dimensiones, que su estructura es utilizada para el almacenamiento de material orgánico, que propicia la vegetación y ésta hace la función de confinamiento, o que contiene los finos de un sustrato.

Clasificación

- Degradables
- Fotodegradables
- Biodegradables
- Permanentes

Geoceldas

Ilustración 18: Geoceldas



Fuente: SAI Geocompuestos

Estructuras tridimensionales, en forma de panel, de alta resistencia, comunicadas entre sí, y que realizan la función de confinamiento. Su función es reforzar el suelo por medio del confinamiento lateral de las partículas de material y aumentando su resistencia a la tensión, formando una placa rígida.

2.8.3 Propiedades de los geosintéticos

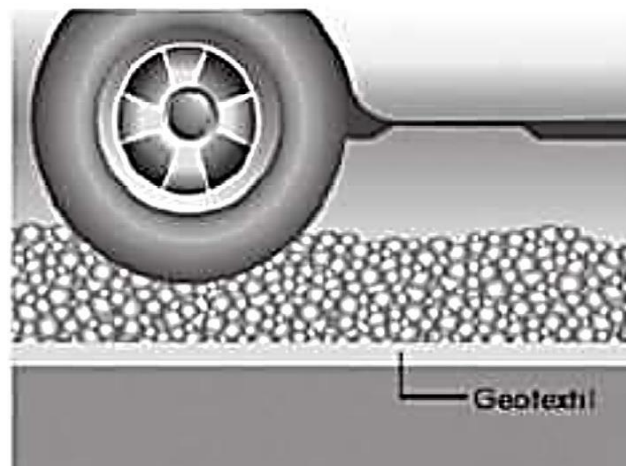
Es la implementación de ciertos materiales para potenciar las propiedades mecánicas de otros. En esta función se aprovecha el comportamiento a tracción del geosintético (ver Figura 1), la cual mejora las propiedades mecánicas de una capa del suelo, con el fin de controlar los esfuerzos tangenciales tanto en la fase de construcción como en la de servicio (ver Figura 2). Roca et al., (2011).

Ilustración 19: Perfil de terreno sin geosintético



Fuente: Materiales Geosintéticos

Ilustración 20: Perfil de terreno con geosintético



Fuente: Materiales Geosintéticos

El pavimento es la base en disposición horizontal de cualquier tipo de construcción para recubrir el suelo y que esté firme y llano. Se dispone en forma de capas y su función principal es la de recibir cargas de tránsito en los estratos inferiores para que los usuarios no presenten problemas durante su uso.

La segmentación de las distintas capas deriva de un motivo económico ya que en el momento en el que se determinan los espesores de las capas, la finalidad es proporcionar el espesor mínimo aceptable que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. De hecho, el proceso productivo también es un factor determinante para la resistencia de las capas no dependiendo solamente de las capas del material.

En este sentido, el pavimento flexible es un tipo de material normalmente tiene una duración de entre 10 a 15 años, con lo cual, es más económica, pero con la propia desventaja de necesitar un mantenimiento constante.

Este tipo de superficie está formado esencialmente por la sub rasante, la sub base, la base y capa asfáltica o de asfalto. Por lo tanto, es susceptible a la aparición de grietas y baches. Con tal de prevenir este tipo de situaciones, se emplearán las mallas de refuerzo o geomallas como método de refuerzo de base.

Este tipo de materiales para el refuerzo del pavimento se emplean desde más de treinta años en estructuras granulares de pavimentos flexibles a través del refuerzo de base, confinamiento o efecto de restricción lateral.

Es muy común que en los pavimentos flexibles aparezcan roturas superficiales de forma prematura ya que la capa base de la estructura se desplaza de forma lateral, lo cual se alejan las cargas de tránsito.

En este aspecto, el empleo de las mallas para el refuerzo aumenta la vida útil del pavimento flexible contribuyendo además en la reducción de la capa base.

Además, al incrementar la capacidad de soporte permite ahorrar costes a nivel de instalación como de traslado del material. La instalación de la malla de refuerzo queda de manera permanente comprimida dando como resultado un aumento en el módulo mecánico de la capa de base, lo cual se traduce en la mayor capacidad de soporte y distribución de esfuerzo, así como menos deformaciones en el área de la sub rasante.

El refuerzo del pavimento crear una barrera que controla la superficie inferior de la envolvente de la falla generada y la confía a la capa de la base granular, la cual obtiene una mayor resistencia que la sub rasante.

La malla de refuerzo ofrece enorme refuerzo hacia la tensión ya que interactúa con el suelo y el mecanismo vertical resultante. La instalación de una o más capas de la malla de refuerzo dentro de la capa de base, origina la interacción por cortante entre el agregado y la propia geomalla, a medida que la base trata de desplazarse lateralmente.

Consecuentemente, la carga por cortante se transmite desde el agregado de la capa granular hasta la malla de refuerzo tensionándola. En este caso, el material de refuerzo para pavimentos flexibles, retrasa la aparición de la deformación por la tensión acumulada.

Es muy importante tener en cuenta que cuando se diseña el refuerzo de la estructura granular del pavimento flexible, debe tenerse en cuenta que las aperturas de la malla de refuerzo admitan una buena interacción con el suelo y a su vez haya baja deformación a través de la vida del pavimento y de forma repetitiva ante la formación de nuevas cargas dinámicas.

Ilustración 21: Colocado de geomallas



Fuente: Materiales Geosintéticos

Ventajas de la instalación de mallas de refuerzo en pavimentos

El material, refuerza tres tipos de mecanismos:

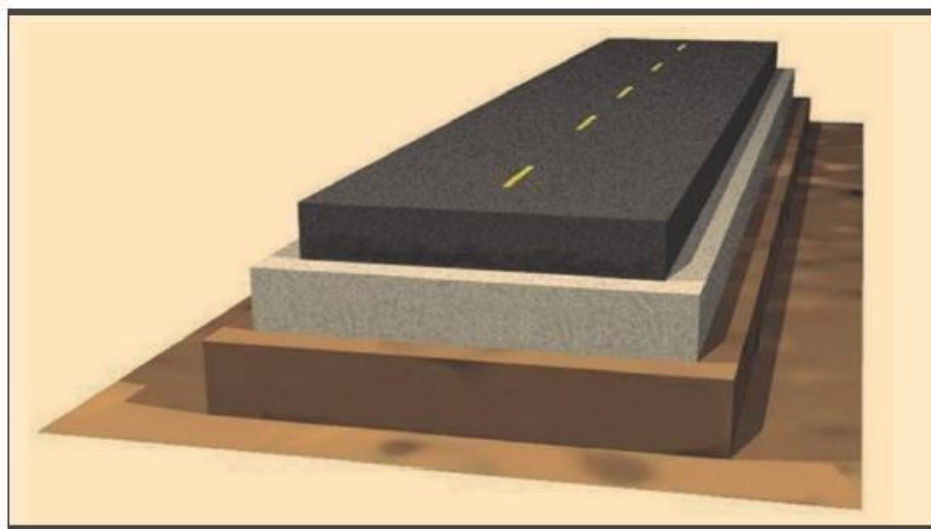
- Restricción del mecanismo lateral: Se refiere al confinamiento que restringe el desplazamiento del material granular ante la aplicación de la carga.
- Incremento de la capacidad de soporte: En este supuesto, la malla de refuerzo hace de barrera controlando la superficie interior de la envolvente de falla de forma que la confina completamente a la capa de base granular, la cual ofrece más resistencia que la subrasante.
- Efecto de la membrana de tensión: Mejora la capacidad de distribución vertical del esfuerzo resultante de la tensión ante una membrana deformada.

Refuerzo de confinamiento

Se trata del refuerzo de confinamiento a la aplicación de las geomallas en pavimentos flexibles, debido a la unión generada en la interacción del suelo granular de la capa de base con la malla de refuerzo.

