

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE A TRAVÉS DEL ENSAYO
RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS CON Y SIN PRESENCIA
DE GEOSINTÉTICO**

NATALY BOLAÑOS PEÑA
RICARDO MAURICIO GALINDEZ ZAPATA

Director:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.SC.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

POPAYÁN

MAYO DE 2019

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**NATALY BOLAÑOS PEÑA
RICARDO MAURICIO GALINDEZ ZAPATA**

TRABAJO DE GRADO DE MAESTRÍA SOMETIDO AL DEPARTAMENTO DE
GEOTECNIA DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA COMO PARTE DE LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER.

APROBADO POR:

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, D.SC.

(DIRECTOR)

NOMBRE:

(JURADO INTERNO)

NOMBRE:

(JURADO EXTERNO)

FECHA: Popayán, mayo de 2019.

Ficha Calcográfica

Bolaños Peña, Nataly; Galindez Zapata, Ricardo Mauricio
Análisis de la Deformación Permanente a Través del ensayo Rueda de Hamburgo para Mezclas
Asfálticas con y sin presencia de Geosintético. 2018.

XVIII, 73 p., 279 mm

Trabajo de grado de Maestría – Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil.

Departamento de Geotecnia.

- | | |
|------------------------|---------------------------|
| 1. Geosintético | 2. Deformación permanente |
| 3. Pavimento asfáltico | 4. Rueda de Hamburgo |

Referencia Bibliográfica

Bolaños P., N. y Galíndez Z., R.M. (2018). *Análisis de la Deformación Permanente a Través del ensayo Rueda de Hamburgo para Mezclas Asfálticas con y sin presencia de Geosintético.*

Trabajo de Grado de Maestría, Universidad del Cauca, Popayán.

CESIÓN DE DERECHOS

NOMBRES DE LOS AUTORES: Nataly Bolaños Peña, Ricardo Mauricio Galindez Zapata.

TÍTULO: Análisis de la Deformación Permanente a Través del ensayo Rueda de Hamburgo para Mezclas Asfálticas con y sin presencia de Geosintético.

GRADO / AÑO: Magíster / 2019.

Se concede a la Universidad del Cauca el permiso para reproducir copias de este trabajo de grado de Maestría y para prestar o vender tales copias solamente para propósitos académicos y científicos. Los autores se reservan otros derechos de publicación y ninguna copia de este trabajo puede ser reproducida sin la autorización por escrito de los autores.

Nataly Bolaños Peña

C.C. 1.061.689.306

Email: natabolanos@unicauca.edu.co

Ricardo Mauricio Galindez Zapata

C.C. 1.061.691.607

Email: ricardomaogz@hotmail.com

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, quienes han orientado cada uno de nuestros pasos, por su incondicional apoyo durante el desarrollo del trabajo de grado y por ser el pilar fundamental de nuestras vidas. Ustedes con su amor, trabajo, sacrificio y confianza han plantado una semilla de la cual hoy recogen fruto.

A la Universidad del Cauca por ser la sede de todo el conocimiento adquirido durante esta etapa agradecemos por brindar la experiencia y orientación necesarias en el desarrollo de este trabajo de grado que culmina exitosamente.

Gratitud especial, al ingeniero Jaime Rafael Obando como principal colaborador en este trabajo de grado, quien desde su experiencia y conocimiento direccionó la formulación y desarrollo del presente trabajo.

A aquellas empresas y laboratorios que brindaron su valiosa ayuda y pusieron a nuestra disposición insumos, equipos y personas para el desarrollo de este trabajo de grado.

Dedicatoria:

A Dios, por habernos permitido llegar hasta esta estancia, por guiar nuestro camino e iluminar nuestra mente llenándonos de paciencia y persistencia necesarias para alcanzar nuestras metas. Gracias por tu bondad, amor infinito y por ser nuestro soporte y compañía a lo largo de este proceso.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. OBJETIVOS.....	6
3.1. Objetivo General.....	6
3.2. Objetivos Específicos.....	6
4. MARCO TEÓRICO	7
4.1. Deformación Permanente.....	7
4.2. Los Productos Geosintéticos.....	13
4.3. Tipos de Geosintéticos.....	15
4.4. Creep.....	16
4.5. Antecedentes.....	19
4.5.1. Investigaciones en las cuales se utilizó geosintéticos para deformaciones permanentes. ..	19
5. METODOLOGÍA	36
5.1. Materiales utilizados.....	36
5.1.1. Agregado Pétreo.....	36
5.1.2. Cemento asfáltico.....	39
5.1.3. Mezcla asfáltica.	41
5.1.4. Riego de liga.	43
5.1.5. Geosintéticos.....	44
5.2. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de deformación.....	46
5.2.1. Compactador de rodillo de acero hidráulico.....	46
5.2.2. LWT (Load Wheel Tester).....	47
5.2.3. Elaboración de cuerpos de prueba.	48
5.2.4. Ensayo LWT (<i>Load Wheel Tester</i>).....	52
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
6.1. Deformación permanente de los cuerpos de prueba.....	55
6.2. Velocidad de deformación de los cuerpos de prueba.....	61
6.3. Análisis visual de los geosintéticos fallados.....	62

6.4. Análisis de resultados entre la presente investigación y la investigación de Mounes et al 2016.....	65
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
7.1. Conclusiones	68
7.2. Recomendaciones para futuras investigaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.	37
Tabla 2. Resultados de caracterización de agregado mineral	39
Tabla 3. Resultados de Caracterización Cemento Asfáltico.....	40
Tabla 4. Caracterización de emulsión asfáltica convencional CRR-1.....	43
Tabla 5. Resultados de caracterización de geosintéticos proporcionadas por fabricante	44
Tabla 6. Materiales Geosintéticos Empleados.....	46
Tabla 8. Deformación de los cuerpos de prueba.....	60

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. MD Curva Maestra a 21°C.....	12
Gráfica 2. RLPD tensión permanente acumulada a (a) 40 ° C, 20 psi y (b) comparación de la tensión permanente acumulada a 495 ciclos de carga RLPD (40 ° C y 20 psi)	13
Gráfica 3. Curva De Fluencia Del Concreto Asfáltico	17
Gráfica 4. Comparación entre un ciclo de carga y descarga sobre un asfalto en el DSR y la acción del tránsito sobre la mezcla asfáltica	18
Gráfica 5. Mediciones de profundidad de la huella a lo largo de la línea central (a) diferentes ciclos de carga (b) Perfil de la rutina final	22
Gráfica 6. Curvas de fluencia de mezclas probadas, incluyendo muestras reforzadas y la de control.....	24
Gráfica 7. Curvas de ahuellamiento, deformación en mm, en función de lo ciclos de carga ..	30
Gráfica 8. Resultados de velocidad de deformación de testigos de pavimentos ensayados en el equipo de rueda cargada.	20
Gráfica 9. Curvas de ahuellamiento, deformación en mm, en función del número de ciclos..	27
Gráfica 10. Deformación permanente en las secciones prueba.....	34
Gráfica 11. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.....	37
Gráfica 12. Curva reológica del cemento asfáltico	41
Gráfica 13. Deformación Plástica Muestra de Referencia	55
Gráfica 14. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 1	56
Gráfica 15. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 2.	57
Gráfica 16. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 3.	57
Gráfica 17. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 4.	58
Gráfica 18. Deformación Acumulada Versus Tiempo de Ensayo	59
Gráfica 19. Velocidad versus Deformación.	62
Gráfica 20. Comparación de resultados de este trabajo de grado y el trabajo de Mounes et al. 2016	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Deformaciones permanentes (Ahuellamiento)	7
Figura 2. Diferentes Causas de Ahuellamiento.....	8
Figura 3. Tipos de ahuellamiento.....	10
Figura 4. Esquema de deformaciones en el tiempo durante un proceso de carga y descarga	11
Figura 5. Deformación Permanente en Pavimento Asfáltico (profundidad de la huella 60mm aprox.) (Km 1903.1 – Región Karaganda, Kazakhstan.....	18
Figura 6. Patrón de carga cíclico colocado sobre el pavimento.....	25
Figura 7. Configuración del modelo físico para una estructura de pavimento de asfalto.....	26
Figura 8. Comparaciones entre las distribuciones de deformación máxima del pavimento asfáltico	28
Figura 9. Construcción de las secciones de prueba: (a) sección transversal de la carretera existente, (b) los puntos de referencia plan de clave para la medición de la deformación y (c) de sección transversal AA en sentido de la dirección.....	31
Figura 10. Determinación de la profundidad de la huella utilizando el método de referencia fijo	32
Figura 11. Comparación de deformaciones de los cuerpos de prueba in situ.....	33
Figura 12. Despiece cuerpo de prueba.....	50
Figura 13. Configuración cuerpo de prueba.	51
Figura 14. Deformación cuerpo de prueba	53
Figura 15. Perfil de deformación	54

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 . Disgregación Mezcla Asfáltica.	42
Fotografía 2 . Mezcla Asfáltica Suelta.....	42
Fotografía 3 . Cuarteo Mezcla Asfáltica.....	42
Fotografía 4 . Mezcla Asfáltica En Horno.	42
Fotografía 5 . Temperatura De Compactación Mezcla Asfáltica.....	42
Fotografía 3 . Cuarteo Mezcla Asfáltica.....	47
Fotografía 4 . Mezcla Asfáltica En Horno.	47
Fotografía 8 . Equipo De Ensayo Load Wheel Tester.	48
Fotografía 9 . Cuarteo Mezcla Asfáltica.....	49
Fotografía 10 . Peso Densidad Máxima Rice.....	49
Fotografía 11 . Muestra Para Un Cuerpo De Prueba.	49
Fotografía 12 . Conformación Primera Capa De Material Granular.....	49
Fotografía 13 . Colocación Geomalla.	50
Fotografía 14 . Conformación Segunda Capa De Material Granular	50
Fotografía 13 . Muestra Compactada.....	51
Fotografía 14 . Compactación De La Muestra.....	51
Fotografía 17 . Ensayo Lwt.....	53
Fotografía 18 . Muestras Durante El Ensayo.....	53
Fotografía 19 . Muestras Después Del Ensayo	53
Fotografía 20 . Muestras Después Del Ensayo.	53
Fotografía 22 . Estado Final Geomalla G1 Fibra De Vidrio.....	62
Fotografía 23 Estado Final Geomalla G2 Fibra De Vidrio.....	63
Fotografía 24. Estado Final Geomalla G3 Pet	64
Fotografía 25 . Estado Final Geomalla G4 Pet	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos con Letras Latinas

Abreviatura	Término	Unidad SI
DM	Ensayo Módulo dinámico	-
MDC-19	Mezcla densa en caliente de 19mm	-
Wi	Energía involucrada en la deformación	-
RLPD	Deformación permanente de carga repetida	-
HWTT	Ensayo rueda cargada de Hamburgo	-
DSR	Prueba del reómetro de corte dinámico	-
PE	Polietileno	-
PEMBD	Polietileno de muy baja densidad	-
PEMD	Polietileno de media densidad	-
PEAD	Polietileno de alta densidad	-
EPS	Poliestireno expandido	-
PP	Polipropileno	-
PVC	Policloruro de vinilo	-
PET	Poliéster	-
PS	Poliestireno	-
PA	Poliamida	-
MMLS3	Ensayo acelerado con un modelo a escala de simulador móvil	-
NPNO	Pavimento nuevo no reforzado	-
NPGG	Pavimento nuevo reforzado con geomalla	-

Abreviatura	Término	Unidad SI
NPGT	Pavimento nuevo reforzado con geo compuesto	-
DMGGGT	Pavimento con asfalto modificado reforzada con geomalla y geocompuesto.	-
DMNO	Pavimento con asfalto modificado sin geo sintético.	-
DMGT	Pavimento con asfalto modificado reforzado con geocompuesto.	-
DMGG	Pavimento con asfalto modificado reforzada con geomalla.	-
CRR-1	Emulsión catiónica de rotura rápida	-
PLC	Controlador lógico programable	-
HMI	Interfaz hombre - maquina	-
LWT	Prueba de rueda cargada	-

Símbolos con Letras Griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α	Coefficiente de deslizamiento	—
Δu	Desplazamiento relativo entre superficies	m
ε_t	Deformación unitaria por tracción	—
γ	Deformación unitaria tangencial	—
$\mu\varepsilon$	Deformación unitaria $\times 10^{-6}$	—
ν	Relación de Poisson	—
τ	Esfuerzo cortante	Pa

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society of Testing Materials
G1	Geomalla tipo 1
G2	Geomalla tipo 2
G3	Geomalla tipo 3
G4	Geomalla tipo 4
INV	Instituto Nacional de Vías
J5	Rigidez al 5% de deformación
LWT	Load Wheel Tester
PET	Poliéster
RPM	Revoluciones por minuto
SL	Sentido Longitudinal
ST	Sentido transversal
VD	Velocidad de deformación
c_c	Coefficiente de curvatura
c_u	Coefficiente de uniformidad

RESUMEN

Los pavimentos asfálticos de acuerdo al tipo de solicitud de carga y temperatura empiezan a presentar diferentes deformaciones, las cuales pueden ser recuperables y/o permanentes, siendo las deformaciones permanentes las de mayor incidencia en el funcionamiento normal de una superficie de pavimento pudiendo afectar la estabilidad y la seguridad del usuario. Frente a estas deformaciones permanentes se han tomado varias medidas para mitigarlas como lo son: implementar concreto rígido, aumentar los módulos de las capas asfálticas utilizando asfaltos modificados y reforzar las capas asfálticas con geosintético; en la última se implementa la tecnología de los geosintético en la carpeta de cemento asfáltico.

Las capas asfálticas se han reforzado con geosintéticos generalmente, buscando solo prevenir o mitigar el efecto de la refracción de grietas o fisuras provenientes de capas inferiores, se han hecho algunos estudios experimentales en los cuales se ha evaluado el aporte del refuerzo geosintético frente a la deformación permanente. En la investigación de Mounes et al. (2016), se evidenció una reducción de la deformación permanente dentro de la carpeta asfáltica, reforzada con geosintéticos probablemente debido a una mejor distribución de las fuerzas de tracción y un mayor confinamiento lateral proporcionadas por las geomallas. Es importante mencionar que una mezcla asfáltica convencional cuando está sometida a altas temperaturas y cargas constantes es muy factible que se presenten deformaciones permanentes, situación que afecta su correcta funcionalidad; esto amerita la búsqueda de opciones para mejorar la resistencia a este fenómeno presentado en pavimentos asfálticos. De acuerdo a lo mencionado se tiene como propósito de este trabajo determinar el aporte de cuatro tipos diferentes de geosintéticos instalados en la mitad de la capa asfáltica, para ello se elaborarán varios cuerpos de prueba con igual espesor, con igual tipo de mezcla, pero variando el refuerzo instalado dentro de la capa asfáltica; estos cuerpos

de prueba se someterán al ensayo de deformación permanente en rueda de Hamburgo para luego hacer el respectivo análisis de los resultados obtenidos.

Palabras Clave: Deformación permanente, capa asfáltica, geosintético, rueda de Hamburgo.

ABSTRACT

The asphalt pavements, according to the type of load solicitation and temperature, start to present different deformations, which can be recoverable and / or permanent, being the permanent deformations those of greater incidence in the normal operation of a pavement surface being able to affect the stability and safety of the user. Faced with these permanent deformations, several measures have been taken to mitigate them, such as: implement rigid concrete, increase the modules of the asphalt layers using modified asphalts and reinforce the asphalt layers with geosynthetic; in the last one, the geosynthetic technology is implemented in the asphalt cement folder.

The asphalt layers have been reinforced with geosynthetics generally, seeking only to prevent or mitigate the effect of the refraction of cracks or fissures coming from lower layers. Some experimental studies have been made in which the contribution of geosynthetic reinforcement to permanent deformation has been evaluated. In the investigation of (Mounes et al., 2016), a reduction of the permanent deformation inside the asphalt folder was evidenced, reinforced with geosynthetics probably due to a better distribution of the tensile forces and a greater lateral confinement provided by the geogrids. It is important to mention that a conventional asphalt mixture when subjected to high temperatures and constant loads is very likely to present permanent deformations, a situation that affects its correct functionality; this merits the search of options to improve the resistance to this phenomenon presented in asphalt pavements. According to the mentioned, the purpose of this work is to determine the contribution of four different types of geosynthetics installed in the middle of the asphalt layer, for which several test bodies with the same thickness will be elaborated, with the same type of mixture, but with varying the reinforcement installed inside the asphalt layer; These test bodies will be subjected to the permanent deformation test in Hamburg wheel and then the respective analysis of the results obtained.

Key words: Permanent deformation, asphalt layer, geosynthetic, Hamburg wheel.

INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos desde el inicio de su vida útil y dependiendo del tipo de solicitud de carga y temperatura, empiezan a presentar diferentes deformaciones que pueden ser permanentes o recuperables; las deformaciones permanentes tienen más incidencia en el correcto funcionamiento del pavimento y pueden afectar la estabilidad y la seguridad del usuario. Frente a estas deformaciones permanentes se han tomado varias medidas para mitigarlas como lo son: implementar concreto rígido, aumentar los módulos de las capas asfálticas utilizando asfaltos modificados y reforzar las capas asfálticas con geosintéticos; en esta última se implementa la tecnología de los geosintéticos en la carpeta de cemento asfáltico, esta práctica se ha venido utilizando en materiales granulares como bases, sub bases y carpetas asfálticas.

En las carpetas asfálticas se ha utilizado generalmente los geosintéticos con el propósito de prevenir o mitigar el efecto de la refracción de grietas o fisuras provenientes de capas inferiores. Con los resultados obtenidos en la investigación de Mounes, et al. (2016) instalando refuerzo, se evidenció una reducción de la deformación permanente dentro de en la carpeta asfáltica, probablemente debido a las fuerzas de tracción y confinamiento lateral proporcionadas por las geomallas.

Es importante mencionar que en una mezcla asfáltica convencional cuando está sometida a altas temperaturas y cargas constantes es muy factible que se presenten deformaciones permanentes, situación que afecta su correcta funcionalidad; esto amerita la búsqueda de opciones para mejorar la resistencia a este fenómeno presentado en pavimentos asfálticos. De acuerdo a lo mencionado se tiene como propósito de esta investigación determinar la ubicación óptima de un refuerzo dentro de la carpeta asfáltica, para ello se elaborarán varios cuerpos de prueba con igual espesor, pero con el refuerzo instalado en diferentes posiciones dentro de la capa de asfalto; estos cuerpos de prueba

se evaluarán mediante el ensayo de deformación permanente para luego hacer el respectivo análisis de los resultados obtenidos.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ingeniería de pavimentos en Colombia carece de criterios técnicos que permitan la escogencia e instalación de un determinado geosintético para usarse dentro de una carpeta asfáltica y mejorar así algunas de sus diferentes propiedades. El no tener claridad sobre el uso de los geosintéticos obliga al ingeniero de pavimentos a tomar decisiones no acertadas que podrían afectar el factor económico y la estabilidad del pavimento.

En la investigación hecha por Correia (2014) menciona las mejoras adicionales que se pueden obtener al reforzar una capa asfáltica con geosintéticos; beneficios que actualmente han sido ignorados, la autora también indica:

No existe una metodología de diseño bien establecido para esta aplicación o un enfoque unificado para la construcción. Actualmente, la selección del tipo apropiado de geosintético y su posición dentro de la capa de pavimento se basa en criterios empíricos o a veces definidos a partir de los resultados de las pruebas de laboratorio (p.17).

Otros autores (Austin y Gilchrist ,1996; Correia, 2016; Mounes et al., 2016) indican que los pavimentos reforzados ya sea con una geomalla o un compuesto de geomalla han demostrado mejorar considerablemente su comportamiento con respecto a la deformación permanente.

De acuerdo a los avances e investigaciones hechas acerca de la implementación de geosintéticos como refuerzo de una capa asfáltica, se plantea ampliar el campo del conocimiento, en cuanto a la correcta implementación de los geosintéticos para mitigar el fenómeno de deformación permanente.

2. JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería de los pavimentos asfálticos multicapas se ha venido implementando la utilización de los geosintéticos cada vez con más frecuencia, con el objetivo de mejorar diferentes cualidades de los materiales que componen la estructura; el uso de esta tecnología en nuestro medio es novedosa y se cuenta con poca información acerca de su correcta implementación. Es por ello que algunos ingenieros ven con precaución y desconfianza el uso de este método dentro de las capas del pavimento.

Por ser una tecnología en crecimiento vemos la necesidad de contribuir al correcto uso que se le podría dar a un refuerzo con geosintéticos dentro de una capa asfáltica ante las deformaciones permanentes, con ello se pretende tener la información suficiente para recomendar, o no, el uso del geosintético en lugares donde se pueda presentar esta situación que afecta los pavimentos, generalmente en condiciones críticas de carga y temperatura.

Existen algunas investigaciones donde afirman que:

Aplicaciones prácticas y estudios teóricos han indicado que la vida útil de los pavimentos flexibles se puede extender mediante la instalación de geotextiles no tejidos o geomallas entre capas de asfalto existentes y nuevas debido a las propiedades mecánicas mejoradas de los pavimentos en cuanto a fatiga, rutting y resistencia a la refracción de fisuras provenientes de capas inferiores (Lytton, 1989, Saraf et al., 1996, Austin y Gilchrist, 1996, Button y Lytton, 2007, Khodaii et al. 2009, Pasquini et al., 2013 Citado por Correia, 2016).

La contribución que se pretende dar, se centra en tratar de mitigar el fenómeno de deformación permanente mediante el uso de geomallas dentro de las mezclas asfálticas; se evaluará mediante el ensayo *creep* dinámico los cuerpos de prueba de mezcla asfáltica sin refuerzo y reforzados con geomallas instaladas en diferentes posiciones del espesor; con estos resultados poder determinar

la capacidad a deformación permanente de los cuerpos de prueba y hacer el respectivo análisis de resultados.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Evaluar los efectos en la deformación permanente de mezclas asfálticas tipo MDC - 19 con y sin la presencia de geosintético a través del ensayo rueda de Hamburgo.

3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los cambios en la deformación permanente de mezclas asfálticas con y sin la presencia de geosintético mediante el ensayo rueda de Hamburgo.
- Analizar el efecto generado por las propiedades mecánicas y físicas del geosintético en la deformación permanente de las mezclas asfálticas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Deformación Permanente

Este parámetro en las mezclas asfálticas se refiere a un valor de deformación no recuperable e indica el desempeño de una capa asfáltica específica que está sometida a un estado de esfuerzos y deformaciones determinadas por las condiciones críticas de trabajo; la deformación permanente afecta directamente la capa de rodadura mediante la aparición de fisuras en el sentido de rodaje de los vehículos, deformaciones no recuperables o ahuellamiento en la capa asfáltica. Este fenómeno se caracteriza por un desplazamiento lateral a lo largo de la trayectoria de los vehículos en la superficie de la capa, genera una depresión en el área donde pasan las ruedas, estas depresiones pueden afectar la comodidad y seguridad del usuario, se puede generar hidropneumático con la presencia de lluvias (Bertulienė et al, 2011).

El ahuellamiento o deformación permanente es un tipo de deterioro que se produce en consecuencia de la huella de circulación de los vehículos con cada aplicación de carga y está representada por la acumulación de deformaciones verticales que son irreversibles. Este tipo de falla es posible darse por los efectos combinados de elevadas cargas de tránsito y elevada temperatura (Delbono y Rebollo, 2017). (Ver Figura 1).



Figura 1. Deformaciones permanentes (Ahuellamiento)

Fuente: Modificado de Delbono y Rebolledo (2017)

La deformación permanente en capas asfálticas está relacionada a los siguientes factores: densificación en la mezcla asfáltica, acción de las cargas debido al tránsito y la acción del clima, la combinación de estos factores determina la resistencia de esta mezcla a la deformación permanente (Angelone et al, 2006).

Las deformaciones verticales (ahuellamiento) en un pavimento generalmente se producen por la deformación en las bases, la subrasante y/o deformación de la propia carpeta asfáltica (Delbono y Rebollo, 2017). (Ver Figura 2).

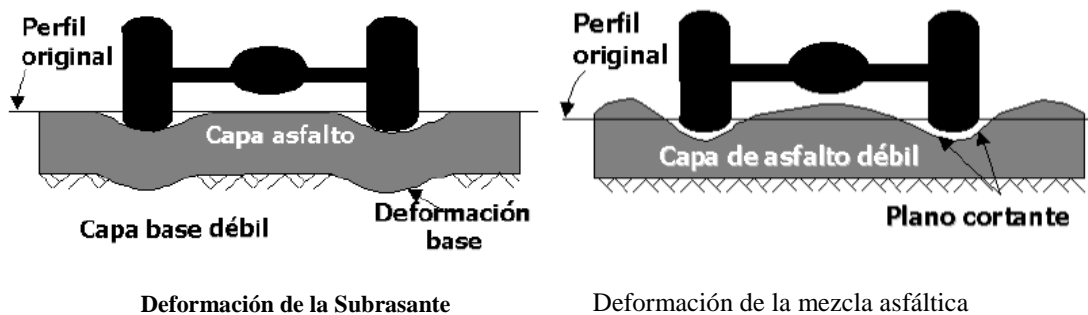


Figura 2. Diferentes Causas de Ahuellamiento

Fuente: Modificado de Delbono y Rebollo (2017)

Existen formas de cuantificar esas deformaciones, una de ellas es implementando las ecuaciones constitutivas con las se puede predecir estas deformaciones, ecuaciones que se deben alimentar de diversas fuentes como:

1. Pistas de ensayo a escala real con equipos especiales que simulen el tránsito o tramos de prueba.
2. Análisis y procesamiento de resultados de ensayos hechos en laboratorio.
3. Seguimiento de las deformaciones en un tramo de vía en servicio con cargas reales.

Los ensayos de laboratorio tratan de reproducir lo mejor posible las condiciones de solicitaciones in situ, e incluyen generalmente distintas posibilidades de ensayo de las muestras

bajo diferentes estados de tensiones, temperatura, humedad, etc. Entre los más utilizados se encuentran: (Angelone et al, 2006)

- Ensayo de *creep* en compresión axial y triaxial
- Ensayo de *creep* en compresión axial y triaxial con carga pulsante
- Ensayo en compresión axial con carga dinámica
- Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga pulsante
- Ensayo de corte simple
- Ensayos de rueda cargada o Wheel-tracking test (Angelone et al, 2006).

En el trabajo hecho por Morea (2011) afirma que:

El ahuellamiento se debe a la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas. Este tipo de ahuellamiento es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida, Figura 3. A veces el ahuellamiento ocurre en una capa superficial débil. En otros casos, la capa superficial no es en sí misma propensa al ahuellamiento, pero acompaña la deformación de una capa asfáltica inferior más débil. Las deformaciones permanentes se producen primero con un cambio de volumen debido a la compactación por el paso del tránsito; luego se producen deformaciones a volumen constante por flujo de la mezcla. Finalmente, se produce un tercer estado denominado tercer flujo en el cual la mezcla pierde la capacidad de tomar carga y se deforma rápidamente, este proceso está asociado con cambios de volumen en la mezcla asfáltica (p.8).

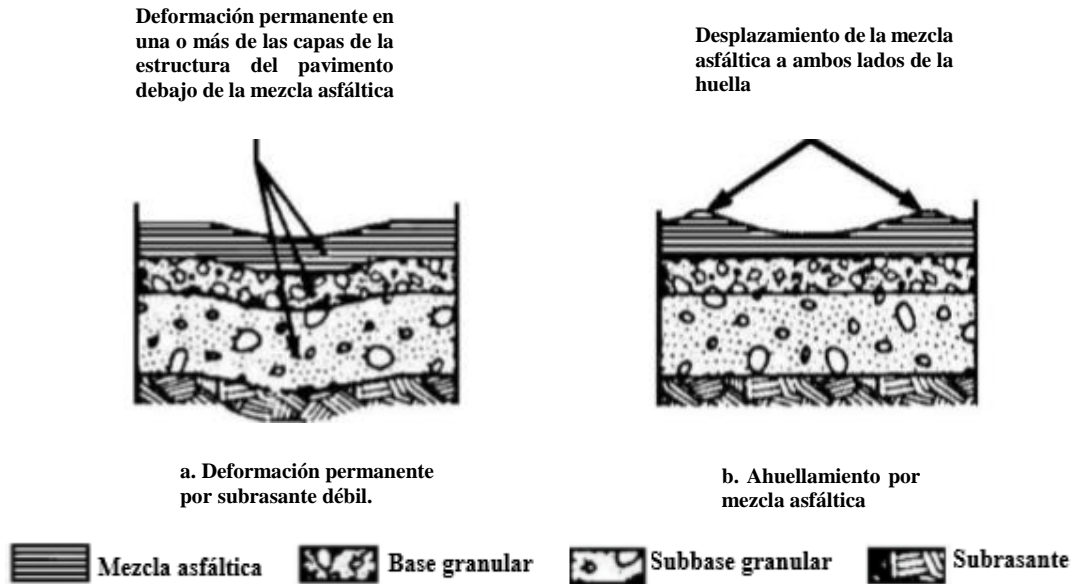


Figura 3. Tipos de ahuellamiento

Fuente: Modificado de Morea (2011)

Como se puede observar en la Figura 3, el perfil transversal es diferente en cada caso. Cuando la deformación proviene de la subrasante debilita la mezcla asfáltica acompañando dicha deformación; por otra parte, cuando la deformación es debida a la carpeta asfáltica, se produce una falla de corte de la carpeta asfáltica.

Morea (2011), afirma que las deformaciones del ligante pueden dividirse en tres componentes: una deformación elástica, una deformación visco elástica retardada y una deformación viscosa pura. A cada una de estas deformaciones se les puede asociar una energía. Por tanto, la energía involucrada en el proceso de deformación (W_i) tendrá una componente elástica, una viscoelástica retardada y una viscosa pura. La magnitud de la energía viscoelástica retardada depende del tiempo de aplicación de la carga y de relajación que disponga el material para recuperar la deformación, mientras que la parte viscosa es la energía que contribuye a las deformaciones permanentes de la mezcla, la cual se disipa y es irrecuperable (Ver Figura 4).

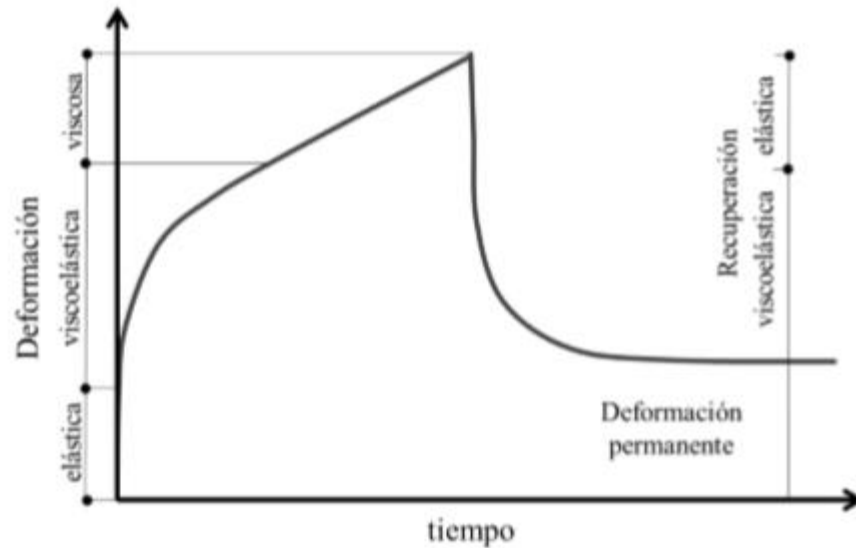
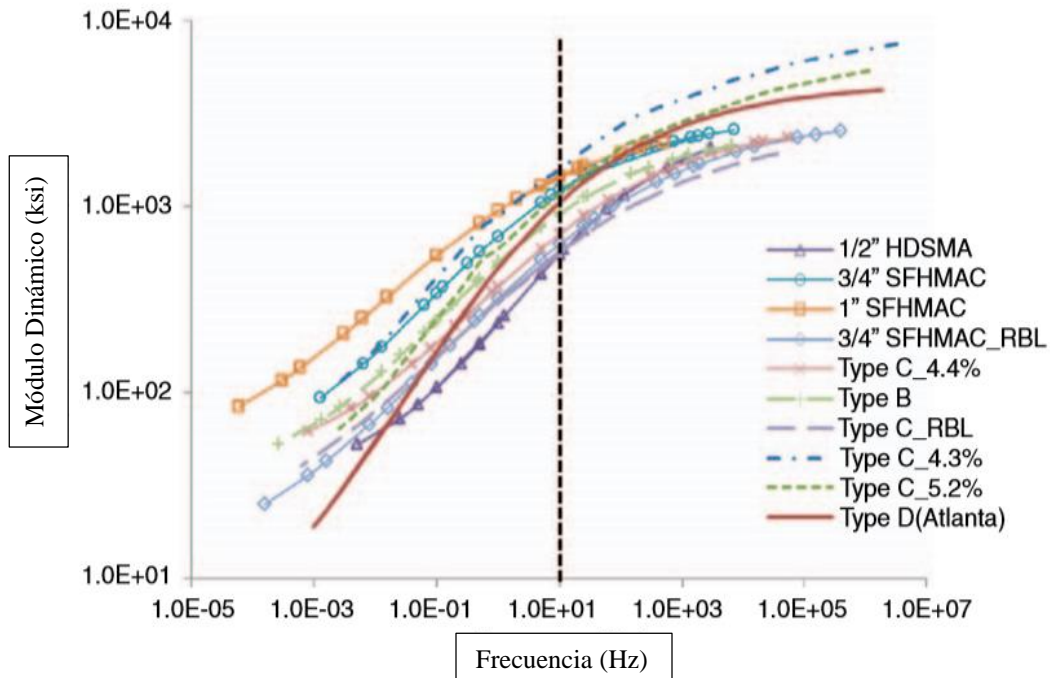


Figura 4. Esquema de deformaciones en el tiempo durante un proceso de carga y descarga

Fuente: Modificado de Morea (2011)

Lubinda et al. (2012) llevaron a cabo una investigación acerca de la correlación entre los métodos de ensayo, DM (Módulo dinámico), RLPD (Deformación permanente de carga repetida) y HWTT (ensayo rueda de Hamburgo), indicaron que los valores altos del Módulo Dinámico indicaron alta resistencia a la deformación permanente del ensayo RPLD, lo cual fue consistente con los resultados de HWTT. La prueba de Rueda de Hamburgo HWTT parece ser el más adecuado para el diseño de mezclas asfálticas, ya que los resultados de muestras de laboratorio y muestras de campo son cercanos, mientras que las pruebas de DM y RLPD indicaron resultados para un mayor potencial de la caracterización de la mezcla asfáltica como el módulo y resultados para el diseño estructural del pavimento.

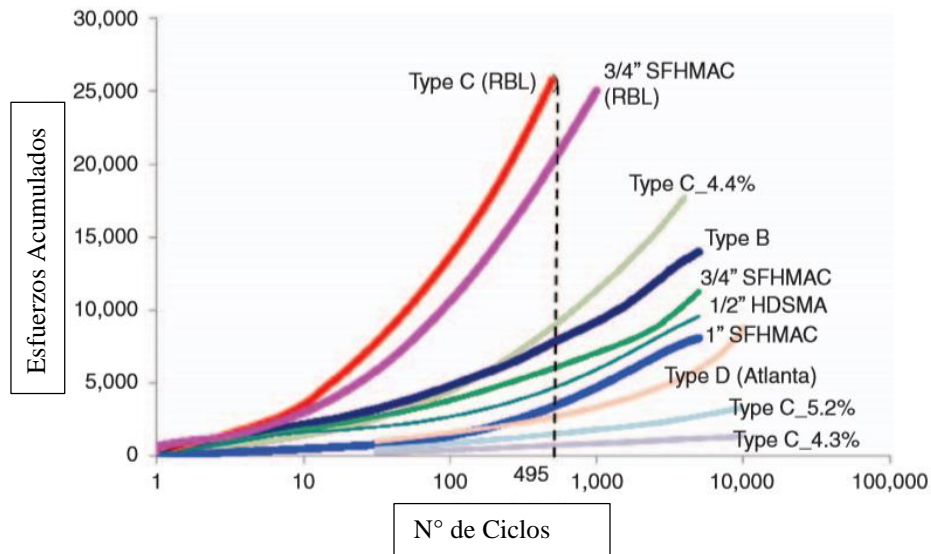
A continuación, se muestra gráficamente los resultados de cada uno de los ensayos para el módulo dinámico se puede evidenciar que la prueba de módulo dinámico no confinado no es apropiada para medir la resistencia a la deformación permanente, en las mezclas asfálticas en caliente (Ver Gráfica 1).



Gráfica 1. MD Curva Maestra a 21°C

Fuente: Modificado Lubinda et al, (2012)

Para el ensayo RLPD (carga repetida ensayos de deformación), los resultados arrojaron que la mezcla tipo C4.3 es más resistente a la deformación permanente que mezcla Tipo C5.2, lo cual es coherente con los resultados reportados en la Prueba DM (Módulo dinámico). Véase la Gráfica N° 2 RLPD tensión permanente acumulada a (a) 40 ° C, 20 psi y (b) comparación de la tensión permanente acumulada a 495 ciclos de carga RLPD (40 ° C y 20 psi).



Gráfica 2. RLPD tensión permanente acumulada a (a) 40 ° C, 20 psi y (b) comparación de la tensión permanente acumulada a 495 ciclos de carga RLPD (40 ° C y 20 psi)

Fuente: Modificado Lubinda et al. (2012)

En la Gráfica 2, se representa los resultados de la deformación permannente con el ensayo de HWTT (Rueda de Hamburgo), los cuales tienen coherencia con los ensayos de MD y RLPD.

4.2. Los Productos Geosintéticos

Los productos geosintéticos se han utilizado en diferentes campos de la ingeniería civil como elementos de refuerzo, filtración drenaje, protección, control de permeabilidad y otras funciones. Sus principales componentes como materia prima son polímeros sintéticos o naturales.

Dentro de la ingeniería de pavimentos es más común el uso de los geosintéticos ya sea en la rehabilitación o construcción de pavimentos asfálticos multicapa, vale anotar que el comportamiento de estos geosintéticos depende de varias variables según el uso al cuál se quiera destinar el material como son: sus propiedades intrínsecas, la función para lo cual está diseñado, modo de instalación, características ambientales y entorno de aplicación.

Las materias primas utilizadas en la fabricación de geosintéticos se dividen en dos grupos: Naturales y químicos. En cuanto a materias primas naturales pueden ser de origen vegetal y animal,

las materias primas químicas se dividen en orgánicas (Polímeros naturales transformados en polímeros sintéticos) e inorgánicas (minerales como vidrio y metales) (López y López, 2010 Citado por Obando, 2016).