Separación de capas

Ilustración 22: Separación de capas



Fuente: IPC Patologías pavimentos flexibles

La instalación de las mallas de refuerzo para la separación de capas evita que los componentes de la base granular de un pavimento flexible se mezclen con el suelo de la subrasante y se produzca una deformación.

2.8.4 Funciones de geomallas y geotextiles

Separación

La separación a través de un Geotextil toma fuerza bajo el hecho contundente de que la capa granular componente de un pavimento se pueda mezclar con el suelo de la subrasante, cambiando sus características iniciales, propiciando una falla de deformación en esa interfase y por supuesto en ahuellamientos excesivos y fisuras en la superficie del pavimento. Lo adecuado en este caso es que el estrato granular mantenga su capacidad de distribuir los esfuerzos de diseño, para lo cual es indispensable mantener su capacidad permeable y su espesor intactos.

Algunos diseñadores previendo que parte de la estructura granular Base/Subbase podría mezclarse con el suelo de subrasante, sobre dimensionaban el espesor del estrato granular con el objeto de sacrificar un volumen de material granular.

Esta práctica dejó de ser necesaria con el uso de un adecuado Geotextil de alta capacidad de filtro para que el agua pase libremente sin generar presión de poros y de suficiente retención de acuerdo a las características del suelo de la subrasante.

Las características mínimas mecánicas, hidráulicas y de durabilidad adecuadas que debe tener el geotextil para garantizar su desempeño y supervivencia pueden ser las definidas en la Especificación de la AASHTO DESIGNATION M 288-97 ó del Artículo 674-02 del INVIAS.

Filtro

El uso de geotextiles como elemento de filtro para drenajes en vías, es tal vez el más conocido en Colombia, justamente por el hecho de que se conoce ampliamente el deterioro que causa la excesiva humedad en una estructura de pavimento, lo cual se presenta en mayor medida en las épocas de invierno. Un buen drenaje para proteger el pavimento de una vía, ahorraría suficiente dinero de mantenimiento lo cual a gran escala permitiría construir nuevas vías.

La humedad puede penetrar en la estructura de pavimento a través de varios puntos, tales como la superficie, sobre todo por las fisuras y las juntas, por la presión de poros de aguas sub superficiales.

El exceso de humedad en la estructura causa varios efectos dañinos, como reducción de los esfuerzos cortantes en la masa granular, engrosamientos diferenciales en suelos expansivos, transporte de finos hacia y desde la base/subbase granular disminuyendo su permeabilidad o desestabilizando la estructura.

Las características mínimas mecánicas, hidráulicas y de durabilidad adecuadas que debe tener el geotextil para garantizar su desempeño y supervivencia pueden ser las definidas en la Especificación de la AASHTO DESIGNATION M 288-97 ó del Artículo 673-02 del INVIAS. las definidas en un diseño del filtro usando métodos adecuados como el propuesto por Giroud (1982).

Estabilización

Cuando la estructura de pavimento se va a construir sobre un suelo de baja capacidad portante $C_u \leq 90$ kPa el concepto separar se convierte en un concepto de estabilizar pues se requiere de un Geotextil que aporte refuerzo, mientras que siga funcionando como separador y filtro de alta capacidad de flujo.

Las estructuras de pavimento sobre suelos blandos se han estabilizado tradicionalmente efectuando reemplazos profundos del suelo de subrasante para albergar enrocados, empalizadas o suelos estabilizados con cemento. Estas prácticas son costosas aún más

cuando la disponibilidad de estos materiales es escasa o no se encuentran en zonas cercanas al proyecto.

La estabilización con Geosintéticos de alto módulo de tensión, se genera por la resistencia a tensión del Geotextil y la restricción al movimiento lateral por la fricción entre el suelo-Geotextil, lo cual se ha llamado por algunos consultores como “Efecto de soporte tipo membrana”.

Este efecto en la práctica permite que los esfuerzos que llegan al Geotextil transmitidos a través de la Base/subbase granular sean distribuidos a una mayor área lo cual aumenta el ángulo de transmisión de los esfuerzos desde la superficie.

Las características mínimas mecánicas, hidráulicas y de durabilidad adecuadas que debe tener el geotextil para garantizar su desempeño y supervivencia pueden ser las definidas en la Especificación de la AASHTO DESIGNATION M 288-97 o del Artículo 676-02 del INVIAS. Sin embargo, en mi concepto cuando se trata de mejorar la estabilidad de una subrasante es preferible verificar a través de un diseño usando métodos adecuados como el propuesto por Giroud y Noiray 1981, Hass1987.

Refuerzo de la estructura granular

Las Geomallas han sido utilizadas con éxito como refuerzo de estructuras granulares en pavimentos flexibles y terraplenes. Este tipo de refuerzo se ha definido por varios consultores como refuerzo de base y subbase, también se ha clasificado como efecto de restricción lateral o refuerzo de confinamiento debido a la trabazón que se genera en la interacción suelo granular-Geomalla.

En consecuencia, el refuerzo a tensión que ejerce una Geomalla interactuando con el suelo está en función del módulo elástico de la Geomalla y el mecanismo vertical resultante de la restricción lateral al movimiento del suelo granular es ayudar a soportar los esfuerzos causados por las cargas vehiculares.

Teniendo en cuenta que la restricción lateral y/o confinamiento es más eficiente, a mayor interacción entre el suelo granular y el Geosintético, se ha establecido a través de ensayos de desgarre (Pull-Out) que las Geomallas de refuerzo son más eficientes que los geotextiles tejidos de alto módulo de la misma resistencia y de la misma base polimérica. También se ha determinado que entre más angular sean las partículas del suelo granular mayor es el efecto del refuerzo.

Cuando se diseña un refuerzo de la estructura granular de un pavimento, debe tenerse en cuenta que la Geomalla sea de alta resistencia, alto módulo, que su superficie genere fricción, que sus aberturas permitan una buena interacción con el suelo y especialmente que garantice una baja plastodeformación (Creep) a largo plazo, ante la permanente repetición de cargas dinámicas que exigen a la Geomalla mantener su resistencia a la tensión para no permitir deformaciones en la vida útil de la estructura.

La plastodeformación ó relajación (Creep) de las fibras estructurales que componen un Geosintético de refuerzo debe ser considerada en función del tiempo, temperatura, frecuencia de cargas y esfuerzos.

No existe una especificación de características mínimas mecánicas y de durabilidad para el uso de Geomallas en estructuras de pavimento, pues como un elemento de refuerzo debe diseñarse.

Existen métodos de diseño analítico dentro de los más conocidos están los propuestos por Giroud y Noiray 1981, Giroud y Bonaparte 1984, Hass1987, Webster 1991, Christopher and Holts 1991, FHWA, 1993. y otros incluso propuestos por los fabricantes de Geomallas.

Refuerzo y absorción de energía de sobre carpetas asfálticas

La necesidad de efectuar mantenimientos más eficientes de vías pavimentadas, con carpetas asfálticas fatigadas, ha motivado la incorporación de tecnologías que permitan rehabilitarlas con mejores especificaciones para prolongar su vida útil. En este caso con las Geomallas flexibles de fibras de Poliéster o Vidrio se ha buscado introducir elemento de refuerzo y de absorción de energía en la interfase de la carpeta asfáltica existente y la nueva de rehabilitación. En la aplicación inicial de esta tecnología, se han reportado casos exitosos, así como otros donde se presentaron inconvenientes generalmente donde se usaron polímeros inadecuados o inapropiados procedimientos de construcción que incluyen no solo a la Geomalla sino también a la mezcla asfáltica.

El uso de Geomallas como elemento de refuerzo a tensión de la nueva carpeta asfáltica, le otorga mayor vida útil o permite reducir el espesor y a su vez retarda la aparición de las fisuras de la carpeta asfáltica antigua, esto en razón de que absorbe la energía que se produce con los esfuerzos de las fisuras por las cargas dinámicas sobre la vía.