Los materiales más utilizados en la fabricación de geosintéticos son tipo de sintético orgánico obtenido a partir de la destilación del petróleo. Los materiales sintéticos orgánicos se clasifican en dos tipos: termoplásticos y termorígidos. Los termoplásticos pueden ablandar y endurecer por calentamiento y enfriamiento respectivamente. Ya los termorígidos cuando endurecen, partiendo del estado de fusión, no se pueden ablandar de nuevo por la acción del calor. Los termoplásticos son los más utilizados en la fabricación de los geosintéticos y las propiedades de estos materiales dependen de su estructura, los aditivos empleados en los procesos de fabricación (López y López, 2010 Citado por Obando, 2016).

Los geosintéticos están constituidos principalmente por polímeros y aditivos; Los aditivos tienen como función producir mejoras en los procesos de fabricación o modificar aspectos del comportamiento básico del polímero. Los polímeros resultan del encadenamiento de átomos de carbono, formando una cadena carbónica asociada o no a grupos funcionales, estructurados a partir de pequeñas unidades de repetición denominadas monómeros. (Lotti y Bueno, 2015 Citado por Obando, 2016).

Los principales polímeros utilizados en la fabricación de los geosintéticos son: polietileno (PE) Polietileno de muy baja densidad (PEMBD), polietileno de media densidad (PEMD) y polietileno de alta densidad (PEAD), poliestireno expandido (EPS), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliéster (PET), poliestireno (PS) y poliamida (PA). (Shukla, 2002 Citado por Obando, 2016).

4.3. Tipos de Geosintéticos

➤ **Geomallas.**

Estos elementos están constituidos por una malla abierta y regular ^{de} elementos resistentes a la tracción, pudiendo estar fabricados por láminas perforadas o tejidos ligados por procesos térmicos. Las geomallas son plásticos con una configuración de mallas abiertas, es decir tiene aberturas grandes su principal función es el refuerzo de suelos. Existen dos tipos de geomallas, las orientadas uní y biaxialmente, cada tipo comienza como una lámina de geomembrana que tiene un modelo controlado y uniforme de agujeros prepunzonados; los productos uniaxialmente desarrollados son utilizados donde es conocida la dirección principal de los esfuerzos, y los productos biaxiales son utilizados donde los esfuerzos son esencialmente aleatorios (Ricci, 2011).

Las geomallas son producidas específicamente para reforzar el suelo. La forma de actuar con el material granular o las mezclas asfálticas, es confinándolo y limitando sus desplazamientos laterales de esta manera se aumenta la resistencia al corte. La compactación del suelo, o la mezcla asfáltica, produce un intertrabado suelo – geomalla por lo que se obtiene un alto nivel de resistencia a la tracción (Pavco, 2012).

➤ **Geomalla de Fibra de Vidrio.**

Estas estructuras son utilizadas entre capas de concreto asfáltico con el fin de controlar agrietamientos por flexión, fatiga y deformaciones plásticas. Su principal función consiste en aumentar su resistencia a la tracción de la capa asfáltica y la distribución uniforme de los esfuerzos horizontales en la superficie.

La geomalla de fibra de vidrio presenta un alto módulo de elasticidad, es un material fácil de reciclar debido a que la fibra es de origen mineral compuesto por arenas de cuarzo y su punto de fusión esta entre 800°C y 850 °C lo que permite el trabajo con mezclas asfálticas (Pavco, 2012).

En este trabajo se evaluará y comparará la deformación permanente en capas asfálticas reforzadas con geosintéticos; los cuales serán instalados en diferentes posiciones de la capa. El comportamiento de este refuerzo ha sido estudiado en el trabajo de Bertuliene et al. (2011) donde se afirma:

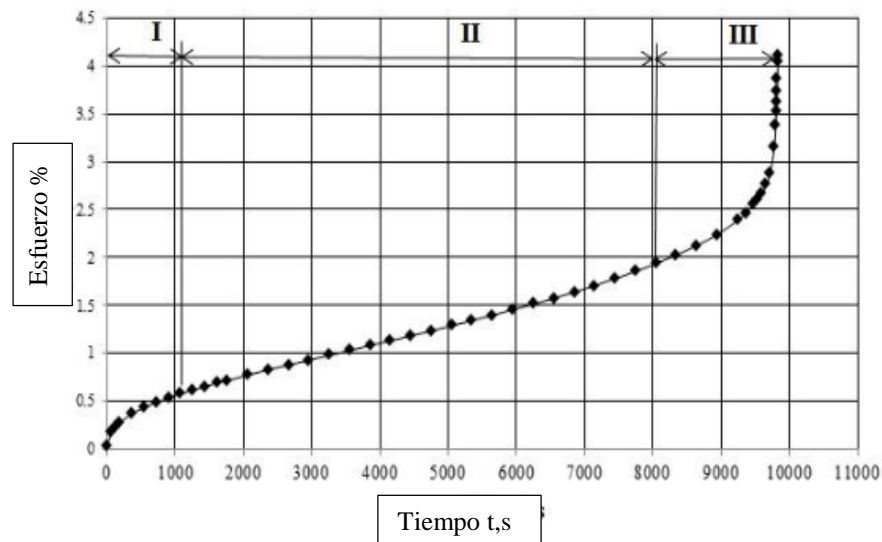
Los materiales geosintéticos son poco sensibles a las variaciones de temperatura, normalmente son usados para reforzar hormigón asfáltico; se producen a partir de poliéster o material polimérico con fibra de vidrio. El módulo de elasticidad de poliéster comienza a disminuir con temperaturas superiores a de 220 ° C, y la fibra de vidrio con temperaturas superiores a 800 ° C. El comportamiento de estos materiales a temperaturas inferiores es como el de un cuerpo elástico. La capa de concreto asfáltico se deforma hasta un límite cuando los materiales mencionados se involucren en el funcionamiento del sistema, se evidencia que las deformaciones posteriores dejan de aumentar (p.3).

4.4. Creep

El creep en mezclas asfálticas es un fenómeno de deformación o tendencia a fluir, altamente dependiente de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga; por ser un material visco elástico tiene tres etapas de deformación desde el inicio de carga hasta llegar al momento del fallo (Iskakbayev et al, 2017).

La Curva de fluencia de hormigón asfáltico como la mayoría de materiales visco elásticos – tiene tres etapas características: como se muestra en la Gráfica 3. Curva De Fluencia Del Concreto Asfáltico.

Etapa I La fluencia del estado inestable con tasa decreciente; Etapa II de fluencia en estado estacionario con una velocidad de deformación constante (mínima); Y la etapa III de fluencia de aceleración con una velocidad creciente que precede al fallo (Iskakbayev et al, 2017)



Gráfica 3. Curva De Fluencia Del Concreto Asfáltico

Fuente: Modificado, Iskakbayev et al, 2017.

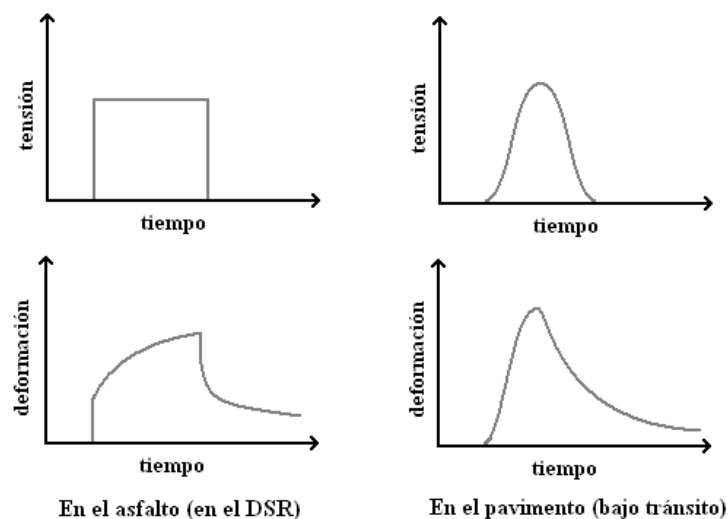
De acuerdo al modelo encontrado en esta investigación en cuanto la etapa II de Fluencia de estado estacionario se consideró que se pueden establecer problemas actuales en cuanto deformación permanente y resolverlos. A continuación, en la Figura 5. se puede observar como la deformación permanente afecta la seguridad y el servicio a los usuarios.



Figura 5. Deformación Permanente en Pavimento Asfáltico (profundidad de la huella 60mm aprox.) (Km 1903.1 – Región Karaganda, Kazakhstan)

Fuente: Modificado, Iskakbayev et al. (2017)

En la investigación de Morea (2011), se realizó el ensayo de creep repetido que se basa en el comportamiento de las cargas cíclicas que ejerce el tránsito sobre el pavimento. A continuación en la Gráfica 4 se muestra la comparación como en un ciclo de carga y descarga sobre el asfalto en el ensayo es similar a la acción del tránsito en la mezcla asfáltica. Este ensayo permite medir la respuesta del ligante frente a la acumulación de deformaciones permanentes, evaluando al mismo tiempo la respuesta elástica del material mismo (Morea, 2011).



Gráfica 4. Comparación entre un ciclo de carga y descarga sobre un asfalto en el DSR y la acción del tránsito sobre la mezcla asfáltica

Fuente: Modificado por Morea (2011)

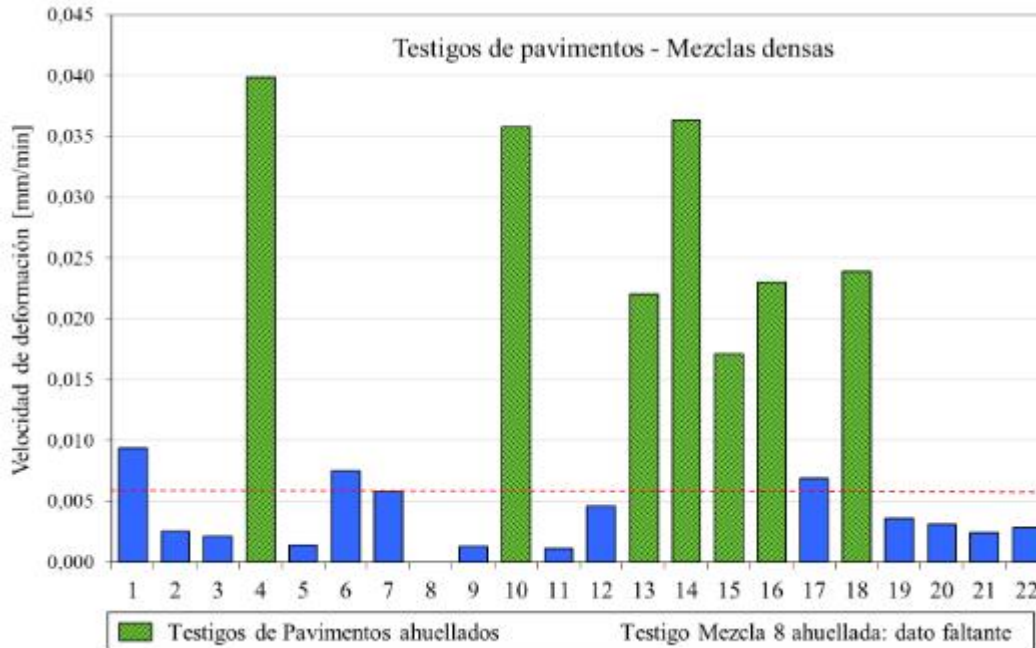
4.5. Antecedentes

4.5.1. Investigaciones en las cuales se utilizó geosintéticos para deformaciones permanentes.

Algunos investigadores han trabajado con capas asfálticas reforzadas con geomallas con el propósito de encontrar un beneficio adicional frente a deformaciones permanentes, entre los cuales se mencionan los siguientes trabajos:

Laurinavičius y Oginskas (2006), En Lituania en la Universidad Técnica de Vilnius, se evaluó la influencia de los materiales geosintéticos en el fenómeno de deformaciones permanentes, para esto se llevó a cabo un tramo de prueba en la cual se construyó un pavimento flexible con capas de material granular y tres capas asfálticas las cuales fueron consideradas de la siguiente manera; una capa superior de desgaste de cuatro (4) cm, una intermedia de cinco (5) cm y una capa inferior de seis (6)cm; El material geosintético se instaló entre la capa de rodadura y la capa intermedia. Esta investigación experimental mostró un efecto positivo de los materiales geosintéticos en la formación y desarrollo de las deformaciones no recuperables, es decir, la profundidad de estas deformaciones en las secciones de carretera reforzadas con materiales geosintéticos es inferior a la de la sección de referencia 1, 4 veces.

Agnusdei y otros (2007a) citado por Morea (2011), establecieron un número de formaciones permanentes para el ensayo de rueda cargada en base a ensayos sobre testigos tomados de diferentes rutas. Este límite es válido para el equipo de rueda cargada de 520 N y una temperatura 60°C, donde se definen estándares de buen comportamiento de mezclas asfálticas densas. En la Gráfica 5, se relaciona los resultados del parámetro de velocidad de deformación para 12 min obtenido a partir de los ensayos. Los resultados arrojaron el límite de velocidad de deformación para un nivel de confianza de 95%, con un valor de 0.0052 mm/min.



Gráfica 5. Resultados de velocidad de deformación de testigos de pavimentos ensayados en el equipo de rueda cargada.

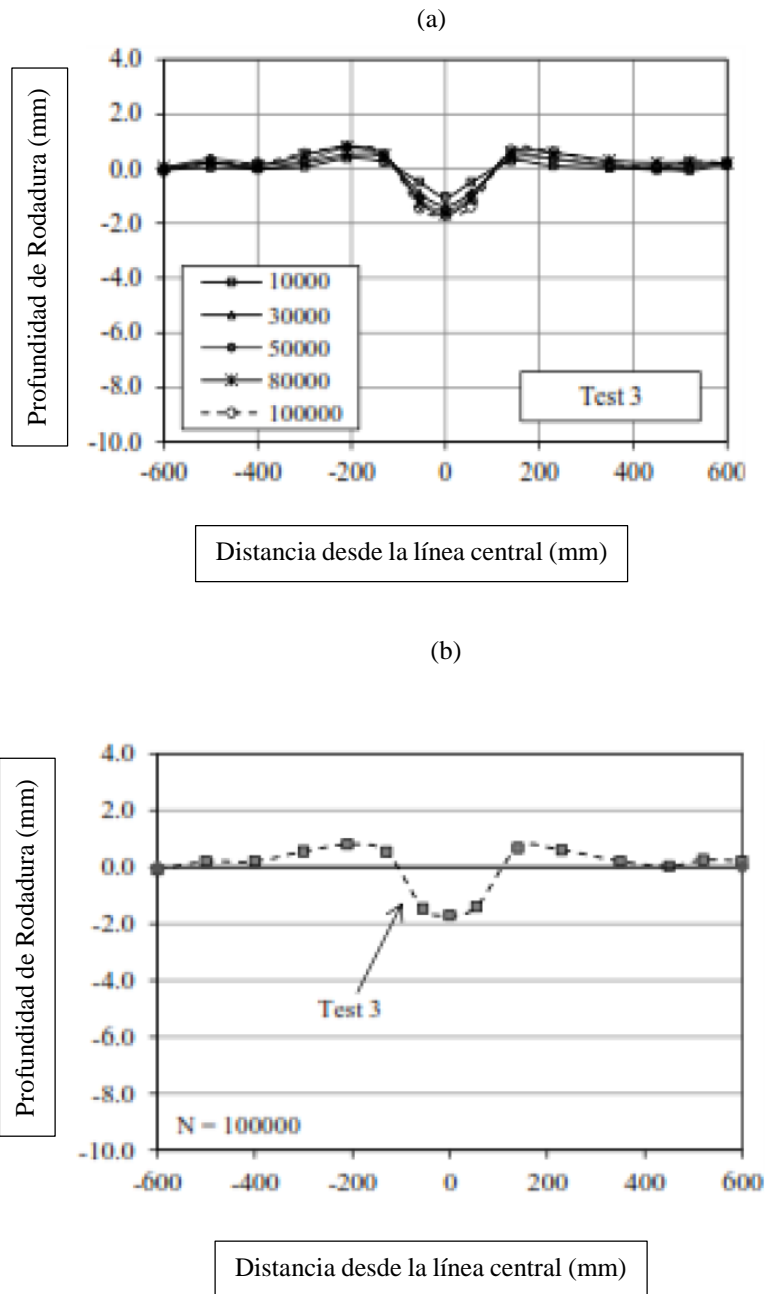
Fuente: Modificado por Morea (2011)

Lee et al. (2013). En USA en la División de Investigación y Desarrollo del Departamento de Transporte de Indiana; realizaron una investigación en la cual se evaluó el desempeño de las mezclas de asfálticas reforzadas con geo sintéticos, la cual tenía como objetivo estimar el comportamiento de una geomalla de fibra de vidrio instalada en el tercio superior de una capa asfáltica; se fabricaron muestras con dimensiones de (559 mm) de ancho, (1473 mm) de largo y (114 mm) de espesor, las cuáles se llevarían al laboratorio para determinar su resistencia a la deformación permanente implementando el ensayo acelerado con un modelo a escala de simulador móvil (MMLS3) “MMLS3 es un dispositivo de prueba de pavimento a escala reducida que se ha utilizado con éxito para evaluar el comportamiento de las propiedades de pavimentos asfáltico. Consiste en simular de carga de un vehículo unidireccional que utiliza un eje continuo” (p.897).

De acuerdo al anterior se evidencio el efecto positivo del refuerzo de geomalla en la reducción de la deformación permanente.

Correia (2014). En Brasil en la Universidad de Sao Paulo, evaluó los beneficios de refuerzo de las geomallas colocadas en las capas de asfalto dentro del comportamiento estructural de los pavimentos flexibles. Además, investigó la respuesta de tensión-deformación de las geomallas en condiciones de tráfico, representadas por cargas de ruedas móviles cíclicas. Los resultados mostraron que el refuerzo de geomalla polimérica redujo efectivamente la formación de huellas o ahuellamiento en más de cuatro veces. Se encontró que las diferencias entre las secciones reforzadas con geomalla y las no reforzadas eran más pronunciadas cuando se comparaban con las tensiones de deformaciones recuperables que cuando se evaluaba la respuesta de tensión y deformación permanente, lo que contribuía a un daño por fatiga menos acumulativo. Adicionalmente indica que el tiempo de vida de una sección de pavimento flexible reforzado con geomalla con espesor de base reducido comparable al de una capa de asfalto no reforzado con doble espesor de base, presenta un comportamiento similar en términos de tasa de funcionamiento en el tiempo, medición de zona de deflexión y esfuerzo dinámico en capas de pavimento. Lo cual indica que beneficios se pueden tener al reforzar con geomallas una sección de pavimento flexible.

En la Gráfica 6, se muestra el resultado de deformaciones permanentes, en la cual se ven representados los perfiles en diferentes ciclos de carga.



Gráfica 6. Mediciones de profundidad de la huella a lo largo de la línea central (a) diferentes ciclos de carga (b)

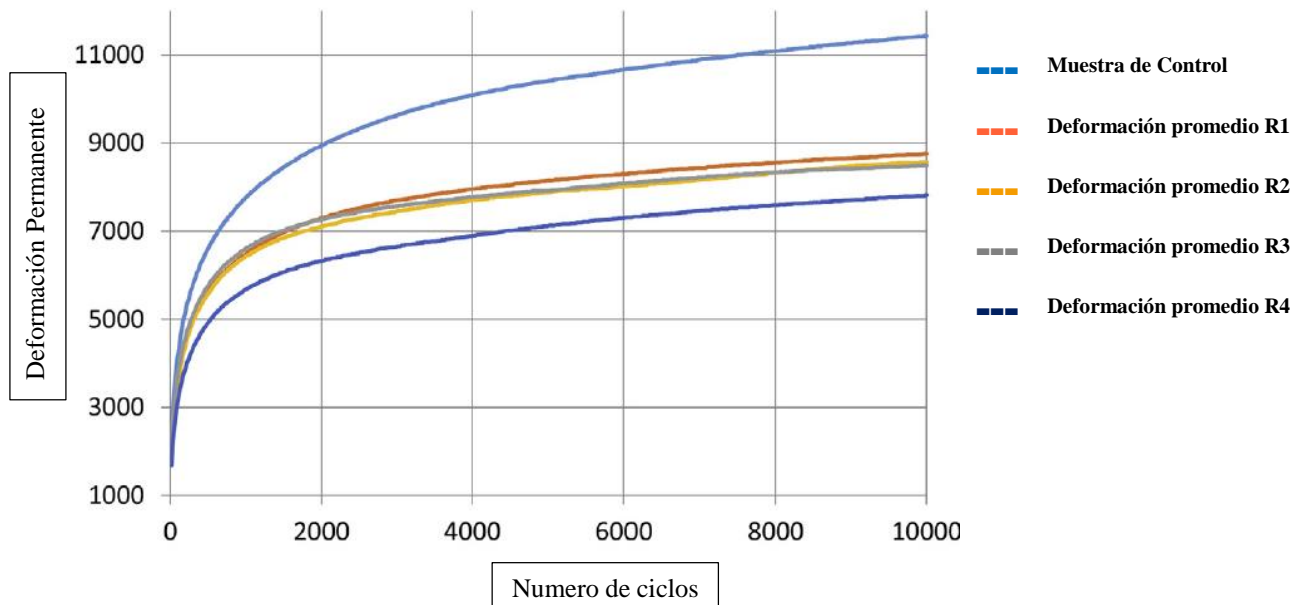
Perfil de la rutina final

Fuente: Modificado de Correia (2014)

Mounes et al. (2016). En Malasia en el Centro de Investigación en Transporte, Universidad de Malaya, evaluó la deformación permanente en una capa asfáltica reforzada con varios tipos de geomallas instaladas en la mitad de la capa, para esta investigación se elaboraron cuerpos de prueba de (150 mm) de diámetro y (80 mm) de altura, luego llevar a cabo el ensayo de fluencia usando un

ensayo cíclico de compresión uniaxial. En esta investigación se implementó como refuerzo cuatro tipos de diferentes de geomalla, de las cuales dos difieren en su resistencia a la tracción y dos difieren en el tamaño de las aberturas, teniendo estos dos parámetros para identificar qué tipo de geomalla tiene mayor resistencia a la deformación permanente. En este trabajo se observó un notable incremento de la resistencia al ahuellamiento en las muestras reforzadas que, en las muestras de control, también indica la influencia de la resistencia a la tracción de estas geomallas argumentando que teniendo una geomalla de mayor rigidez se presentan menos deformaciones permanentes que con una de menor rigidez. También se concluye que, aumentando el tamaño de malla o separación, en el mismo nivel de resistencia a la tracción conduce a un mejor comportamiento o resistencia a deformaciones permanentes dentro de las rejillas utilizadas en este estudio.

En la Gráfica 7, se representa la curva de deformación permanente versus el número de ciclos de aplicación en las muestras de pavimento asfáltico de los cuatro tipos de geosintéticos usados en esa investigación con el fin de identificar qué tipo tenía la mayor resistencia a la deformación permanente; En los resultados se puede observar que las geomallas de fibra de vidrio tienen una mayor resistencia la deformación permanente y que el geosintético R4, mostró la menor deformación permanente a lo largo de todos los ciclos realizados.



Gráfica 7. Curvas de fluencia de mezclas probadas, incluyendo muestras reforzadas y la de control.

Fuente: Modificado de Mounes et al. (2016)

Mounes et al. (2016), concluye que la geomalla en fibra de vidrio es notablemente eficaz en la reducción de deformación permanente de mezclas asfálticas, debido a la resistencia a la tracción y refuerzo lateral que proporciona; al igual que el tamaño de las aberturas de la rejilla influye notoriamente que a partir de estos resultados se puede considerar que las rejillas con aberturas mayores proporcionan mayor resistencia a la deformación permanente.

Ling y Liu (2001) Citado por Thitapan Chantachot et al (2016), afirman que el estudio del comportamiento de pavimentos asfálticos reforzados con geosintéticos por medio de ensayos de modelos físicos de laboratorio, arrojan resultados indicando que la instalación de refuerzo en la capa de pavimento asfáltico aumenta la resistencia la deformación permanente y aumenta la rigidez de la estructura de pavimento. Perkins y Cotez (2005) Citado por Thitapan Chantachot et al (2016), afirma que utilizando un simulador de vehículo con un eje dual estándar neumático para cargar en

secciones de pavimento a escala real, se tiene una mejora significativa en la resistencia a la deformación permanente para pavimentos reforzados con geosintéticos.

Thitapan Chantachot et al. (2016). En Tailandia en la Universidad del Rey Mongkut de Tecnología de Thonburi, evaluó métodos para mejorar el rendimiento de los pavimentos asfálticos, uno de los métodos consistió en reforzar el pavimento con geomalla en la carpeta asfáltica; para lo cual se utilizaron tres materiales, una cama de arena como base, el geosintético y la mezcla asfáltica, se prepararon carpetas asfálticas de 6 cm de ancho por 38.5 de largo. En el estudio la carga de la rueda se asumió como una carga base aplicada en la parte superior del pavimento. Los asentamientos de pavimento longitudinales se midieron mediante sensores de desplazamiento láser en el centro del pavimento y las distancias de 6 cm, 15 cm, y 30 cm, desde el centro, como se muestra en la Figura 7. Configuración del modelo físico para una estructura de pavimento de asfalto; se aplicó una serie de cargas cíclicas a través de la zapata, la cual tiene una presión alrededor de 400kPa, que es similar carga del tráfico que actúa sobre el pavimento. El patrón de carga se ve representado en la Figura 6. Patrón de carga cíclico colocado sobre el pavimento.

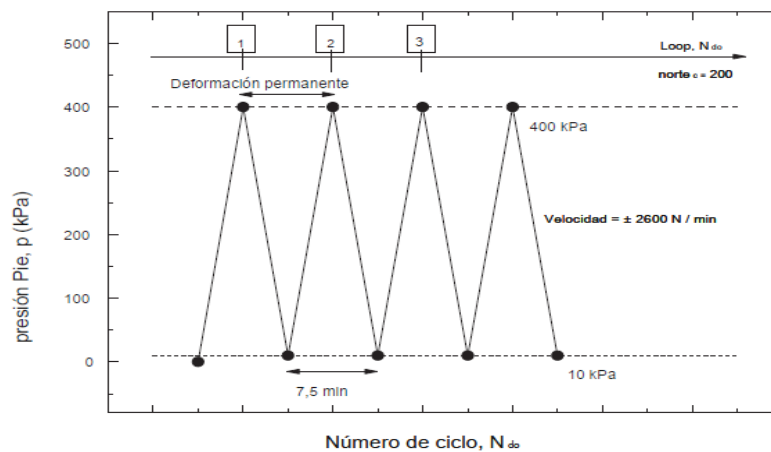


Figura 6. Patrón de carga cíclico colocado sobre el pavimento

Fuente: Modificado, Thitapan Chantachot et al. (2016)

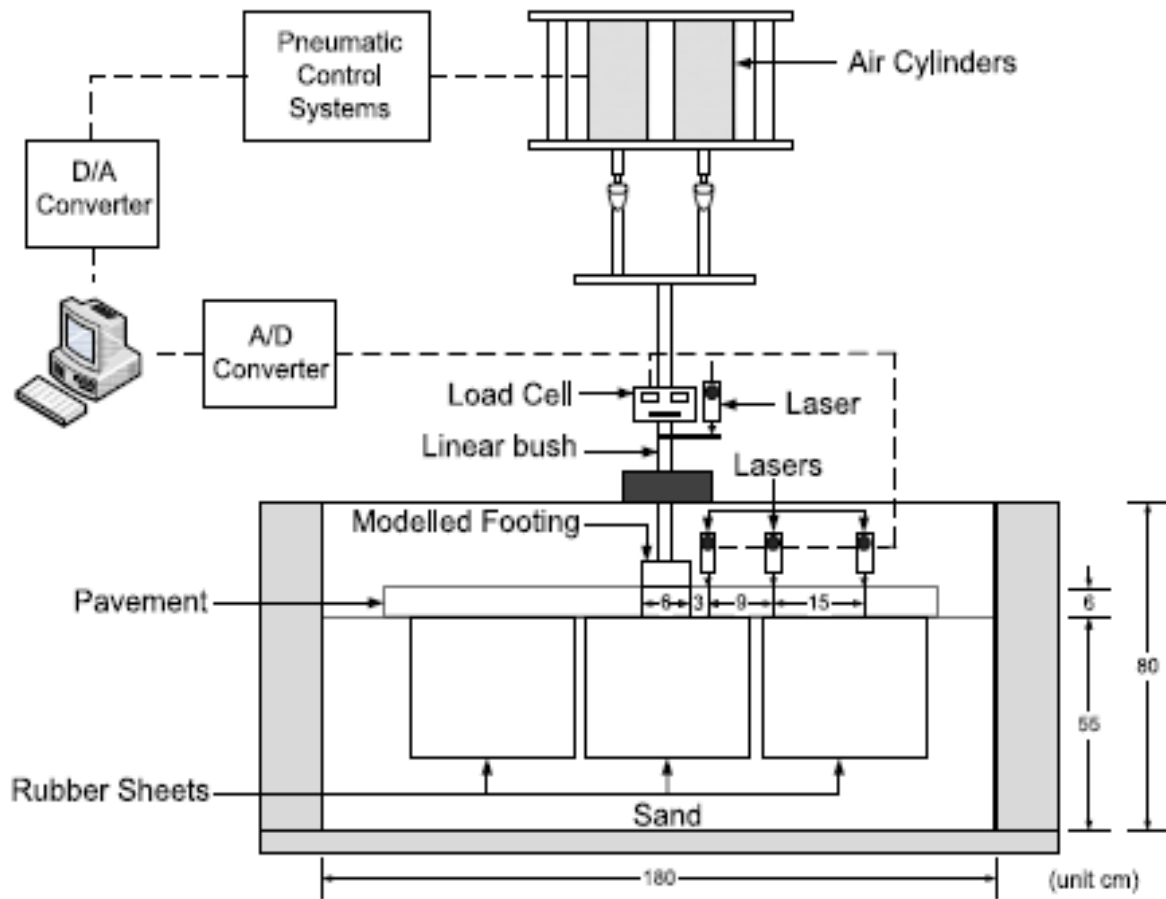
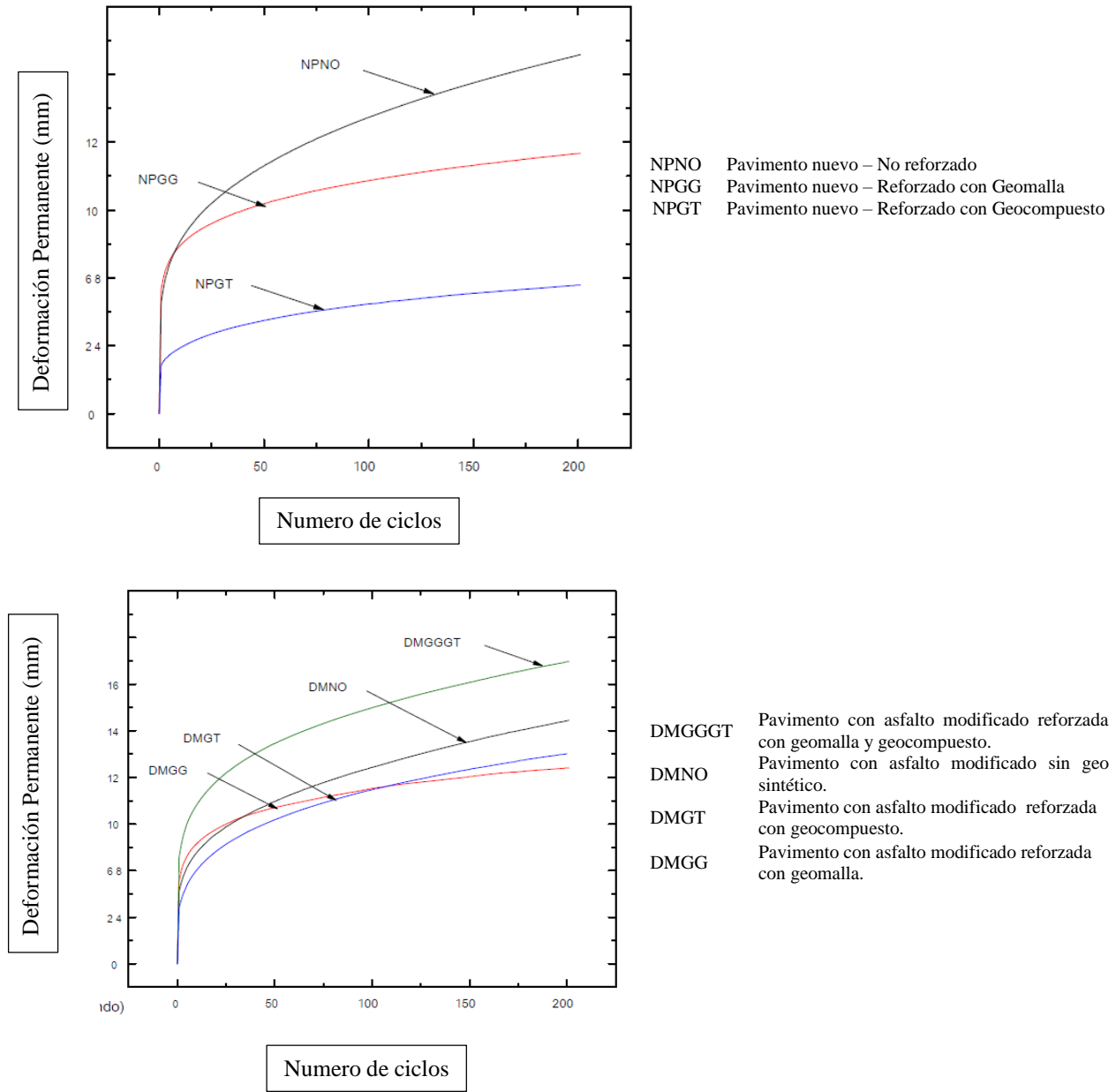


Figura 7. Configuración del modelo físico para una estructura de pavimento de asfalto

Fuente: Modificado, Thitapan Chantachot et al. (2016)

En la Gráfica 8, se relaciona las deformaciones permanentes y el número de ciclos, para esta investigación.



Gráfica 8. Curvas de ahuellamiento, deformación en mm, en función del número de ciclos

Fuente: Modificado, Thitapan Chantachot et al, (2016)

Por lo expuesto se puede observar, que las deformaciones permanentes entre los pavimentos reforzados y no reforzado, es decir los pavimentos con geosintéticos presentaron deformaciones mucho más bajas, esto debido que mediante el refuerzo con geosintético, moviliza la tensión de tracción en el refuerzo geosintético lo que aumentaría el confinamiento lateral en el pavimento.

Entonces el comportamiento global del pavimento se vuelve más rígido. Esto implica que, si el criterio para el diseño de un pavimento se rige por la deformación permanente, con el refuerzo de un geosintético se extendería la vida de servicio (Thitapan Chantachot et al. 2016).

A continuación, se presentan los análisis fotogramétricos, se utilizaron para determinar las deformaciones permanentes respectivas (Ver Figura 8).

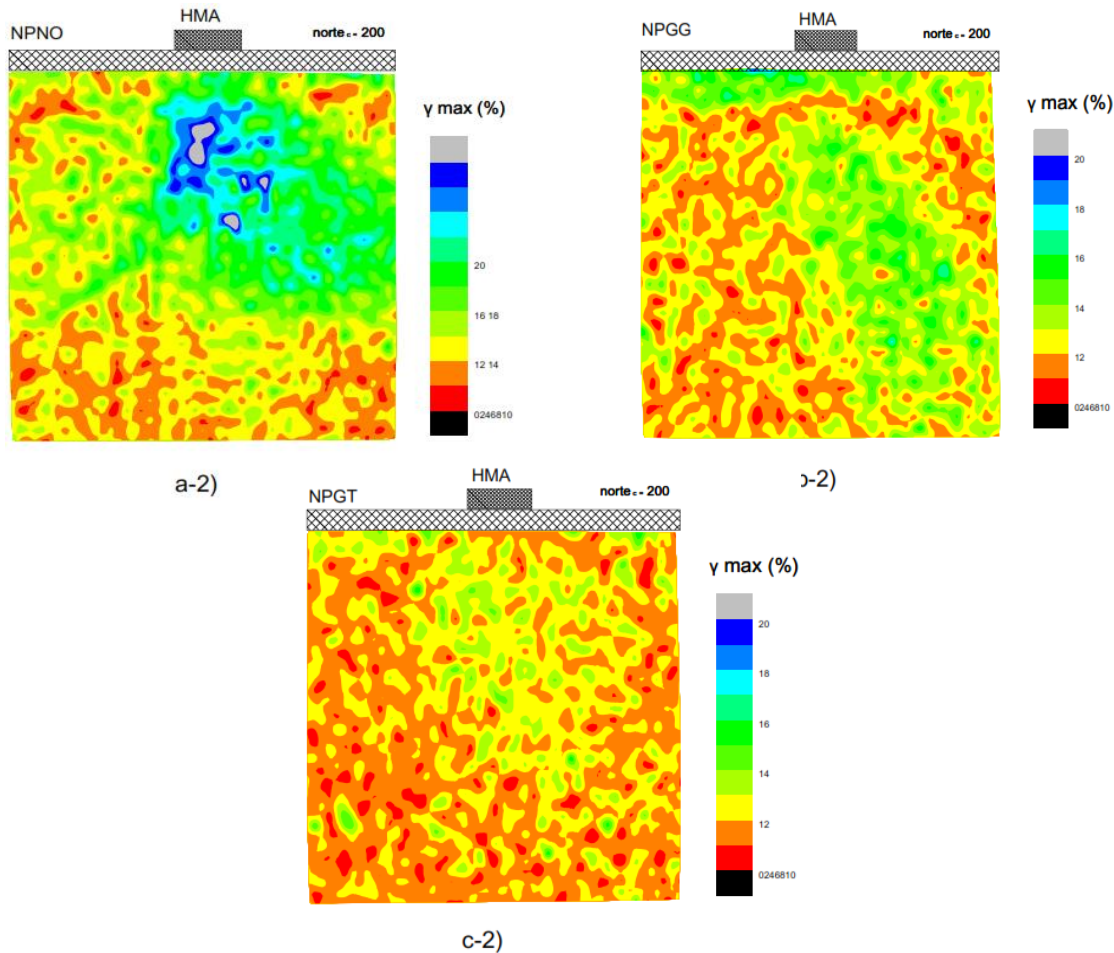


Figura 8. Comparaciones entre las distribuciones de deformación máxima del pavimento asfáltico

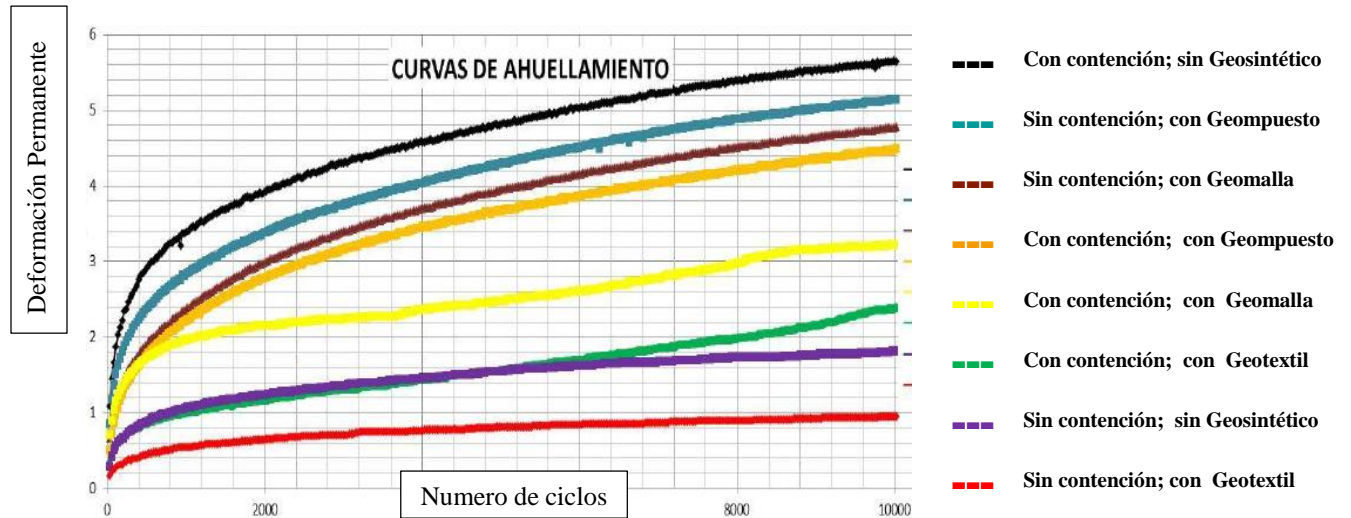
Fuente: Modificado, Thitapan Chantachot et al. (2016)

En la interpretación de los resultados, Thitapan Chantachot et al. (2016) afirma que la geomalla muestra mejores resultados cuando es instalada en el interior de la capa de asfalto, mientras que el geo compuesto muestra un mejor comportamiento al instalarse debajo de una capa de pavimento

nuevo, concluyendo que la resistencia a la deformación permanente disminuye en el carpeta asfáltica con la instalación de geosintéticos y la geomalla, es preferible sea instalado en el interior de la capa de asfalto con el fin de permitir el contacto directo entre la parte superior de las capas de asfalto, mientras que el geo compuesto es apropiado cuando se instala en la parte inferior del pavimento asfáltico.