Por fatiga o por fallas prematuras de la mezcla asfáltica se presentan fisuras, que evolucionan en tres fases: La fase de no -efecto, la fase de iniciación de la fisura y la fase de propagación, así mismo las fisuras se generan por dos diferentes modalidades.

Por esfuerzos normales al plano de la fisura que van abriendo la fisura, por esfuerzos cortantes en el mismo plano y dirección de la fisura.

No existe una especificación de características mínimas mecánicas y de durabilidad para el uso de Geomallas en la interfase de dos capas asfálticas, pues como un elemento de refuerzo y disipador de energía debe diseñarse.

Algunas de las características Físicas mínimas que se deben exigir en este caso son la resistencia a altas temperaturas de polímero que constituye la geomalla (3240°C) y la compatibilidad y adherencia entre la Geomalla y el asfalto. Existen estudios y métodos de diseño analítico dentro de los más conocidos están los propuestos por Montestruque y Martins 2000.

Para lograr el mayor beneficio de los Geosintéticos en estructuras de pavimento es importante usar el Geotextil o la Geomalla con las características y propiedades apropiadas soportadas por una especificación o un diseño que garantice supervivencia de su función durante la vida útil proyectada para cada caso en particular.

Para separación y estabilización en la interfase Subrasante -Subbase granular el geotextil debe cumplir su función permitiendo el libre paso del agua. Para refuerzo de suelos granulares el geosintético debe usarse al nivel del mayor esfuerzo cortante. El uso de geomallas como elemento de refuerzo de estratos granulares es el más apropiado. El drenaje de aguas laterales que atenten con modificar las condiciones estables de la estructura de pavimento debe optimizarse con el uso de un Geotextil resistente que cumpla con las especificaciones o diseños ya sea utilizando medios drenantes naturales (Gravilla o triturado) ó sintéticos (Mallas, láminas acanaladas, Etc.). El ahorro en mantenimiento de vías con el uso de geomallas flexibles para refuerzo y absorción de energía es un hecho promisorio.

El uso y la selección adecuada de los geosintéticos, debe hacerse con un riguroso estudio para optimizar su función en las estructuras de pavimento.

CAPÍTULO III

DISEÑO METODOLÓGICO Y RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.1. Ubicación de proyecto de estudio

El banco de préstamo del proyecto se encuentra ubicado entre Tarija y Entre Ríos, 35 Km aproximadamente de nuestra ciudad.

El tramo inicia en el Puente Jarcas y termina en Piedra Larga.

Ilustración 23: Ubicación de proyecto



Fuente: Elaboración propia

Coordenadas:

- Longitud: 348139.00 m E
- Latitud: 7629177.00 m S
- Referencias: Dista 32 Km. Desde el aeropuerto de Tarija
- Tramo: Prog. 17553 – 17538 (Piedra Larga)

3.2. Características del tramo de estudio

- Longitud: 14km
- Ancho de carril: 3,75m
- Ancho de Berma: 1,5m
- Espesor de carril: 5 cm
- Espesor de berma: 2,5 cm
- Tipo de topografía: En dos secciones; al inicio ondulado; y montañoso con curvas horizontales y curvas verticales al finalizar el tramo.
- Tipo de suelo: Clasificación A-1 en su mayoría y secciones de roca seccionada con voladura de dinamita.
- Tipo de rodadura: Carpeta asfáltica
- Obras de arte drenaje y elementos complementarios: Cunetas, alcantarillado con, sin bajantes y subterráneas, señalización, Flex Beams, puentes cortos, secciones de ensanche de vía para estacionamiento, muros de contención, mallas de contención.
- Defectos: Cunetas obstruidas, derrumbes, patologías en carpeta asfáltica.
- Información confirmada por empresa constructora y el mismo tiempo supervisora de proyecto del tramo en estudio.

3.3. Inventario fotográfico de fallas y obras de arte en las vías

Registro fotográfico de caracterización descrita del tramo:

Inicio del tramo



Fuente: Elaboración propia

Medición de dimensiones de berma



Fuente: Elaboración propia

Medición de dimensiones de carril



Fuente: Elaboración propia

Flex Beam



Fuente: Elaboración propia

Alcantarillado subterráneo



Fuente: Elaboración propia

Alcantarillado con bajante



Fuente: Elaboración propia

Alcantarillado sin bajante



Fuente: Elaboración propia

Fotografía panorámica, nótese el muro de contención



Fuente: Elaboración propia

Presencia de puentes de viga cortos en el tramo



Fuente: Elaboración propia

Señalización horizontal y vertical incluyendo estoperoles



Fuente: Elaboración propia

Cuneta obstruida por derrumbe



Fuente: Elaboración propia

Bordillo de carretera



Fuente: Elaboración propia

Malla anti derrumbe



Fuente: Elaboración propia

Fin de tramo



Fuente: Elaboración propia

3.4. Caracterización de materiales

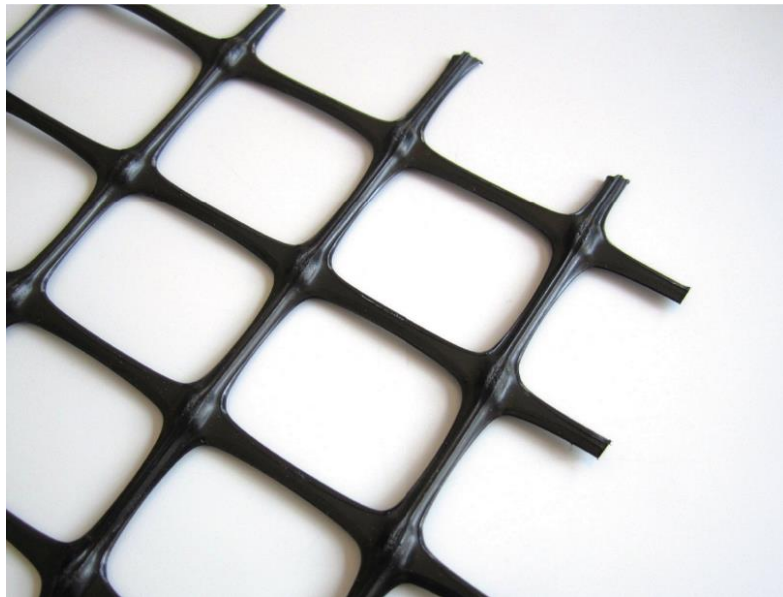
Los materiales utilizados en el presente trabajo son los siguientes:

3.4.1. Geomalla biaxial

Fabricadas a partir de Polipropileno (PP), son aquellas que están pretensados en dos direcciones y se utilizan típicamente horizontalmente en aplicaciones donde la dirección de principio estrés es incierto.

- **Características físicas**

Ilustración 24: Geomalla biaxial aperturas cuadradas



Fuente: LDM Geotextiles en carreteras

Geotextil 198 Grs.

Geotextil 198 Grs. es un polipropileno, fibra cortada, geotextil no tejido con agujas, y reunirá los siguientes valores mínimos promedio rollo (MARV) cuando se prueba de acuerdo con los métodos que se indican a continuación. Las fibras se cosen para formar una red estable que conserve la estabilidad dimensional respecto a la otra. El geotextil es resistente a la degradación ultravioleta y a entornos biológicos y químicos que normalmente se encuentran en los suelos. Geotextil 198 grs se ajusta a los valores de las propiedades que figuran continuación.