Delbono y Rebollo (2017). En Buenos Aires, Argentina en el Centro de Investigaciones Viales, de la Universidad Tecnológica Nacional, evaluó el ahuellamiento utilizando el equipo Wheel Tracking Test, en el cual se evaluó, la resistencia de las carpetas asfálticas a la deformación permanente con y sin la presencia de geosintéticos, analizando el ahuellamiento bajo dos condiciones de ensayo: con y sin la contención lateral de la probeta, manteniendo las condiciones de carga y temperatura. Como conclusión de la investigación afirman que la resistencia la tracción del material tiene fundamental importancia en el desarrollo del ahuellamiento, ya que a mayor rigidez del geosintético menores serán las tensiones de corte en correspondencia con la huella, por lo cual será menor la deformación vertical.

En la Gráfica 9, muestra las curvas obtenidas en los ensayos mediante el equipo de rueda cargada (WTT).



Gráfica 9. Curvas de ahuellamiento, deformación en mm, en función de lo ciclos de carga

Fuente: Modificado de Delbono y Rebollo, (2017)

Delbono y Rebollo (2017) concluye que de los materiales utilizados en esta investigación el geosintético que mayor incidencia tuvo en la resistencia la deformación permanente fue la geomalla; ya que por su conformación estructural, permite contener y restringir el desplazamiento del flujo por corte que se presenta en correspondencia con la carga de tránsito; los demás materiales como el geo compuesto y geotextil no tejido, dieron menor aporte a la resistencia de deformación permanente, ya que por su composición física y propiedades mecánicas, genera un plano liso entre las capas, contribuyendo al desplazamiento lateral de la mezcla y favoreciendo de esta manera la deformación vertical.

Thanongsak Imjai et al. (2018) en Reino Unido en la Universidad de Ella FFI, evaluó el rendimiento de los geosintéticos como refuerzo en la carpeta de pavimento asfáltico en una escala real, se controló a través de cuatro secciones de prueba por medio de medidores de deformación, sensores de presión, puntos y placas de reflexión; mostrando que el refuerzo de geosintético ayudó a reducir los esfuerzos estáticos verticales desarrollados en la base del pavimento hasta un

66% y hasta un 72% para esfuerzos dinámicos, con lo cual se espera prolongar la vida útil de las capas de base. La mejor configuración incluye un geotextil dentro la capa de la mezcla asfáltica y una geomalla debajo de la capa de base. Se hizo un análisis con elementos finitos, de donde se predijeron las deformaciones permanentes y las tensiones de pavimento y concluye que los geosintéticos pueden ayudar a aumentar los periodos de mantenimiento y prolongar la vida útil de los pavimentos flexibles.

Se midió durante un periodo aproximado de 60 meses el comportamiento de cuatro secciones de pavimento, tres de las secciones reforzadas y una sin refuerzo la cual fue tomada como de referencia. Cada sección de prueba cuenta con una capa de mezcla densa en caliente de 100 mm de espesor, incluye una capa superior de rodadura de 50 mm y una capa de unión sub-capas de 50 mm hecha de mezcla asfáltica, y una capa de base de 100 mm. En Figura 9 Construcción de las secciones de prueba se muestra la configuración de las secciones de prueba.

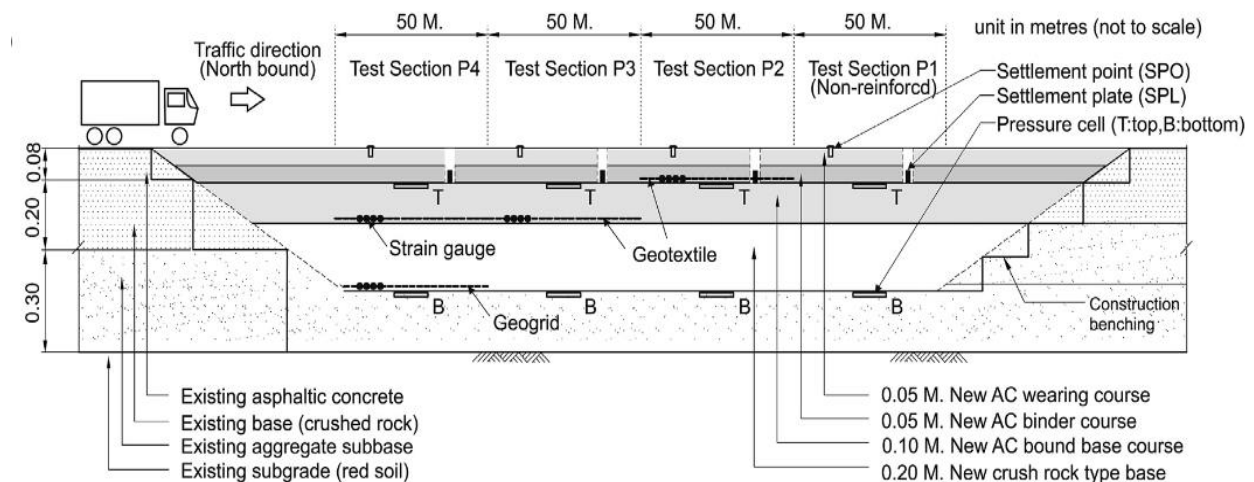


Figura 9. Construcción de las secciones de prueba: (a) sección transversal de la carretera existente, (b) los puntos de referencia plan de clave para la medición de la deformación y (c) de sección transversal AA en sentido de la dirección.

Fuente: Modificado, Thanongsak Imjai et al. (2018)

Una serie de pruebas de rueda cargada (WLT) se realizaron a 30,60 y 90 días después utilizando un camión de prueba con cargas totales de 20, 30 y 40 toneladas. Las cargas se aplicaron a lo largo de la longitud de la carretera en la dirección del tráfico. En la Figura 10 se muestra que para este estudio la profundidad de huella está definida como relativo máximo lo que indica que la profundidad de la huella se determinó en relación a la superficie de la carretera, para tener en cuenta el número de variaciones preexistentes de elevación de la superficie de las secciones de ensayo.

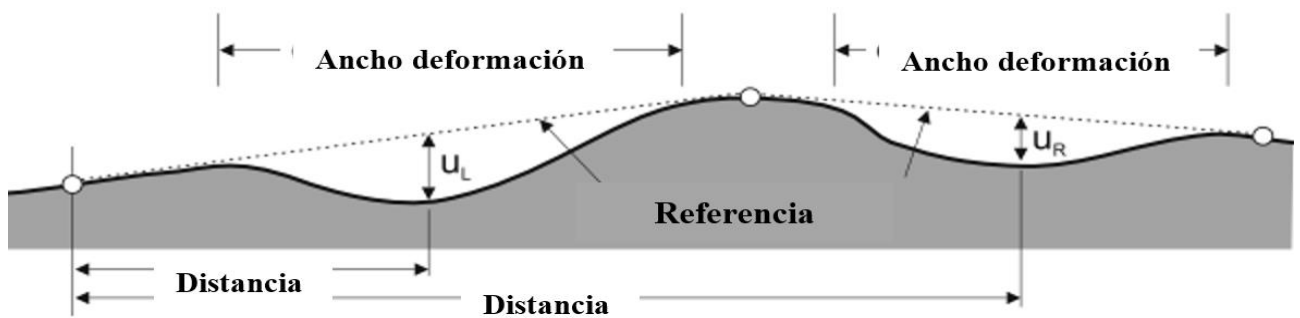


Figura 10. Determinación de la profundidad de la huella utilizando el método de referencia fijo

Fuente: Modificado, Thanongsak Imjai et al. (2018)

Perkins y Edens (2003) Citado por Thanongsak Imjai et al. (2018) afirman que un análisis numérico de refuerzo con geosintético puede ser considerado como un material elástico isotrópico. Se argumenta que un modelo que incluye modelos de plasticidad, la fluencia, y la dependencia direccional sería más realista. Sin embargo, un modelo de este tipo no es práctico, ya que requiere muchos parámetros de entrada que no son fácilmente disponibles, Los módulos elásticos del geotextil y la geomalla se toman como 3333 MPa y 909 MPa, respectivamente, proporcionado por el fabricante (con relación de Poisson = 0.35).

A continuación, en la Figura 11 se muestra las secciones transversales de cada ensayo, donde se evidencia, los puntos de asentamiento vertical, de la carpeta asfáltica.

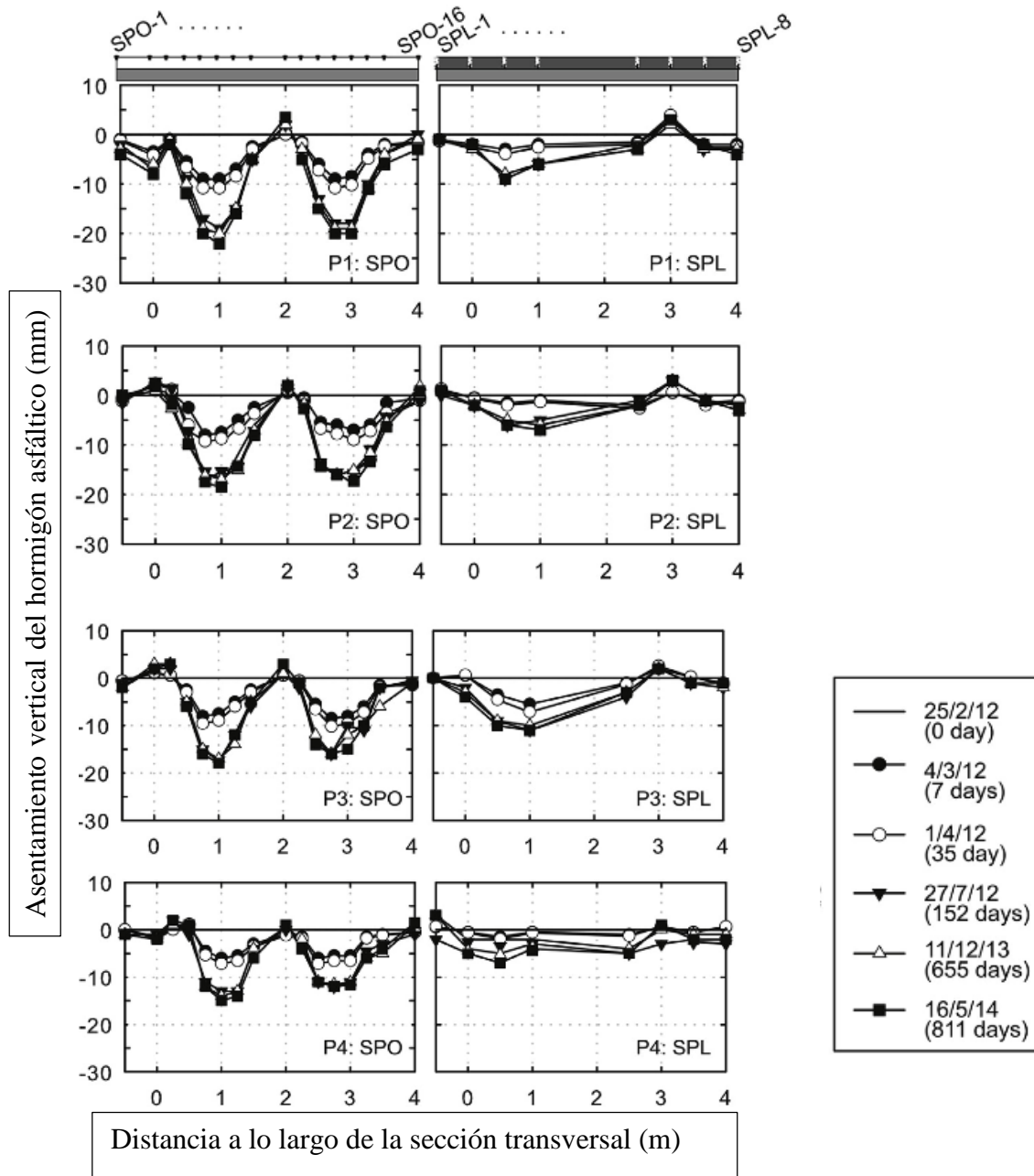


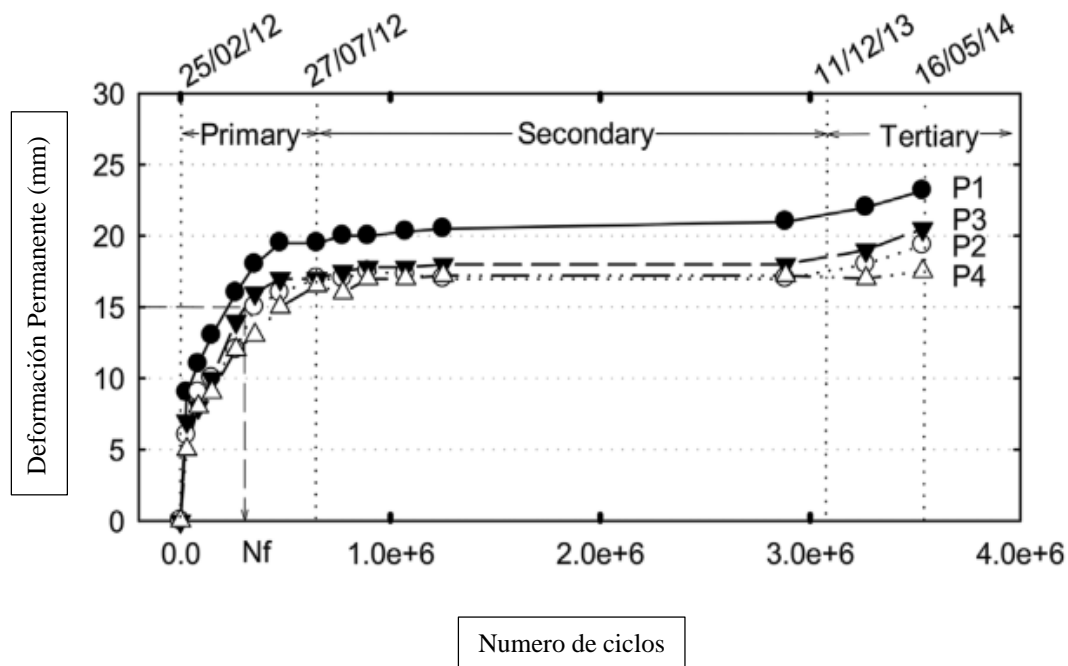
Figura 11. Comparación de deformaciones de los cuerpos de prueba in situ.

Fuente: Modificado, Thanongsak Imjai et al, (2018)

En la Figura 11 Comparación de deformaciones de los cuerpos de prueba in situ, se compran las deformaciones, de las lecturas de 7, 45 y 120 días, obtenido durante las pruebas de carga de la rueda. Las deformaciones medidas donde se instaló el geotextil presentaron lecturas más bajas (-34 $\mu\epsilon$). En la parte inferior de la capa de mezcla asfáltica, la membrana de tensión muestra

valores más altos de (+505 y 461 + $\mu\epsilon$) lo que se observa para las secciones d P3 y P4, respectivamente. A esta profundidad, los esfuerzos verticales se disipan lateralmente el esfuerzo del geosintético.

A lo largo de la sección transversal del carril, las deformaciones máximas variaron de 17 a 23 mm, donde se confirma que las secciones reforzadas muestran una mayor resistencia a la deformación permanente en comparación con la sección de referencia. En la Gráfica 10 se muestra la progresión de la formación de surcos de las cuatro secciones de pavimento, donde se observan las etapas primarias, secundarias y terciarias de la deformación permanente.



Gráfica 10. Deformación permanente en las secciones prueba

Fuente: Modificado, Thanongsak Imjai et al. (2018)

Como se puede observar se presentan los resultados en campo una prueba a escala real reforzada con geosintético, en la gráfica 10 se muestra el comportamiento de las secciones reforzadas y la de referencia mostrando mejoras en la resistencia a la deformación permanente en las muestras reforzadas; ya que la presencia del refuerzo del geosintético reduce significativamente los

esfuerzos verticales, transferidos a las capas de base y sub-base, lo que mejora notablemente la vida útil del pavimento; también se evidenció que las capas granulares muestran un mejor desempeño dependiendo la posición donde sea ubicado el refuerzo.

5. METODOLOGÍA

5.1. Materiales utilizados

Para el desarrollo de esta investigación se analizó las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados, entre ellos están relacionados las capas de mezclas asfálticas en caliente, los geosintéticos que se utilizaron como refuerzo y el ligante bituminoso que actúa como riego de liga entre ellas. Por lo expuesto, se requirió a la empresa Ingeniería de Vías S.A. quien proporciono a esta investigación el diseño de mezcla asfáltica denominada MDC-19; de esta manera se tomó una muestra de una de las bachadas producidas en planta para la caracterización de la mezcla asfáltica y posterior elaboración de los cuerpos de prueba. De esta manera, se describirán todos los ensayos realizados y procedimientos adoptados para caracterizar cada uno de ellos, las características de los materiales y su concordancia con lo exigido por las especificaciones actuales del Instituto Nacional de Vías.