- **Información técnica**

Tabla 4: Información técnica geomalla biaxial

PROPIEDADES	MÉTODO DE ENSAYO	INGLES	MÉTRICA
FÍSICA			
Masa/unidad de Área	ASTM D-5261	7.0 oz/yd ²	198 g/m ²
Grosor ₁	ASTM D-5199	67 mils	1.7 mm
Mecánica			
Resistencia a la tracción	ASTM D-4632	180 lbs	0.801 kN
Elongación	ASTM D-4632	50%	50%
Resistencia a la punción	ASTM D-4833	105 lbs	.467 kN
Mullen Burst	ASTM D-3786	330 lbs	2275 kPA
Trapezoidal Tear	ASTM D-4533	75 lbs	.334 kN
Resistencia			
Resistencia UV % Retenido en 500 hrs	ASTM D-4355	70%	70%
Hidráulico			
Tamaño Aparente de la Abertura (AOS) ₂	ASTM D-4751	80 US Std. Sieve	0.180 mm
Permitividad ₁	ASTM D-4491	1.2 sec-1	1.2 sec-1
Permeabilidad ₁	ASTM D-4491	0.25 cm/sec	0.25 cm/sec
Caudal de Agua ₁	ASTM D-4491	100 gpm/ft ²	4072 l/min/m ²
Tamaño de los rollos		15 ft x 300 ft	4.57 m x 91.5 m

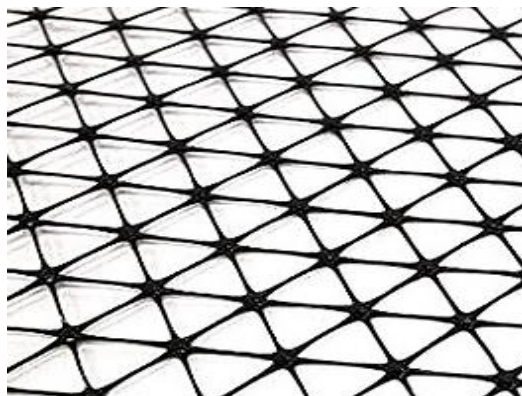
Fuente: Ficha técnica GeoMarv

3.4.2. Geomalla triaxial

Mientras que la rigidez a la tracción de las geomallas biaxiales es predominantemente en dos direcciones, la geomalla triaxial es multidireccional. El material tiene propiedades de tensión casi isotrópicas, hasta 360°. Las partículas de agregado se entrelazan dentro de las aberturas triangulares y el eficiente perfil de costillas profundas de la geomalla triaxial ayuda a confinar el agregado. En combinación con la rigidez isotrópica, se crea una capa estabilizada mecánicamente con un rendimiento excepcional.

- **Características físicas**

Ilustración 25: Geomalla triaxial aperturas triangulares



Fuente: Jubomaterials product

Geotextil TX160

Las características de rigidez cuasi isotrópicas de la geomalla TriAx contribuyen a su mayor desempeño en comparación con las geomallas BX de Tensar usadas en aplicaciones transitadas. Esas características son ideales para mejorar la vida útil de las superficies con o sin pavimento y a la vez, reducir aún más los requisitos de espesor de las capas del pavimento y de la excavación.

- **Información técnica**

Tabla 5: Información técnica geomalla triaxial

Propiedades	Unidad	Valores MD	Valores TD
Dimensión de apertura	mm (in)	32 (1.26)	32 (1.26)
Espesor de costilla	mm (in)	4.0 (0.16)	1.5 (0.06)
Forma de costilla		Rectangular	
Forma de apertura		Rectangular	
Integridad estructural			
Módulo inicial real	kN/m (lb/ft)	550 (37,700)	350 (24,000)
Estabilidad de apertura	N-m/deg	0.37	
Rigidez a la flexión general	mg-cm	1,600,000	
Rigidez radial a baja tensión @ 0.5% tensión	kN/m (lb/ft)	300 (20,800)	
Aparente coeficiente de suelo de fricción	us/gsy	1.25	
Durabilidad			
Resistencia al daño de instalación	%SC/%SW/%GP	100/100/100	
Resistencia a la degradación a largo plazo	%	100	
Resistencia a la degradación UV	%	100	
Vida útil	años	100	

Fuente: Ficha técnica geomalla TriAx

3.4.3. Caracterización de suelos

La clasificación de suelos con todos los estudios pertinentes a los agregados en el presente estudio se encuentra en el Anexo I, sin embargo, a continuación, se presenta un resumen de la clasificación del suelo perteneciente a la muestra seleccionada.

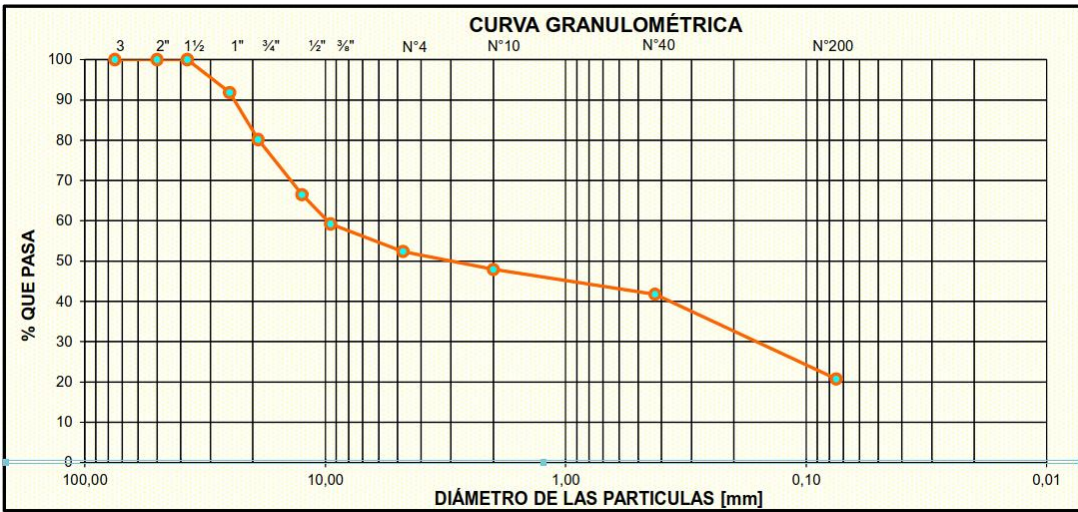
Tabla 6: Clasificación de Suelos

CLASIFICACIÓN DE SUELOS ASTM D 2487 / AASHTO M-145

PROYECTO:	Estudio de la selección adecuada de los geotextiles mediante criterios de durabilidad y resistencia para reforzar pavimentos flexibles.	TRAMO	Prog. 17553 - 17538 (Piedra Larga)
		FECHA:	05/05/2023
LABORATORISTA:	Univ. Carolina Velasco Benítez	IDENTIFICACION:	M-1 CAPA SUB BASE

GRANULOMETRÍA DE SUELOS					
Peso Total Seco (gr.)		3000	Norma:	A.S.T.M. D 6913	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	245,25	245,25	8,18	91,83
3/4"	19,00	350,35	595,60	19,85	80,15
1/2"	12,50	409,81	1005,41	33,51	66,49
3/8"	9,50	218,38	1223,79	40,79	59,21
N°4	4,75	204,62	1428,41	47,61	52,39
N°10	2,00	133,85	1562,26	52,08	47,92
N°40	0,425	185,41	1747,67	58,26	41,74
N°200	0,075	629,78	2377,45	79,25	20,75
BASE		622,55			

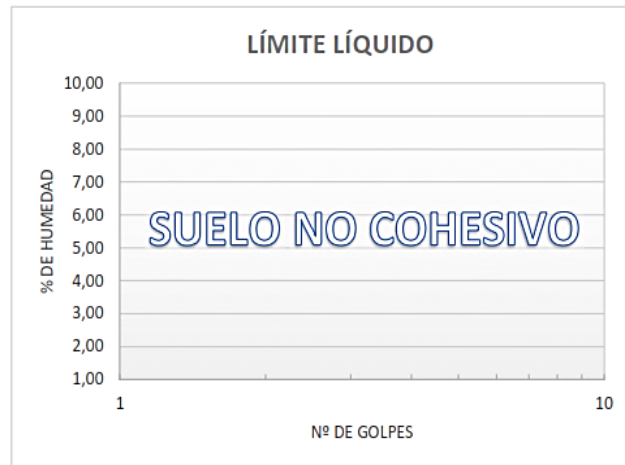
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL (ASTM D 2216)			
Cápsula N°	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	1627,50	1643,92	1652,30
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	1557,34	1575,62	1583,21
Peso de cápsula (gr)	76,84	75,31	77,20
Peso de suelo seco (gr)	1480,50	1500,31	1506,01
Peso del agua (gr)	70,16	68,30	69,09
Contenido de humedad (%)	4,74	4,55	4,59
Contenido de humedad Promedio (%)	4,63		



Fuente: Norma ASTM-D-2487

Tabla 7: Límites del suelo en muestras

LÍMITES DE ATTERBERG (LL, LP, IP) ASTM D 4318				
Determinación de Límite Líquido				
Cápsula N°	1	2	3	4
N° de golpes				
Peso de Suelo Húmedo + Cápsula (gr)				
Peso de Suelo Seco + Cápsula (gr)				
Peso del agua (gr)				
Peso de la Cápsula (gr)				
Peso de Suelo Seco (gr)				
Porcentaje de Humedad (%)				
Determinación de Límite Plástico				Límite Líquido (LL)
Cápsula	1	2	3	0,00 %
Peso de suelo húmedo + Cápsula				Límite Plástico (LP)
Peso de suelo seco + Cápsula				0,00 %
Peso de cápsula				Indice de plasticidad (IP)
Peso de suelo seco				0,00 %
Peso del agua				Indice de Grupo (IG)
Contenido de humedad				0



Fuente: Norma ASTM-D-4318

Tabla 8: Clasificación del suelo

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	SUCS - ASTM D 2487:	GM
	AASHTO M-145:	A-1-b (0)
DESCRIPCIÓN	GRAVA LIMOSA	

Fuente: Norma ASTM-D-4318

A continuación, se presenta la clasificación del cemento asfáltico con todos los estudios pertinentes, con dosificación del cemento asfáltico perteneciente a la muestra seleccionada.

Univ. Univ. Carolina Velasco
LABORATORISTA

Ing. Scila Claudia Ávila Sandoval
RESP. DE LAB. DE ASFALTOS

Tabla 9: Caracterización del cemento asfáltico

BETÚN NUEVO:

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Penetración a 25°C, 100s. 5seg. (0.1mm) AASHTO T-49	Lectura Nº1	mm.	92	94	98			
	Lectura Nº2		97	93	95			
	Lectura Nº3		91	99	92			
	Promedio		93	95	95	95	85	100

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Viscosidad Cinemática 135 °C		mm²/s	325	297	318	313	250	-

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento		°C	44,0	47,0	43,0	45	42	53

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Punto de Inflamación AASHTO T-48		°C	280	290	295	288,33	232	-

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Punto de ablandamiento		°C	44,0	47,0	43,0	45	42	53

ENSAYO		UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO	ESPECIFICACIONES	
							Mínimo	Máximo
Peso Picnómetro		grs.	38,0	36,9	38,0			
Peso Picnómetro + Agua (25°C)		grs.	62,7	62,0	62,7			
Peso Picnómetro + Muestra		grs.	55,8	56,5	56,2			
Peso Picnómetro + Agua + Muestra		grs.	62,8	62,3	62,9			
Peso Específico		grs./cm3	1,003	1,013	1,008	1,008	1	1,05

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

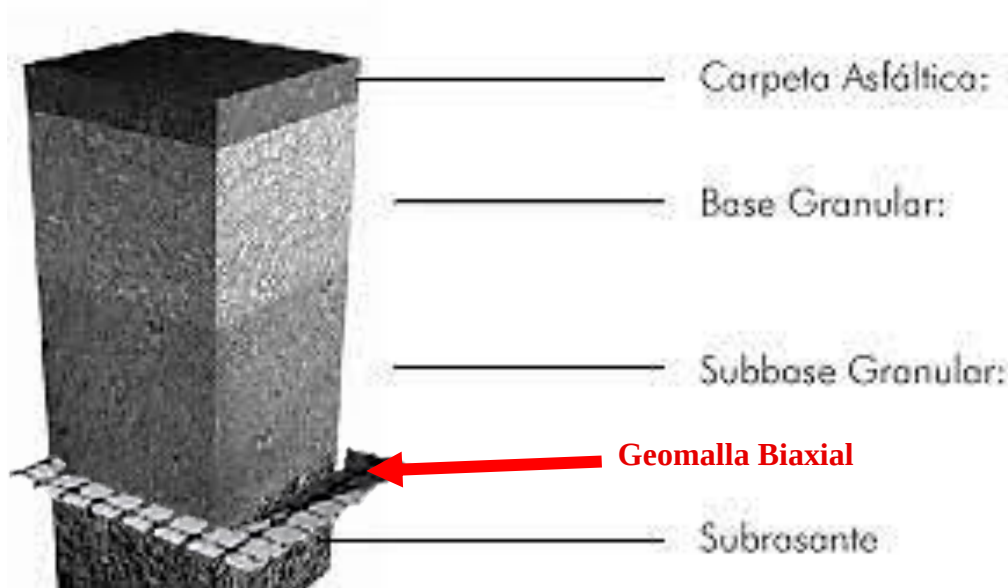
4.1. Criterios de diseño de carpeta asfáltica

Los criterios están basados en la ubicación de las geomallas en cuestión con los componentes de la carpeta previamente estudiados de manera independiente y luego con la presencia de las geomallas en posiciones estratégicas con el fin de evidenciar su mejor resistencia y capacidad de deformación.

4.1.1 Geomalla biaxial: Diseño 1

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas la geomalla biaxial está ubicada entre la capa sub base y la capa subrasante como se muestra en la figura.

Ilustración 26: Diseño 1

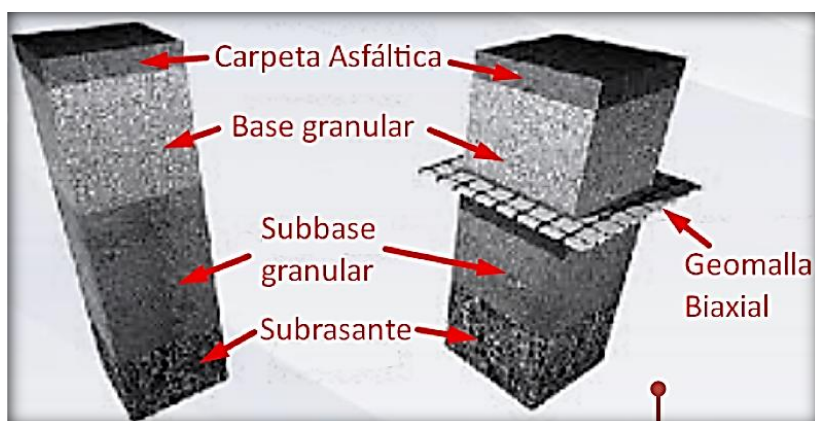


Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Geomalla biaxial: Diseño 2

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas, la geomalla biaxial está ubicada entre la capa base y la capa sub base como se muestra en la figura.

Ilustración 27: Diseño 2

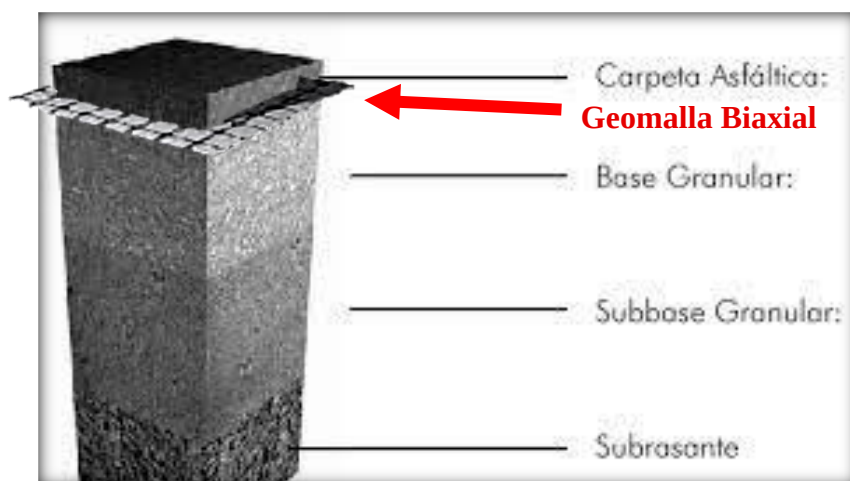


Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Geomalla Biaxial: Diseño 3

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas la geomalla Biaxial está ubicada entre la capa de Rodadura y la capa base como se muestra en la figura.