5.1.1. Agregado Pétreo

El agregado pétreo está conformado por una mezcla de cuatro tipos distintos de material de trituración, cuya fuente de material es proveniente del Río Dos Ríos (Mercaderes, Cauca), denominado de la siguiente forma:

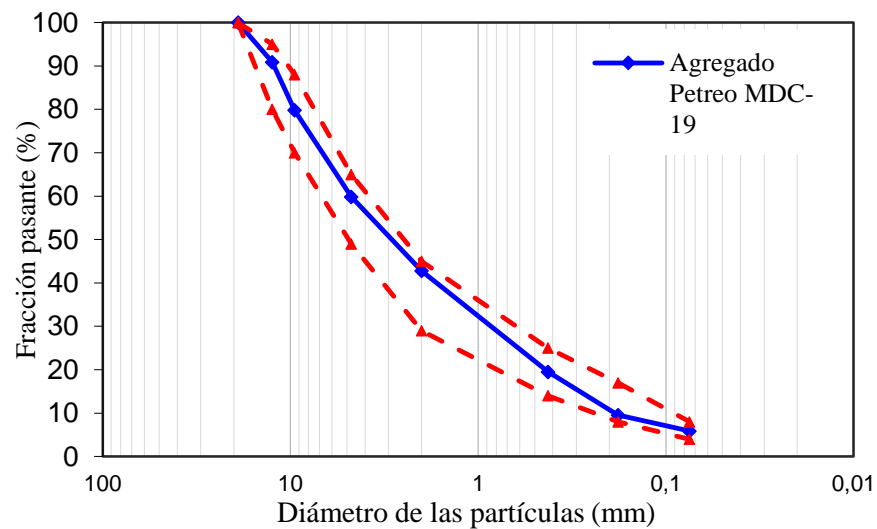
- M1: Todo uno Pasa 5/8" a tamiz N° 200. Triturado con cono
- M2: Todo uno Pasa 1/2" a tamiz N° 200. Triturado con cono
- M3: Arena clasificada Tipo 3/16" a tamiz N° 200. Triturado con impactor
- M4: Grava triturada tipo 3/4"

Las combinaciones teóricas de cada uno en la mezcla fueron 35% M-1, 35% M-2, 10% M-3, 20% M-4 respectivamente. El material conformado presenta la distribución de tamaños de las partículas que se muestra en la Tabla 1. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.

Tabla 1. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.

Tamiz (in)	Tamiz (mm)	Fracción pasante (%)	Puntos de control	
			INV Art. 450	
			Superior	Inferior
3/4	19.00	100.00	100	100
1/2	12.50	90.9	95	80
3/8	9.50	79.8	88	70
N.º 4	4.75	59.8	65	49
N.º 10	2.00	42.8	45	29
N.º 40	0.425	19.5	25	14
N.º 80	0.180	9.5	17	8
N.º 200	0.075	5.9	8	4

Lo anterior se puede observar en la Gráfica 11 Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica.



Gráfica 11. Granulometría del agregado pétreo de la mezcla asfáltica

Teniendo en cuenta la granulometría del material se puede observar que está constituido en un 40% por gravas, 55% por arenas y 5% por llenante mineral. Adicionalmente se encontró un coeficiente de uniformidad $c_u = 24.2$ y un coeficiente de curvatura $c_c = 0.9$, con lo cual se clasifica como una arena pobremente gradada SP-SM o A-1-a (0). No obstante, se observa que la granulometría del agregado se encuentra dentro de la franja de control permitida por las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías para una mezcla densa en caliente MDC-19.

La caracterización de los materiales es fundamental conocerlas al igual que su cumplimiento de acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías. Tales propiedades se encuentran en la Tabla 2. Resultados de caracterización de agregado mineral, como se muestra a continuación.

Tabla 2. Resultados de caracterización de agregado mineral

Propiedad	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito
Desgaste L.A.				
500 revoluciones	E-218	23	%	≤ 25
100 revoluciones		4.4	%	≤ 5
Abrasión Micro-Deval	E-238	8.2	%	≤ 20
Resistencia 10% finos				
Valor en seco	E-224	200	kN	≥ 110
Relación húmedo/seco		85	%	≥ 75
Grueso:				
Solidez en sulfato de magnesio	E-220	3.93	%	≤ 18
Fino: 7				
Impurezas en agregado grueso	E-237	0.39	%	≤ 0.5
Índice de plasticidad	E-125 y E-126	NP	–	NP
Equivalente de arena	E-133	57.7	%	≥ 50
Azul de metileno	E-235	N/A	–	≤ 10
Partículas planas y alargadas	E-240	6.4	%	≤ 10
Caras fracturadas				
Una cara	E-227	85.6	%	≥ 85
Dos caras		72.7	%	≥ 70
Angulosidad de la fracción fina	E-239	45.8	%	≥ 45
Adhesividad				
Agregado fino	E-774	8	–	≥ 4
Gravedad específica aparente				
Agregado grueso	E-223	2.678	–	–
Agregado fino	E-222	2.626	–	–
Absorción				
Agregado grueso	E-223	0.87	%	–
Agregado fino	E-222	1.01	%	–

5.1.2. Cemento asfáltico.

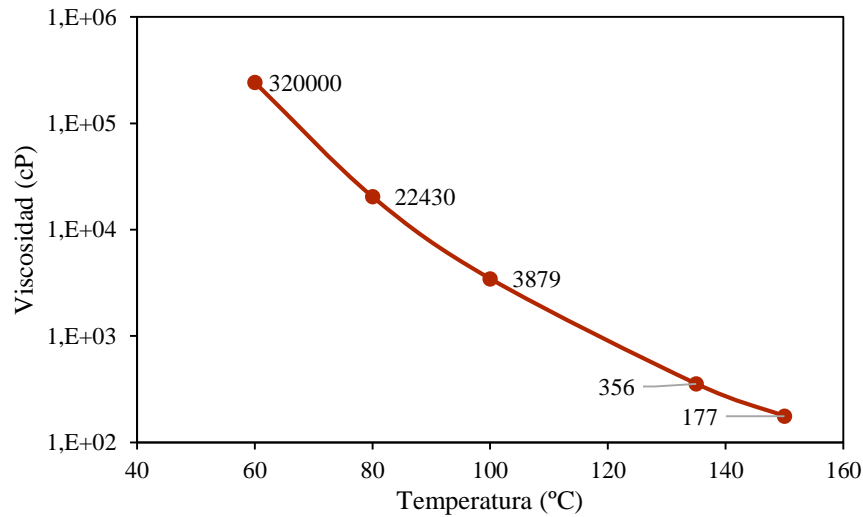
Como ligante asfáltico seleccionado en la investigación es de tipo 60/70 (grados de penetración en décimas de milímetro) de la refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL conforme a os

requerimientos del Artículo 400-13 del Instituto Nacional de Vías, el rango en el que se cumplen todas las especificaciones simultaneas varía entre el 4.9% y 5.5% con un valor tomado para el diseño de 5.2, de acuerdo al criterio del Instituto del Asfalto, serie MS-22. Además, según la variación de la viscosidad del cemento asfáltico en función de la temperatura, para llevar a cabo la mezcla con los agregados pétreos la temperatura es de $149\pm 1^{\circ}\text{C}$ y la de compactación en laboratorio es de $140\pm 1^{\circ}\text{C}$. Entre los ensayos de caracterización suministrados por el proveedor a este material se destaca la Gráfica 12 Curva reológica del cemento asfáltico.

En la Tabla 3. Resultados de Caracterización Cemento Asfáltico , se pueden evidenciar resultados.

Tabla 3. Resultados de Caracterización Cemento Asfáltico

Propiedad	Norma de ensayo	Resultado	Unidad	Requisito
Viscosidad a 60°C	ASTM D 4402	320000	cP	Reportar
Viscosidad a 80°C	ASTM D 4402	22430	cP	Reportar
Viscosidad a 100°C	ASTM D 4402	3879	cP	Reportar
Viscosidad a 135°C	ASTM D 4402	356.6	cP	Reportar
Viscosidad a 150°C	ASTM D 4402	177.4	cP	Reportar
Ductilidad	INV E-702-13	140	cm	≥ 100
Gravedad API	ASTM D 4052	5.5	Grados API	Reportar
Densidad a 15°C	ASTM D 4052	1032.2	kg/m ³	Reportar
Penetración 25°C	INV E-706-13	60	0.1 mm	60 – 70
Índice de penetración	-	-1.1		Reportar
Pérdida de masa (RTFOT)	INV E-720-13	0.574	g/100g	≤ 1.0
Punto ablandamiento	INV E-712-13	48.6	°C	45 – 55
Punto de inflamación	ASTM D 92	276	°C	≥ 232
Solubilidad en tricloroetileno	INV E-713-13	99.9	%	≥ 99



Gráfica 12. Curva reológica del cemento asfáltico

5.1.3. Mezcla asfáltica.

La mezcla asfáltica que compone cada una de las capas adheridas es una mezcla densa en caliente tipo MDC-19, cuyas proporciones se obtuvieron a partir del diseño suministrado por la empresa Ingeniería de Vías S.A. Planta Galíndez ubicada en el Departamento del Cauca. La cantidad de mezcla utilizada para la elaboración de los cuerpos de prueba se dosifica directamente en la planta de producción, de donde es tomada la muestra con el procedimiento estándar de toma de muestras de acuerdo a la norma AASHTO Designation: R 30-02 (2015), se elaboran los cuerpos de prueba tomando la mezcla suelta, llevarla a temperatura de compactación y se procede a la elaboración de cuerpos de prueba después del cálculo de la densidad máxima RICE para su posterior compactación (Ver Fotografías 1 a 5).



Fotografía 1. Disgregación Mezcla Asfáltica



Fotografía 2. Mezcla Asfáltica Suelta



Fotografía 3. Cuarteo Mezcla Asfáltica



Fotografía 4. Mezcla Asfáltica en Horno



Fotografía 5. Temperatura de Compactación Mezcla Asfáltica.

La Mezcla Asfáltica tipo MDC-19 se calienta a la temperatura de compactación de 140°C, para proceder la elaboración de los cuerpos de prueba.

5.1.4. Riego de liga.

Para la adherencia entre las capas de mezcla asfáltica tipo MDC -19 y las geomallas, en el presente trabajo se empleó un tipo de ligante bituminoso como riego de liga, a saber, una emulsión catiónica de rotura rápida CRR-1.

Los resultados de caracterización de las dos emulsiones suministradas por la empresa Humberto Quintero O. y Cía. SCA, se encuentran consignados en la Tabla 4. Caracterización de emulsión asfáltica convencional CRR-1.

Tabla 4. Caracterización de emulsión asfáltica convencional CRR-1.

	Norma de ensayo INV	Resultado	Unidad	Requisito INV Art. 415-13
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C	E-763	28.37	s	20 – 100
Contenido volumétrico de agua	E-761	34.98	%	≤ 40
Estabilidad en almacenamiento (24 horas)	E-764	0.76	%	≤ 1
Sedimentación a los 5 días		3.08	%	≤ 5
Destilación				
Contenido de asfalto residual	E-762	64.05	%	≥ 60
Contenido de disolventes		0.0	%	≤ 3
Tamizado				
Retenido tamiz n.º 20	E-765	0.0524	%	≤ 0.10
pH	E-768	2.83		≤ 6
Ensayos sobre residuo de destilación				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	E-706	62.8	0.1 mm	60 – 100
Punto de Ablandamiento	E-712	50.4	°C	≥ 45
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	E-702	>100	cm	≥ 10
Recuperación elástica por torsión 25°C	E-727	13.44	°C	≥ 12

5.1.5. Geosintéticos.

En el desarrollo de esta investigación se estableció el uso de 4 geomallas biaxiales disponibles comercialmente, las dimensiones de abertura equivalente de estas geomallas variaron entre 18 y 28 mm.

Las geomallas biaxiales de fibra de vidrio G1 y G2 utilizadas, fueron estructuras bidimensionales de material polimerico con fibra de vidrio; estas geomallas estan recubiertas con un polimero que permite que posea una buena adherencia a las capas asfálticas; las geomallas biaxiales G3 y G4 fueron elaboradas con multifilamento de poliéster de alta tenacidad (PET) y recubiertas con un copolímero.

En la Tabla 5, se presentan las principales características de los elementos de refuerzo utilizados en esta investigación y suministradas por cada uno de los fabricantes.

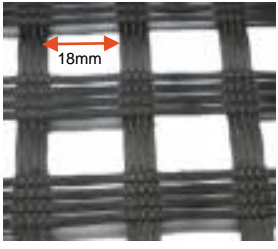
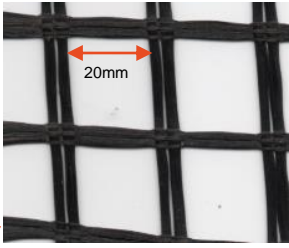
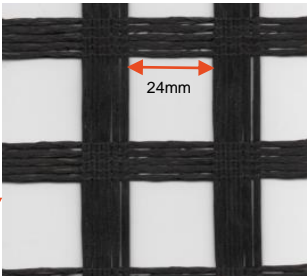
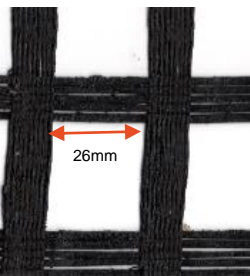
Tabla 5. Resultados de caracterización de geosintéticos proporcionadas por fabricante

Propiedad	Norma	Und.	Geomalla			
			G1	G2	G3	G4
Material de fabricación	-	-	GLASS	GLASS	PET	PET
Resistencia a altas temperaturas (punto de ablandamiento)	ASTM D 276	°C	>650 fibra >218 recubrimiento Fibra de vidrio	>650 fibra >218 recubrimiento Fibra de vidrio	240	240
Resistencia la tensión cíclica (Módulo de tensión cíclica)	ASTM D 7556	kN/m			1820	1300

Propiedad	Norma	Und.	Geomalla			
			G1	G2	G3	G4
Resistencia última a la tensión (MD/TD)	ASTM D 6637	kN/m	(100/100)	(50/50)	(75/75)	(50/50)
Resistencia a la Tensión 2% Deformación (SL/ST)	ASTM D 6637	kN/m	(10.5/10.5)	(7.7/7.6)	(13.1/14.9)	(7.9/8.7)
Resistencia a la Tensión 5% Deformación (SL/ST)	ASTM D 6637	kN/m	(21.0/21.0)	(14.6/14.6)	(23.7/27.6)	(15.1/16.4)
Rigidez secante (SL/ST)	J2% Calculada	kN/m	(525/525)	(385/380)	(655/745)	(395/435)
Rigidez secante (SL/ST)	J5% Calculada	kN/m	(420/420)	(292/292)	(474/552)	(302/330)
Tamaño de Abertura (MD/TD)	Medido	mm	(18/14)	(20/20)	(24/26)	(28/26)
Porcentaje de área abierta	Medido	mm	40	67	46	55

En la Tabla 6. Materiales Geosintéticos Empleados, se muestran los cuatro tipos de geomalla utilizados, en la parte superior las geomallas G1 y G2 fabricadas en material fibra de vidrio y en la parte inferior las geomallas G3 y G4 fabricadas en Poliéster.

Tabla 6. Materiales Geosintéticos Empleados.

Tipo de geosintético	Denominación
<p data-bbox="261 426 337 451">SENTI</p> 	<p data-bbox="776 352 1370 489">G1 Geomalla fabricada con Fibra de Vidrio, cuentan con un revestimiento bituminoso, que hace que sea compatible con el asfalto y facilita su adherencia.</p>
<p data-bbox="261 724 337 749">SENTI</p> 	<p data-bbox="740 600 1370 751">G2 Geomalla fabricada con Fibra de Vidrio, cuentan con un revestimiento bituminoso, que hace que sea compatible con el asfalto y facilita su adherencia.</p>
<p data-bbox="253 951 329 976">SENTI</p> 	<p data-bbox="740 940 1370 1024">G3 Geomalla PET están recubiertas con un copolímero de alto desempeño que facilita su adherencia a las mezclas asfálticas.</p>
<p data-bbox="261 1308 337 1333">SENTI</p> 	<p data-bbox="740 1255 1370 1339">G4 Geomalla PET están recubiertas con un copolímero de alto desempeño que facilita su adherencia a las mezclas asfálticas.</p>

5.2. Descripción del equipo y ejecución del ensayo de deformación

5.2.1. Compactador de rodillo de acero hidráulico.

El compactador de rodillo es un método de compactación de muestras de laboratorio que permite obtener placas de materiales de pavimento con propiedades de densidad especificadas de

acuerdo al diseño de mezcla utilizando cargas equivalentes a los de los equipos de compactación reales.

Este compactador está controlado hidráulicamente por un Controlador Lógico Programable (PLC) conectado a un HMI (Interfaz hombre-máquina), donde el operario del equipo puede ajustar el número de pasadas. Un control de presión manual se ajusta para establecer la carga requerida. La principal función del rodillo de acero es conformar especímenes para pruebas de deformación permanente (Ver Fotografía 6-7).



Fotografía 6. Compactador de rodillo de acero hidráulico.

Vista frontal interna del equipo.



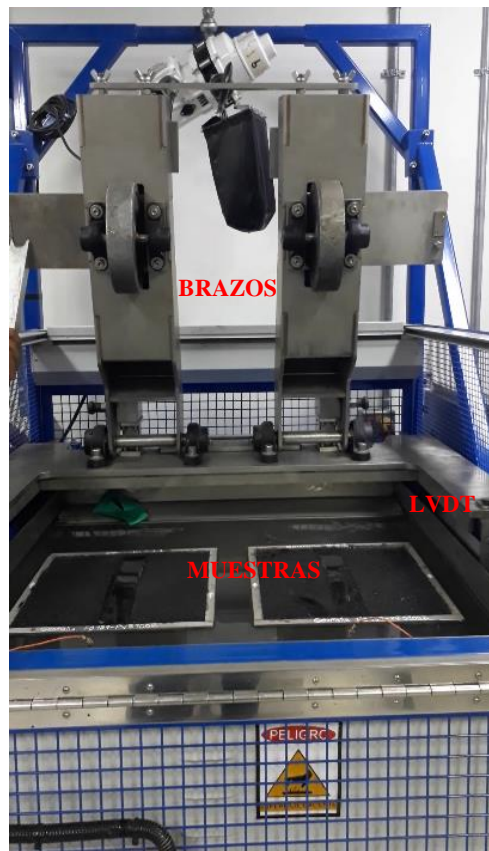
Fotografía 7. Compactador de rodillo de acero hidráulico.

Vista lateral externa del equipo

5.2.2. LWT (Load Wheel Tester)

En el equipo se fallan dos cuerpos de prueba en simultáneo, ya que su configuración cuenta con dos brazos de carga (Ver Fotografía 8). La carga es aplicada a la muestra por medio de una rueda de acero de 46.99 mm de espesor y 203.2 mm (8") de diámetro durante un periodo de ciclos establecido, que para esta investigación se fijó en 10000. La carga aplicada al espécimen fue de 700 N equivalente a 70 Kg y con una velocidad de ensayo de 26.8 RPM.

El equipo está conectado a una unidad de cómputo, que dispone de un software de control, desde donde se realiza la configuración de la máquina con las condiciones del ensayo. Los datos son almacenados de tal manera que se permite observar el comportamiento que presenta el material a lo largo de la prueba bajo la acción de la carga cíclica (Ver Fotografía 8).



Fotografía 8. Equipo de Ensayo Load Wheel Tester.

Vista frontal interna del equipo

5.2.3. Elaboración de cuerpos de prueba.

Dentro de la caracterización de la mezcla asfáltica tipo MDC-19, se determinó la densidad máxima Gmm Rice de 2.461 g/cm^3 . Con ello y sabiendo que los cuerpos de prueba serían conformados en moldes de 300 x 300 milímetros, con un espesor de 100 milímetros, se estableció que la masa total a depositar en el molde debía ser aproximadamente de 10.000 gramos (10

Kilogramos) (Ver Fotografías 9 y 10) y la temperatura de compactación de acuerdo al diseño es 140°C.