Ilustración 28: Diseño 3

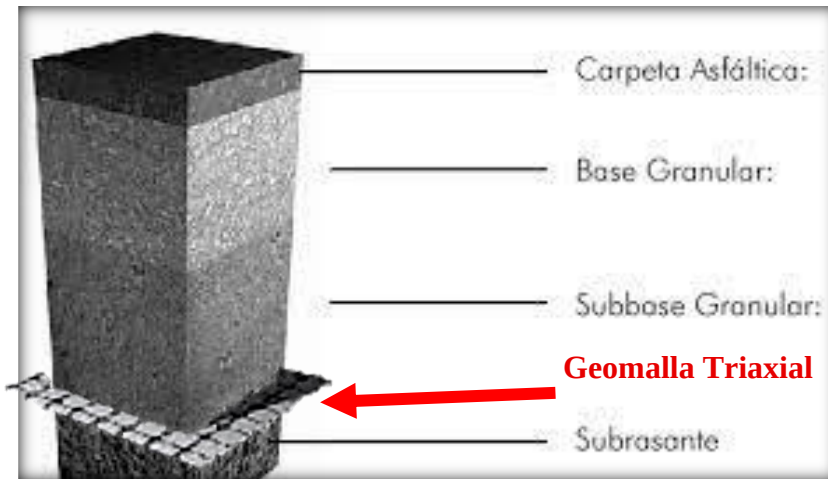


Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Geomalla Triaxial: Diseño 4

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas la geomalla Triaxial está ubicada entre la capa sub base y la capa subrasante como se muestra en la figura.

Ilustración 29: Diseño 4

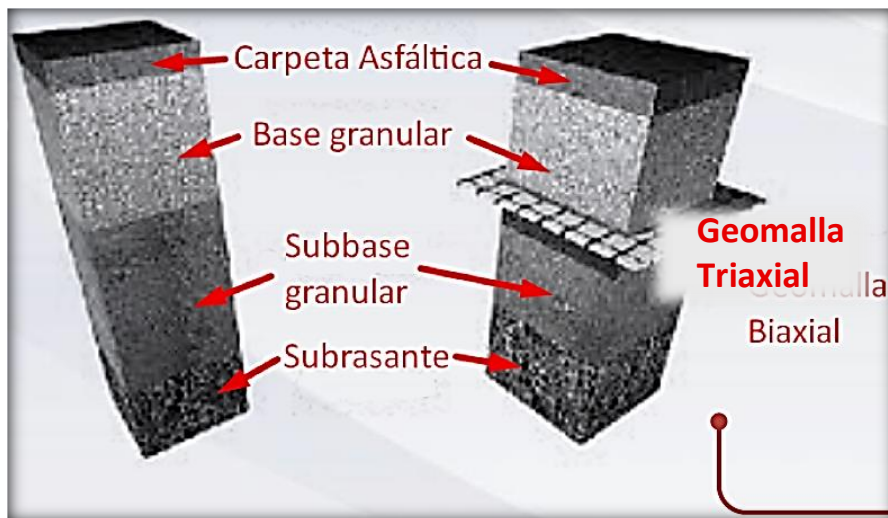


Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Geomalla Triaxial: Diseño 5

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas la geomalla triaxial está ubicada entre la capa base y la capa sub base como se muestra en la figura.

Ilustración 30: Diseño 5

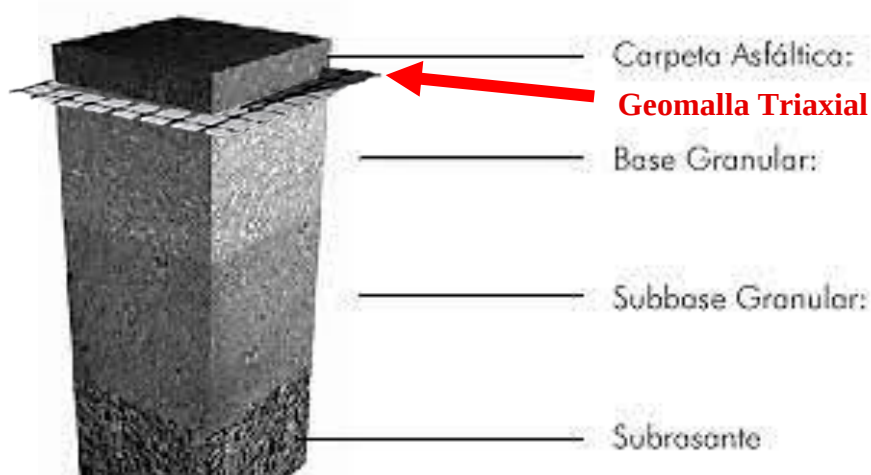


Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Geomalla Triaxial: Diseño 6

En el presente diseño de carpeta asfáltica para la ruptura de probetas la geomalla triaxial está ubicada entre la capa de rodadura y capa base como se muestra en la figura.

Ilustración 31: Diseño 6



Fuente: Elaboración propia

4.2. Cálculo y procesamiento de ruptura de probetas

4.2.1 Sometimiento a probetas con capas puras

Las capas base, sub base y sub rasante como se indica anteriormente fueron sometidas a las mismas pruebas de resistencia y deformación con la finalidad de poner a prueba el aporte una vez aplicadas las geomallas mediante ensayos de lectura de “prensa CBR” presentando los siguientes resultados.

Tabla 10: Probetas capas puras

Espécimen	Tipos de probeta	CARGA		DEFORMACION	
		Lectura en prensa CBR	(kg)	Lectura en prensa CBR	(mm)
Material puro	Base	13	177,326	26	0,66
	Sub Base	49	665,81	46	1,168
	Sub Rasante	17	231,602	125	3,175

Fuente: Elaboración propia en laboratorios de U.A.J.M.S.

4.2.2 Sometimiento a probetas con diseños de carpeta asfáltica predeterminados

Los diseños de carpetas asfálticas como se indica anteriormente fueron sometidas a las mismas pruebas de resistencia y deformación con la finalidad de poner a prueba el aporte una vez aplicadas las geomallas mediante ensayos de lecturación de “prensa CBR” presentando los siguientes resultados:

Tabla 11: Probetas con geomalla aplicada

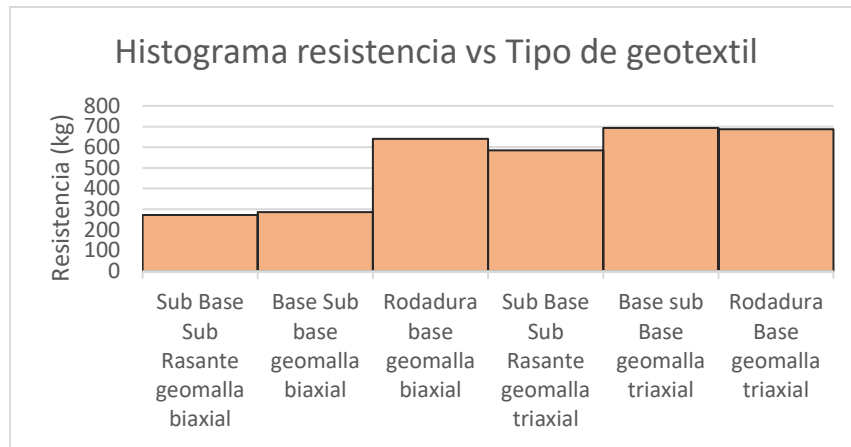
Especimen	Tipos de probeta	Carga		Deformación	
		Lectura en prensa CBR	(kg)	Lectura en prensa CBR	(mm)
Combinaciones con geotextiles	Diseño 1: Sub Base Sub Rasante geomalla biaxial	20	272,309	101	2,57
	Diseño 2: Base Sub base geomalla biaxial	21	285,878	178	4,521
	Diseño 3: Rodadura Base geomalla biaxial	47	641,226	83	2,11
	Diseño 4: Sub Base Sub Rasante geomalla triaxial	43	584,396	89	2,26
	Diseño 5: Base sub Base geomalla triaxial	51	692,948	15	0,381
	Diseño 6: Rodadura Base geomalla triaxial	50	686,311	51	1,31

Fuente: Elaboración propia

4.3. Estadística descriptiva

4.3.1 Histograma de resistencia según tipo de geotextil

Tabla 12: Resistencia vs. Geotextil

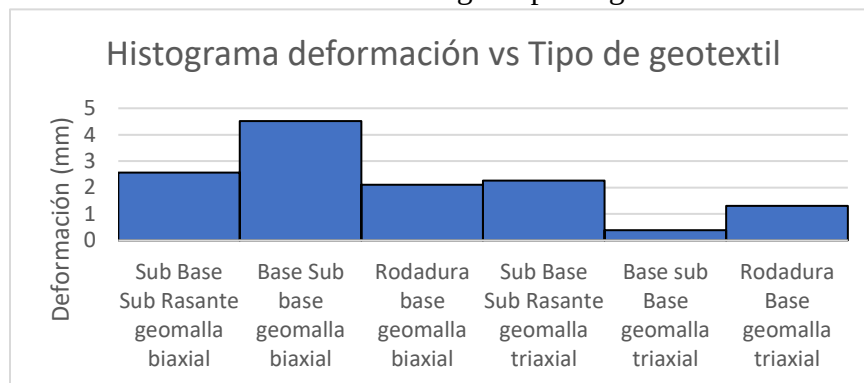


Fuente: Elaboración propia

Los resultados en la gráfica 4.3.1 nos demuestran que los geotextiles triaxiales representan un mayor aporte de resistencia en la carpeta encontrando como posición estratégica el Diseño 4 donde la geomalla Triaxial queda ubicada entre la capa base y sub base.

4.3.2 Histograma de deformación según tipo de geotextil

Tabla 13: Resistencia según tipo de geotextiles

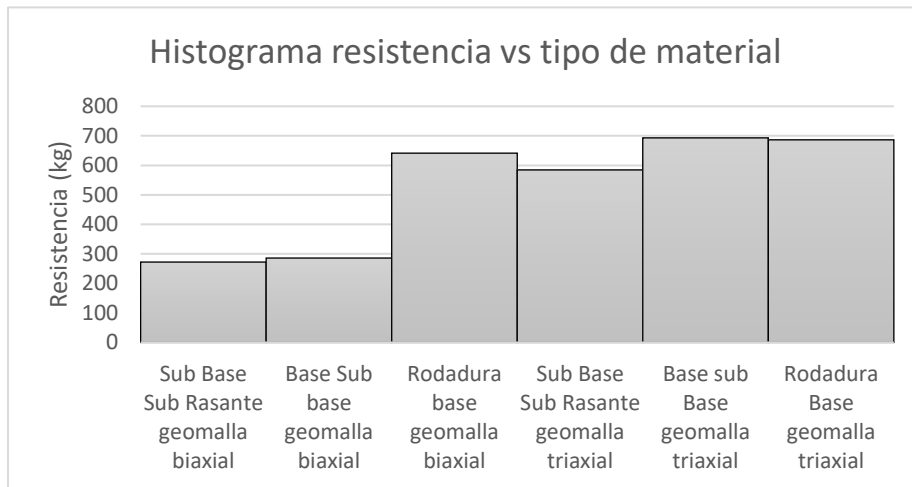


Fuente: Elaboración propia

Los resultados en la gráfica 4.3.2 nos demuestran que los geotextiles triaxiales representan un mayor aporte de resistencia a la deformación, sin embargo, en este caso, solamente el **Diseño 4**, genera una deformación mínima con una diferencia sustancial ante los demás diseños, encontrando como posición estratégica la geomalla Triaxial que queda ubicada entre la capa base y sub base.

4.3.3 Histograma de resistencia según tipo de material

Tabla 14: Resistencia vs. Tipo de material

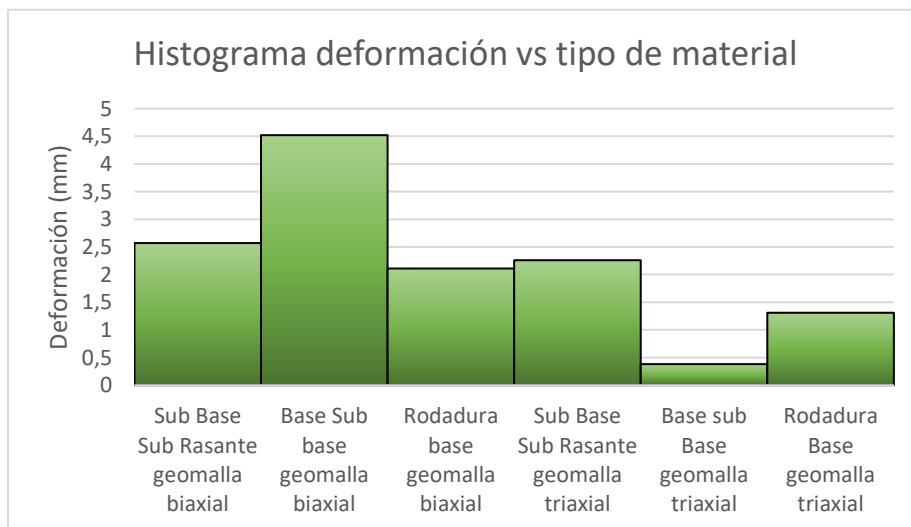


Fuente: Elaboración propia

Los resultados en la gráfica 4.3.3 nos demuestran que los geotextiles triaxiales representan un mayor aporte de resistencia en la carpeta encontrando como posición estratégica el diseño 4 donde la geomalla triaxial queda ubicada entre la capa base y sub base.

4.3.4 Histograma de deformación según tipo de material

Tabla 15: Resistencia vs. Tipo de material



Fuente: Elaboración propia

Los resultados en la gráfica **4.3.4** nos demuestran que los geotextiles triaxiales representan un mayor aporte de resistencia a la deformación, sin embargo, en este caso, solamente el **Diseño 5** genera una deformación mínima con una diferencia sustancial ante los demás diseños, encontrando como posición estratégica la geomalla Triaxial que queda ubicada entre la capa base y sub base.

4.4. Ventajas y desventajas técnicas y económicas del trabajo desarrollado

Ventajas Técnicas y Económicas

- **Mejora de la durabilidad de pavimentos:** El estudio ha demostrado que la selección adecuada de geotextiles basada en criterios de durabilidad y resistencia contribuye significativamente a alargar la vida útil de los pavimentos flexibles, lo que resulta en una infraestructura vial más duradera.
- **Optimización de los recursos:** La selección precisa de geotextiles permite un uso más eficiente de los recursos, minimizando la necesidad de reparaciones y mantenimiento frecuentes, lo que reduce los costos operativos a largo plazo.
- **Mayor resistencia y estabilidad:** Los geotextiles seleccionados con criterios técnicos adecuados brindan un incremento considerable en la resistencia y la estabilidad de los pavimentos, lo que se traduce en una experiencia de conducción más segura y cómoda para los usuarios de la carretera.
- **Reducción de riesgos:** El estudio fomenta prácticas seguras al recomendar el uso de medidas de seguridad y el manejo adecuado de materiales a altas temperaturas, lo que reduce los riesgos de lesiones para el personal involucrado en la construcción y el mantenimiento de carreteras.
- **Reducción de costos a largo plazo:** A pesar del aumento en los costos iniciales, la selección adecuada de geotextiles se traduce en una reducción significativa de los costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil de la carretera, lo que resulta en un ahorro económico. a largo plazo.
- **Menos interrupciones de tráfico:** Los pavimentos flexibles más duraderos requieren menos reparaciones y mantenimiento, lo que reduce las interrupciones en el tráfico y evita los costos asociados con desvíos y congestiones.