Fotografía 9. Cuarteo Mezcla Asfáltica



Fotografía 10. Peso densidad máxima Rice

Los cuerpos de prueba estaban constituidos por dos capas de mezcla asfáltica tipo MDC-19 cuyos espesores compactos fueron de 50 milímetros cada uno; se dejó reposar la mezcla por 24 horas, luego en su superficie de contacto fue colocada la geomalla de refuerzo y se realizó un riego de emulsión asfáltica CRR-1, se da un tiempo de rotura rápida de 5 minutos y posterior a esto se dosifica la segunda capa de 50 milímetros completando así 100 milímetros de mezcla compactada con el geosintético (Ver Fotografías 11 a 14).



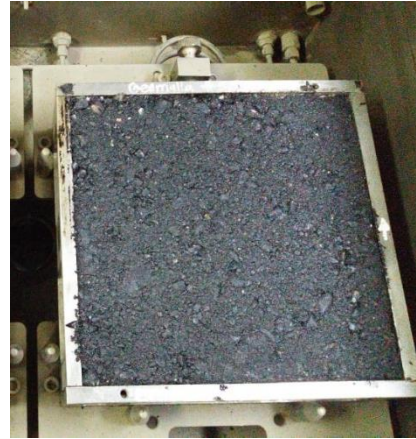
Fotografía 11. Muestra para un cuerpo de prueba.



Fotografía 12. Conformación primera capa de mezcla asfáltica



Fotografía 13. Colocación Geomalla.

Fotografía 14. Conformación segunda capa de mezcla
asfáltica

La colocación del refuerzo se realizó en el sentido de aplicación de la carga cíclica (Ver Fotografía 15). Además, se estableció la colocación de la Geomalla a los 50 mm, luego de que al tratar de instalar el geosintético a una altura de 75 mm, lo cual no fue posible compactar ya que golpeaba las paredes del molde por la forma en que compacta el equipo que es cilíndrica y al descender el compactador, lo hace en forma diagonal y no vertical, golpeando en uno de los bordes del molde. En las siguientes figuras se muestra un esquema general de la forma y posición en la que se colocó el refuerzo y la configuración del cuerpo de prueba (Ver Figuras 12 y 13).

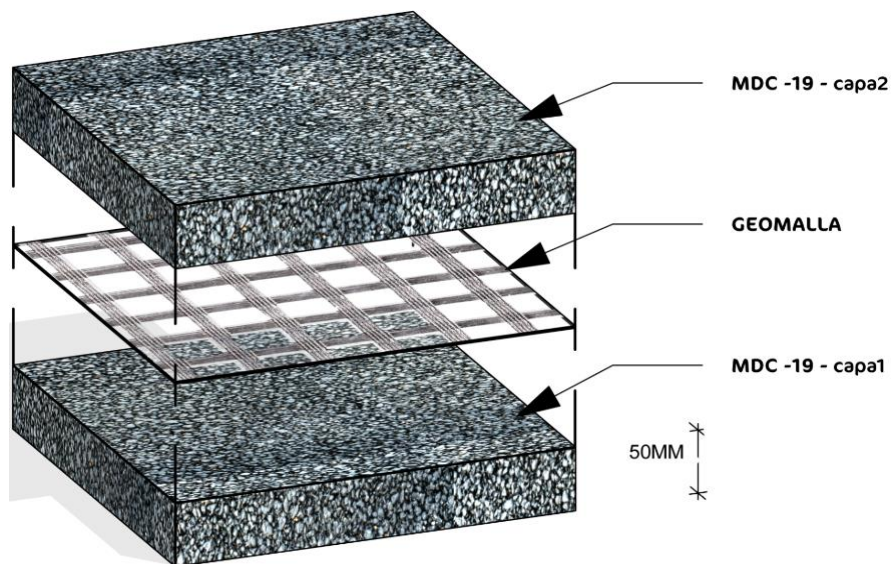


Figura 12. Despiece cuerpo de prueba

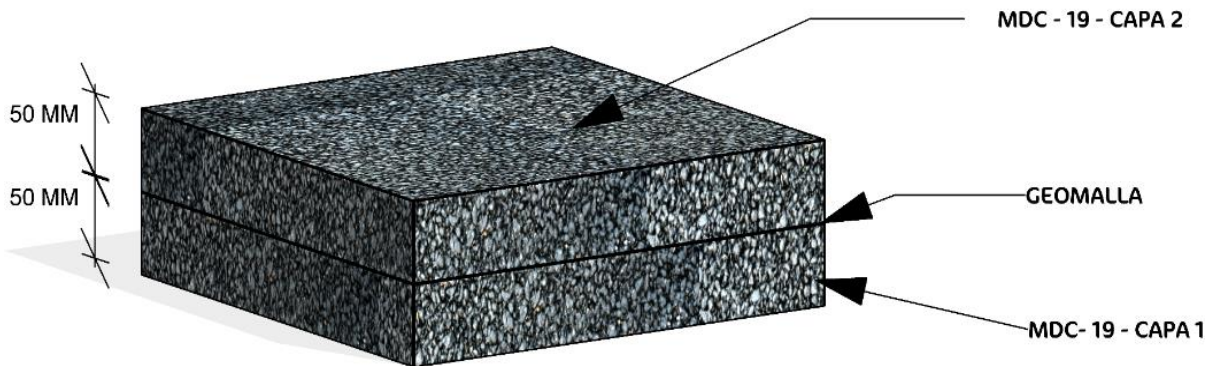


Figura 13. Configuración cuerpo de prueba.

Por lo anterior, el corte del refuerzo se realizó teniendo en cuenta el ancho del molde y la longitud de desarrollo a considerar para garantizar buenas condiciones de anclaje.

Una vez elaborado el cuerpo de prueba, fue compactado a un espesor total de 100 milímetros en el compactador de rodillo hidráulico, según especificaciones del equipo con una carga máxima de 30 kN, una velocidad de 10 ciclos/min y una presión máxima de 55 bar (550 psi) todo esto hasta que la presión que ejerciera el rodillo sobre el espécimen se estabilizará en cero, indicativo de que la muestra había llegado a su altura total compacta y al nivel de compactación estimado (Ver Fotografías 15 y 16).



Fotografía 15. Muestra compactada



Fotografía 16. Compactación de la muestra.

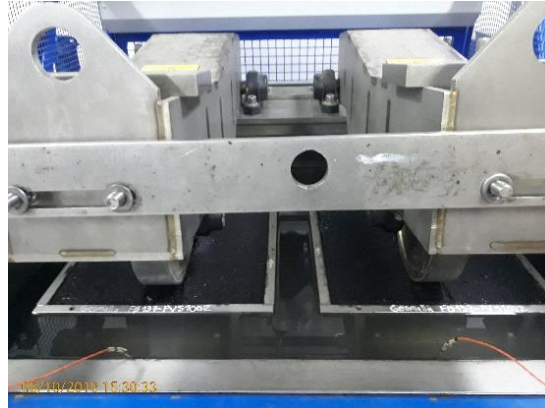
5.2.4. Ensayo LWT (*Load Wheel Tester*)

Los cuerpos de prueba fueron llevadas al equipo LWT, que esta diseñado para ensayar muestras de cemento asfáltico en condiciones sumergidas. Antes de dar inicio al ensayo se realizó la programación en el equipo de cómputo donde se introdujeron las condiciones de carga, velocidad, criterio de parada del ensayo, número de ciclos, temperatura de ensayo. De esta manera las muestras fueron sometidas a una condición de carga de 700 N, velocidad de aplicación de carga de 26.8 RPM, temperatura del agua para inmersión de 70°C y la condición para finalización de la prueba de ensayo es cuando uno de los dos cuerpos de prueba presente una profundidad de ahuellamiento de 12.5 mm o cuando cumpla los 10000 ciclos establecidos. En las Fotografías 17 a la 20 se muestra las condiciones bajo las cuales se ensayaron las muestras y el estado de las mismas después del ensayo; respectivamente.

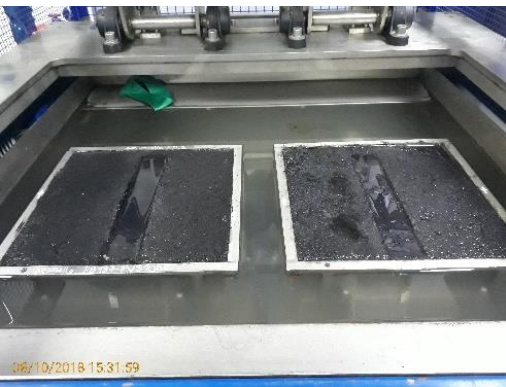
Por cada geosintético se ensayaron tres (3) muestras para un total de doce (12) muestras con geosintéticos, más tres (3) muestras de referencia para un total de quince (15) muestras ensayadas; en cada montaje se ensayaron dos muestras con geosintéticos iguales y en el siguiente montaje dos muestras con geosintéticos diferentes; lo anterior debido a que el número de muestras por geosintético es impar; lo descrito anteriormente no influye en el resultado de deformación ya que los brazos del equipo trabajan individualmente (Ver Fotografías 17 a 20).



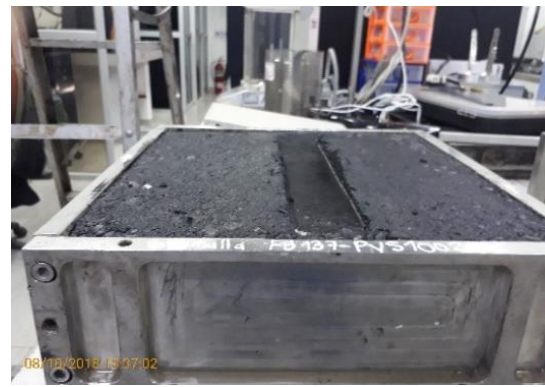
Fotografía 17. Ensayo LWT



Fotografía 18. Muestras durante el ensayo



Fotografía 19. Muestras después del ensayo



Fotografía 20. Muestras después del ensayo

En las siguientes figuras se muestra un esquema general de la forma, posición y deformación de los cuerpos de prueba durante el ensayo (Ver Figura 14).

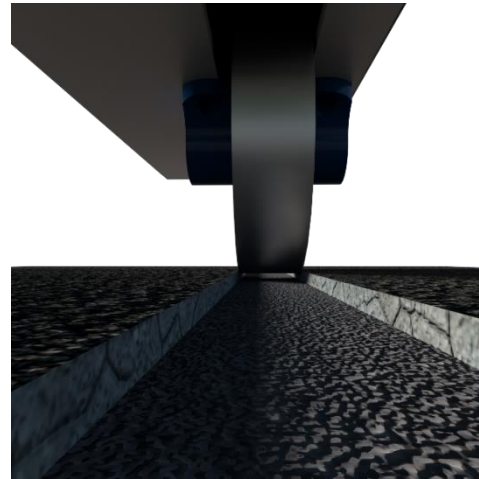


Figura 14. Deformación cuerpo de prueba

Durante la ejecución del ensayo el software asignado registró las deformaciones acumuladas que se presentan en cada cuerpo de prueba, reportando resultados en los diferentes ciclos de carga y arrojó el perfil de deformación del material (Ver Figura 15).

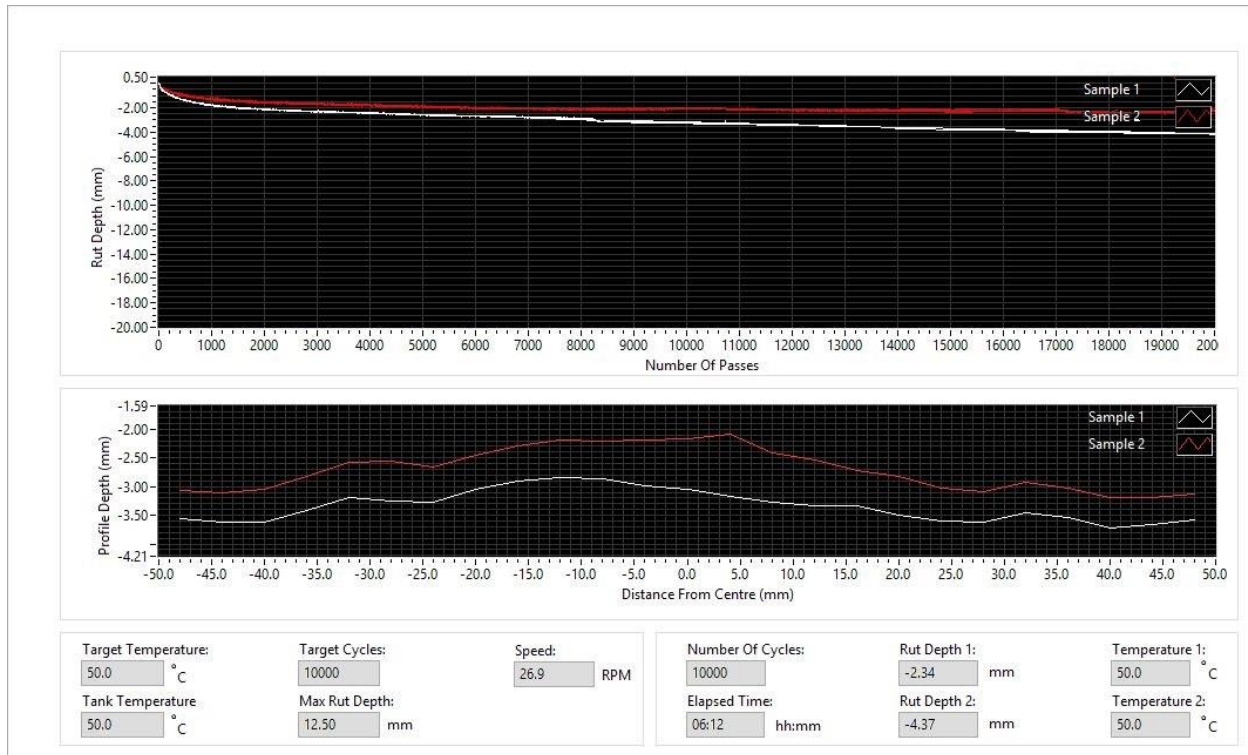


Figura 15. Perfil de deformación

En la Figura 15. Perfil de deformación, se puede evidenciar que en las curvas de deformación se interpreta las propiedades mecánicas para la interpretación de los datos arrojados por el ensayo de LWT; en la cual se arroja dos gráficas que representan el número de pasadas versus la profundidad de deformación y el número de pasadas versus la profundidad en mm, de cada una de las muestras en los 10000 ciclos o 20000 pasadas de la rueda.

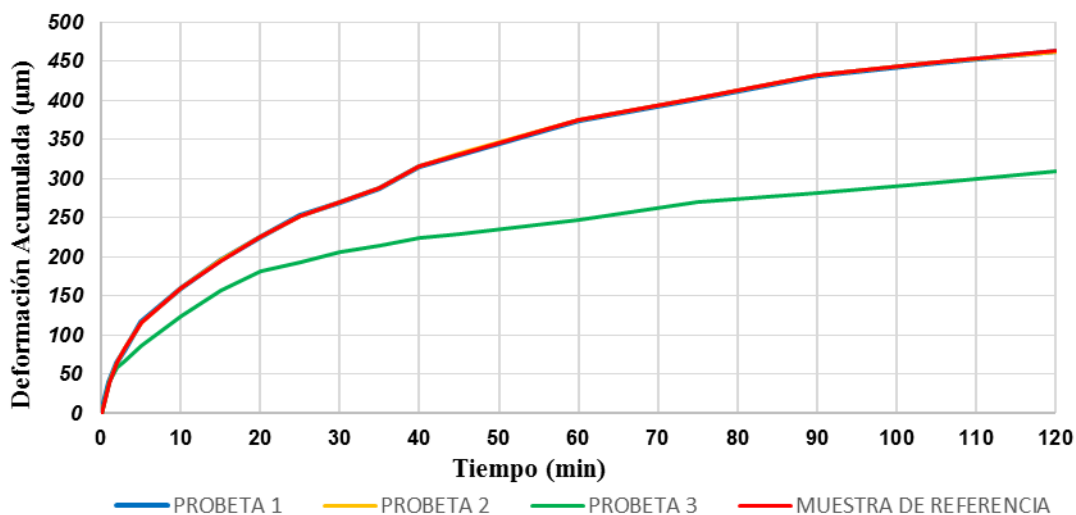
Se puede observar, que cada una de las gráficas muestra todos los parámetros de ensayo como es la temperatura a 50 °C, máxima deformación permitida que corresponde a 12.5 mm y número de ciclos.; con lo que se indica que cada uno de los cuerpos de prueba cumplió con la especificación AASHTO T 324, para esta investigación.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en este proyecto de investigación con el respectivo análisis. Se indicará el comportamiento de los cuerpos de prueba reforzados con geomalla y los cuerpos de prueba sin refuerzo, sometidos bajo las mismas condiciones de ensayo en el equipo de rueda de Hamburgo; se presentará gráficamente los resultados obtenidos en los cuales se comparan su comportamiento y propiedades.

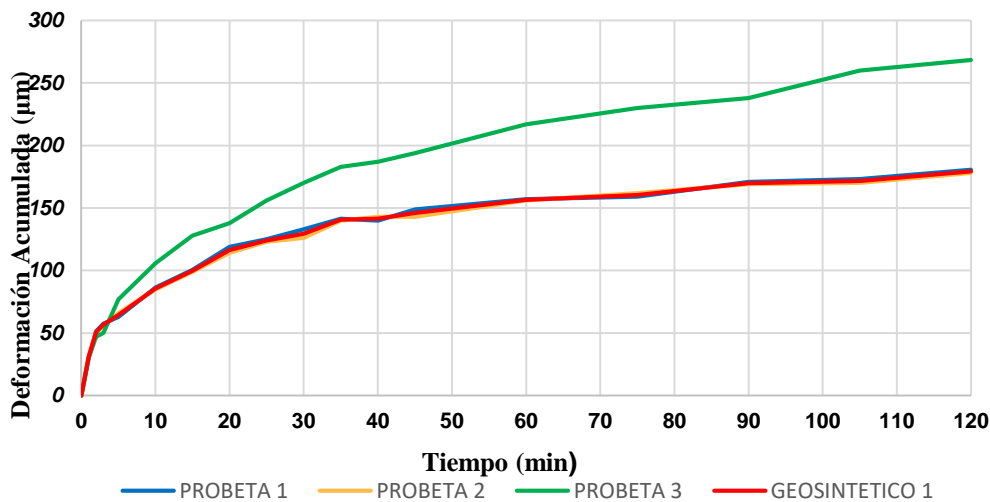
6.1. Deformación permanente de los cuerpos de prueba

En la fase experimental de este proyecto se prepararon tres especímenes de ensayo por cada tipo de geomalla a implementar, y tres especímenes sin refuerzo los cuales conformaran nuestra muestra de referencia. Se evaluó el comportamiento a deformación permanente mediante el ensayo rueda de Hamburgo de una capa asfáltica (MDC-19) con el refuerzo instalado en la mitad de la capa.