Desventajas Técnicas y Económicas

- **Costo inicial:** La implementación de geotextiles en pavimentos flexibles implica un aumento significativo en los costos iniciales de construcción. Esto puede ser una desventaja para proyectos de licitación de carreteras.
- **Requiere un estudio riguroso:** La selección adecuada de geotextiles implica un estudio riguroso de suelos y agregados, lo que puede requerir tiempo y recursos adicionales en la fase de planificación de un proyecto.
- **Necesidad de capacitación:** Para aplicar de manera efectiva los resultados de este tipo de estudio, es necesario contar con personal capacitado en la selección y manejo de geotextiles, lo que puede requerir una inversión en formación.
- **Costo inicial elevado:** El aumento en los costos iniciales puede ser una carga financiera para proyectos con presupuestos limitados, lo que podría llevar a retrasos o limitaciones en la construcción de carreteras.
- **Necesidad de inversión en capacitación:** La capacitación del personal en la selección y aplicación de geotextiles puede requerir una inversión adicional en términos de tiempo y recursos.

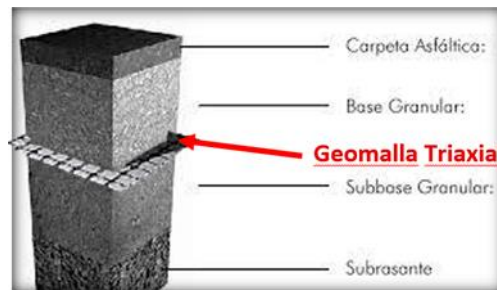
En general, las ventajas técnicas y económicas superan las desventajas, especialmente a largo plazo, ya que la selección adecuada de geotextiles mejora la durabilidad, la resistencia y la seguridad de los pavimentos flexibles, al tiempo que reduce los costos de mantenimiento y mejora la eficiencia de las operaciones viales.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La selección adecuada de geotextiles basada en criterios de durabilidad y resistencia ha sido exitosa para el refuerzo de pavimentos flexibles en el caso del Puente Jarcas-Piedra Larga. Hemos establecido un sólido nivel de relación entre estas variables, confirmando la hipótesis planteada en este proyecto.
- Entre los tipos de geotextiles evaluados, tanto geomallas **biaxiales** como geomallas **triaxiales**, se ha demostrado que aquellos seleccionados con criterios de resistencia y, la durabilidad expresada específicamente en términos de deformación, ofrecen un mejor desempeño en el refuerzo de pavimentos flexibles. Ambos tipos de geotextiles están disponibles en el mercado a través de importación.
- El análisis de los resultados y los histogramas resumen del inciso anterior ha revelado que las geomallas **triaxiales** son la opción ideal, ya que proporcionan una mayor resistencia y una menor deformación. Como resultado, el diseño estratégico recomendado para el puente Jarcas Piedra Larga implica el uso de geomallas triaxiales.



Diseño estratégico ilustrado

- Incluye una figura que representa el diseño estratégico, proporcionando una visualización clara de cómo se implementaría la geomalla triaxial en la estructura del pavimento flexible.
- Los ensayos de caracterización normada se llevan a cabo de manera rigurosa utilizando agregados y capas correspondientes a las progresivas específicas definidas en la sección del Puente Jarcas-Piedra Larga, lo que garantiza la relevancia y validez de los resultados obtenidos.

- Una vez determinado que el tipo de geotextil adecuado para la sección es la geomalla triaxial, se procede a denotar los costos unitarios del mejor diseño para cada geomalla y del suelo puro de mayor resistencia. Los costos por metro cúbico fueron los siguientes:
 - Capa base sin Geomalla = 43,01 \$us/m³
 - Geomalla biaxial entre capa base y sub-base = 295,78 \$us/m³
 - Geomalla triaxial entre capa base y sub-base = 297,65 \$us/m³
- Aunque la implementación de geomallas en el pavimento flexible representa un aumento significativo en los costos, observamos que la diferencia entre la aplicación de geomalla biaxial y triaxial es mínima, solo un 0,63%. Sin embargo, el beneficio en términos de resistencia y durabilidad en la aplicación de la geomalla triaxial es considerablemente mayor que esta diferencia en costos, como se evidencia en el análisis de costos.
- Este proyecto destaca que el mayor costo inicial de la implementación de geotextiles en el pavimento es una inversión efectiva a largo plazo. El aumento en resistencia y durabilidad reduce significativamente los costos de mantenimiento de la vía con el tiempo. Se sugiere que las autoridades consideren invertir en vías que ofrezcan mayor resistencia y durabilidad, ya que esto se traduce en un ahorro significativo en costos a mediano y largo plazo y en una infraestructura vial más sostenible, aportando al mismo tiempo a la conservación del medio ambiente debido a la disminución del uso de materiales a base de productos químicos en la cotidiana reparación y mantenimiento de vías en la actualidad.

5.2. Recomendaciones

- Desarrollo de una guía de selección de geotextiles: Dado que el estudio ha demostrado la importancia de la selección adecuada de geotextiles para el refuerzo de pavimentos flexibles, se recomienda encarecidamente la creación de una guía de selección de geotextiles específica para las condiciones y tipos de suelo en la región, particularmente en el departamento de Tarija. Esta guía proporcionará a los profesionales de la construcción de carreteras una referencia valiosa para tomar decisiones informadas en futuros proyectos.
- Estudio riguroso de suelos y agregados: Antes de aplicar cualquier tipo de geotextil, se recomienda llevar a cabo un estudio de suelos y agregados completo y riguroso. Este estudio proporcionará datos esenciales para la selección adecuada del geotextil y garantizará que los resultados sean aplicables y efectivos en el contexto específico del proyecto.
- Medidas de seguridad en el manejo de materiales: Durante la manipulación de asfaltos y otros materiales a altas temperaturas, es crucial utilizar medidas de seguridad adecuadas, como guantes y lentes de protección. Además, se deben utilizar los instrumentos adecuados para garantizar la seguridad del personal involucrado en el proceso y prevenir lesiones.
- Manejo preciso de equipos e instrumentos: Para minimizar la probabilidad de errores en los ensayos, se recomienda un manejo preciso y cuidadoso de los equipos e instrumentos utilizados. Esto garantizará que los resultados obtenidos sean confiables y precisos, lo que es fundamental para la toma de decisiones informadas.
- Preparación adecuada de geomallas: Antes de aplicar las geomallas, es esencial permitir que estas se aplanen adecuadamente, ya que a menudo vienen empaquetadas en rollos. Al cortarlas para su colocación en sondas, se debe asegurar que no haya puntas salientes y que estén centradas para evitar dañar la sonda o provocar la formación de fisuras.
- Uso de lubricantes adecuados en moldes: En lugar de utilizar papel cebolla engrasado, se recomienda el uso de lubricantes de moldes apropiados, como aceite. Esto minimiza el riesgo de fisuras en las sondas y evita el desperdicio de muestras, lo que es fundamental para obtener resultados fiables en los ensayos.

- Estas recomendaciones no solo mejoran la efectividad del proyecto en cuestión, sino que también promueven prácticas seguras y precisas en la selección y aplicación de geotextiles, lo que es beneficioso para la comunidad de profesionales de la construcción de carreteras.