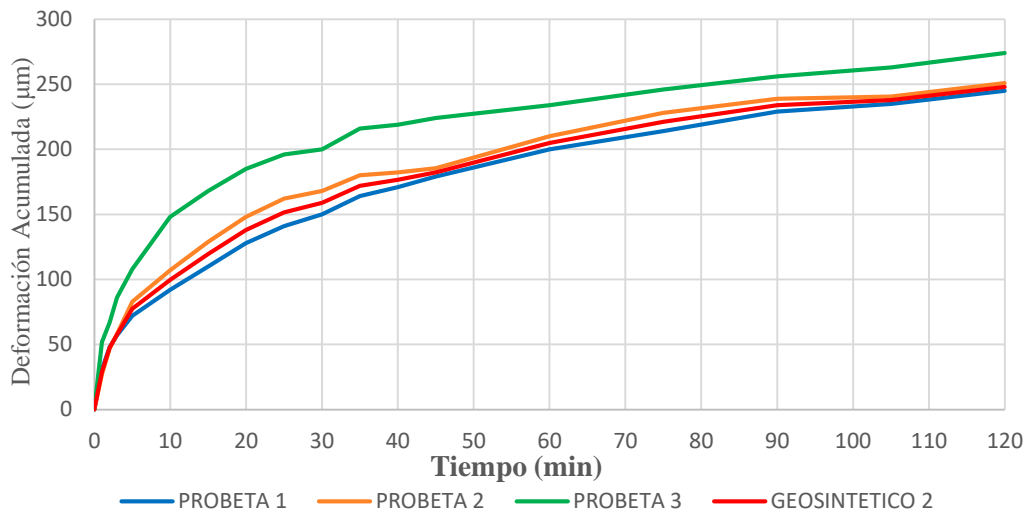
Gráfica 13. Deformación Plástica Muestra de Referencia

En la Gráfica 13. Deformación Plástica Muestra de Referencia, se muestra los resultados del ensayo rueda de Hamburgo de las probetas que conforman la muestra de referencia, se puede observar que una de las probetas ensayadas indica un comportamiento diferente a las demás, debido a esto esta muestra es descartada en la determinación de la curva característica para nuestra muestra de referencia.



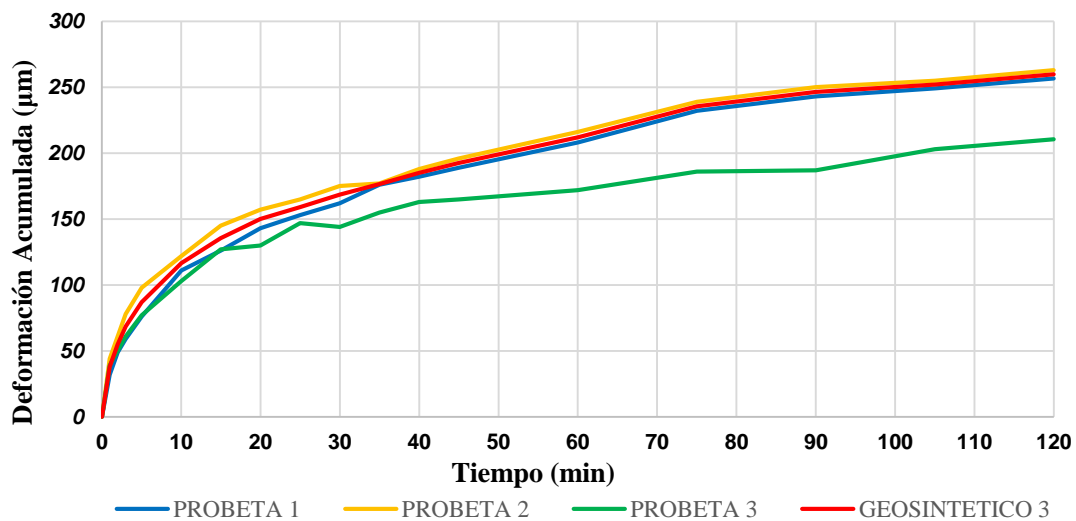
Gráfica 14. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 1

En la Gráfica 14. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 1 se observa el comportamiento de las probetas de MDC-19 reforzadas con la geomalla No 1 la cual está compuesta de fibra de vidrio (GLASS), se mira que la probeta 3 presenta un comportamiento diferente a las demás debido a esto fue descartada en la determinación de la curva característica de las muestras reforzadas con el geosintético No 1.



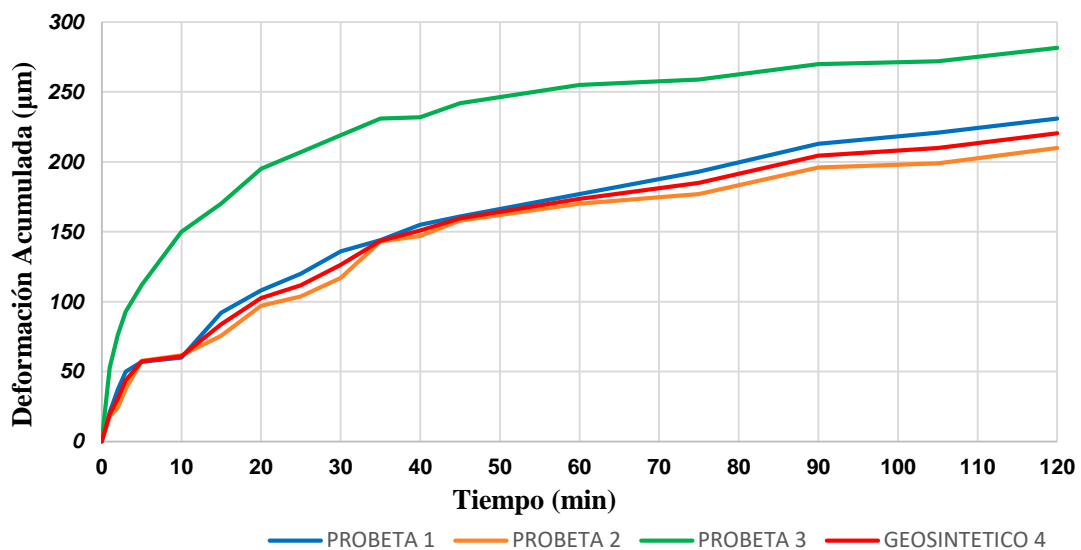
Gráfica 165. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 2.

En la Gráfica 15. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 2., se muestra el comportamiento que se obtuvo con el ensayo de las probetas de MDCD-19 reforzadas con la geomalla No 2 el cual tiene como componente fibra de vidrio (GLASS), se puede observar un comportamiento muy similar entre las probetas 1 y 2 lo que influye notablemente en la determinación de la curva característica de la muestra reforzada con este geosintético.



Gráfica 186. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 3.

En esta Gráfica 16. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 3, se muestra el comportamiento de las probetas de MDC-19 reforzadas con el geosintético No 3, una geomalla biaxial multifilamento hecha de poliéster de alta tenacidad (PET), se observa un comportamiento muy similar entre las probetas 1 y 2, la probeta 3 tiene un comportamiento muy diferente hecho por el cual la curva característica para la muestra reforzada con geosintético 3 está definida por las dos primeras probetas.

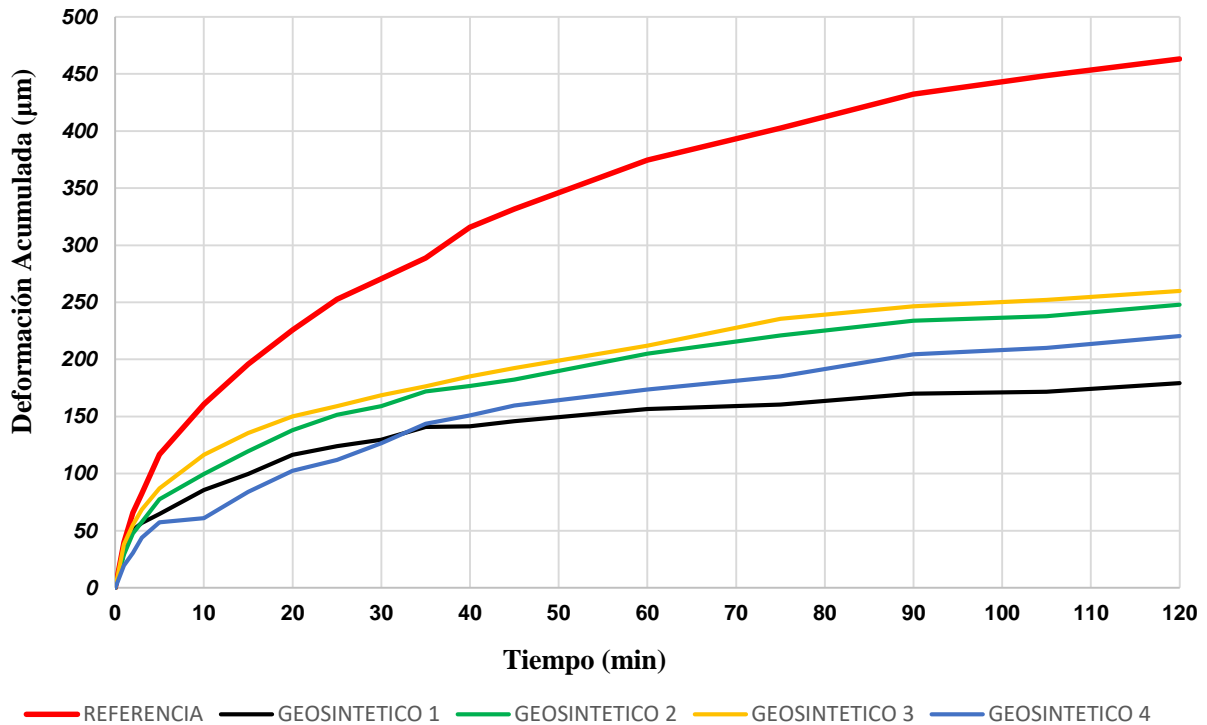


Gráfica17. Deformación Plástica Muestra de Geosintético 4.

En la Gráfica 17 anterior, se observa el comportamiento que tuvieron las probetas de MDC-19 reforzadas con el geosintético No 4 el cual es una geomalla biaxial multifilamento hecha de poliéster de alta tenacidad (PET), se puede observar un comportamiento muy similar entre las probetas 1 y 2, adicional a esto se nota un gran diferencia con la probeta 3 , es por eso que esta probeta no es tenida en cuenta en la determinación de la curva característica de la mezcla MDC-19 reforzada con el geosintético 4.

Del ensayo rueda de Hamburgo se obtuvo la profundidad de ahuellamiento y velocidad de deformación a determinados tiempos de ensayo como lo indica la norma INV-E 756-13 para cada

grupo de muestras, los cuales se graficaron y se compararon obteniendo un menor valor de deformación permanente y una menor velocidad de deformación de las muestras reforzadas con geomallas con respecto a la muestra de referencia lo cual nos indica un mejor comportamiento de las muestras reforzadas frente a las deformaciones permanentes.



Gráfica18. Deformación Acumulada Versus Tiempo de Ensayo

Tabla 7. Deformación de los cuerpos de prueba

Geomalla	Deformación		Material	Tamaño de	Tamaño de	% de	Resistencia
	a 120	min		aberturas	aberturas		
	(mm)			longitudinal	transversal	área	tracción kN/m
				mm	mm	abierta	long/transv
Geosintético 1	1.79		GLASS	18	14	40	100/100
Geosintético 2	2.48		GLASS	20	22	67	50/50
Geosintético 3	2.60		PET	24	26	46	75/75
Geosintético 4	2.21		PET	28	26	55	50/50

En la Gráfica 18. Deformación Acumulada Versus Tiempo de Ensayo. se evidencia una menor deformación acumulada en el grupo de muestras reforzadas con geosintéticos respecto a la muestra de referencia. Se puede observar que el aporte del geosintético funciona desde el inicio del ensayo, las muestras reforzadas que tiene geosintético 1 como refuerzo son las que indican tener más resistencia a la deformación acumulada y menor velocidad de deformación.

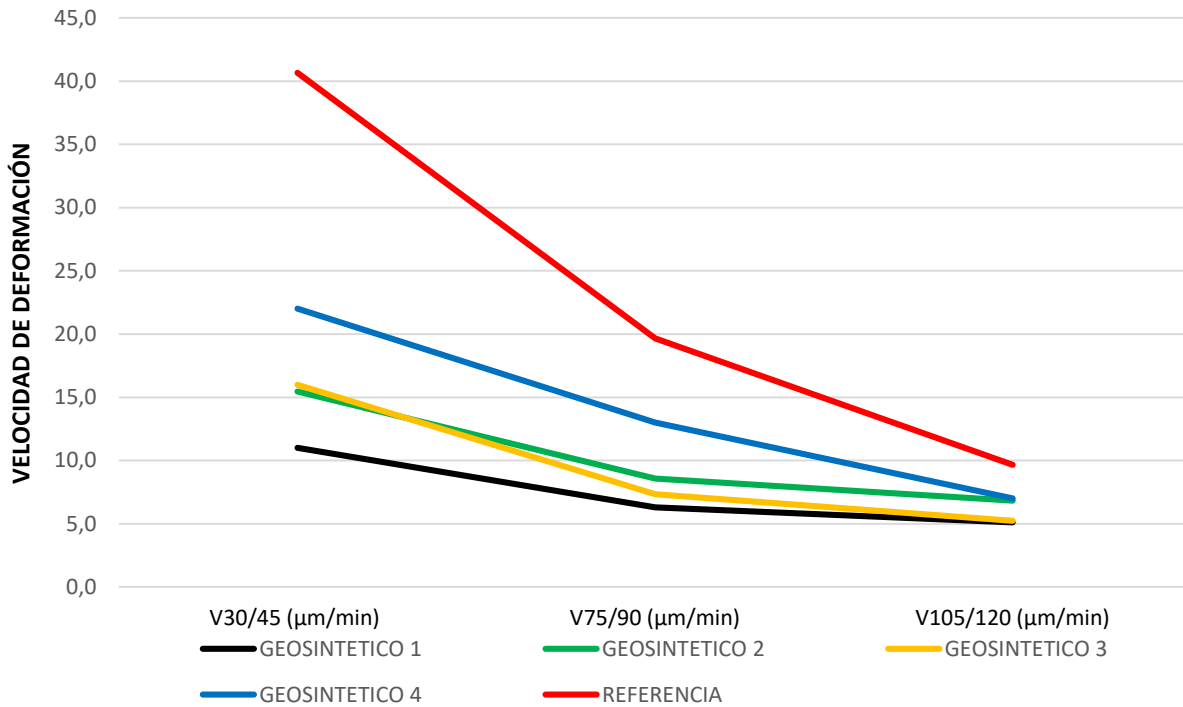
También se observa que el comportamiento de las muestras reforzadas con geosintético 2 de fibra de vidrio y geosintético 3 de poliéster son muy similares y con malla de refuerzo de diferente composición, adicional el geosintético 3 tiene mayor tamaño aberturas en comparación al geosintético 2.

El geosintético 1 de fibra de vidrio es el que tiene mejor comportamiento a las deformaciones plásticas y esta tiene menor valor de abertura y mayor resistencia ultima a la tracción de las cuatro geomallas utilizadas en esta investigación. Se puede ver que estas cualidades tienen gran influencia en el comportamiento a deformaciones permanentes de una mezcla asfáltica reforzada con geomallas.

6.2. Velocidad de deformación de los cuerpos de prueba

En la Gráfica 19. Velocidad versus Deformación, se puede observar que el mejor desempeño lo obtuvo la muestra reforzada con el geosintético 1, según la gráfica la velocidad de deformación con este geosintético es menor en comparación con las velocidades de deformación con los otros geosintéticos implementados; adicional, también se observa que la muestra de referencia obtuvo velocidades de deformación mayores desde su inicio en comparación a las velocidades de deformación de las muestras reforzadas con geosintéticos, lo cual nos indica el aporte del geosintético en las muestras reforzadas desde el inicio del ensayo; de igual manera se observa que el geosintético 4 en el proceso de ensayo tiene las mayores velocidades de deformación con respecto a las demás geomallas empleadas, pero menor a la muestra de referencia esto indica que el aporte del geosintético 4 en estas condiciones de ensayo es menor al aporte entregado por los demás geosintéticos empleados. Estas velocidades de deformación de control son las solicitadas en la norma INVIAS especificación INV-E 756-13.

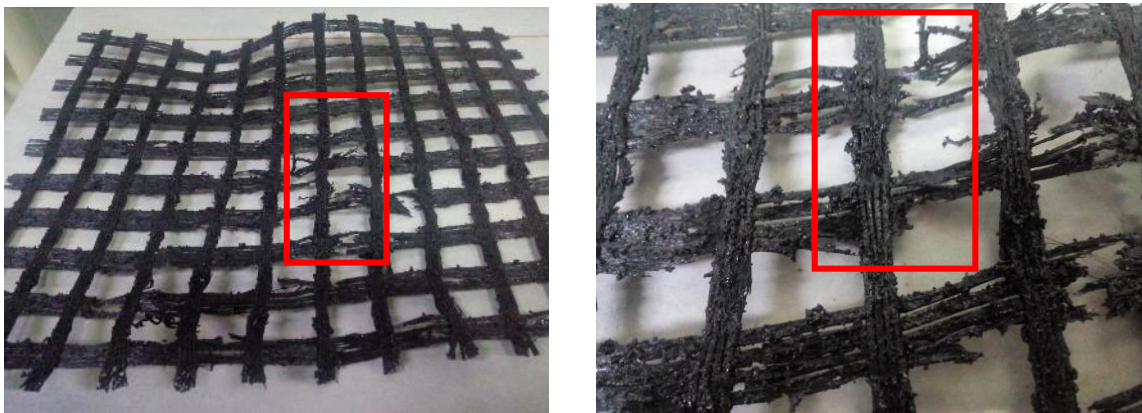
Las velocidades de deformación tomadas en estos intervalos de tiempo, sirven como un indicativo del comportamiento de la mezcla asfáltica y del refuerzo instalado durante el ensayo, en este caso es posible diferenciar el comportamiento durante el ensayo entre los geosintéticos instalados, tienen unas velocidades de deformación inicial mayores y luego estas van disminuyendo en proporciones diferentes esto se debe a las propiedades de los geosintéticos y al grado de acomodo de las partículas con el refuerzo; los cuerpos de prueba que presentaron mayor resistencia al ahuellamiento, da lugar a una menor velocidad de deformación.



Gráfica19. Velocidad versus Deformación.

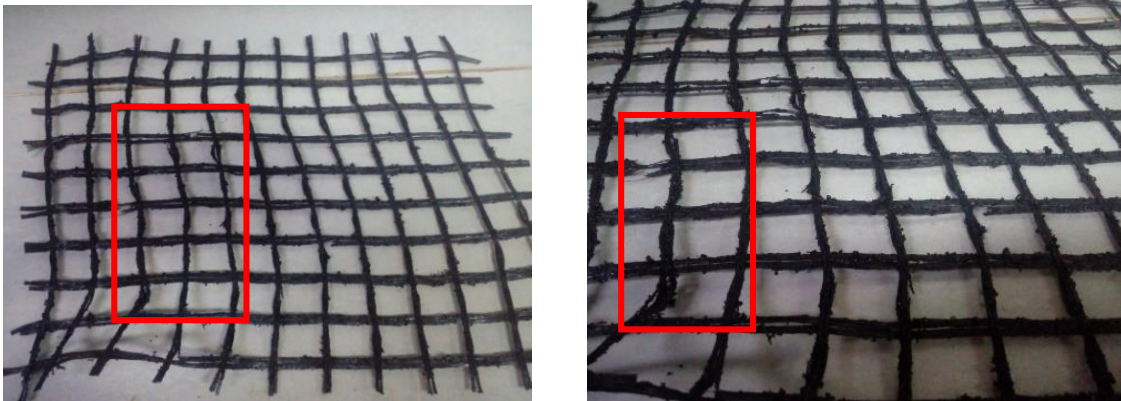
6.3. Análisis visual de los geosintéticos fallados

Por otra parte, para dar claridad al comportamiento de cada uno de los geosintéticos, a continuación, se presenta una evaluación visual del deterioro que presentaron cada uno durante la prueba.



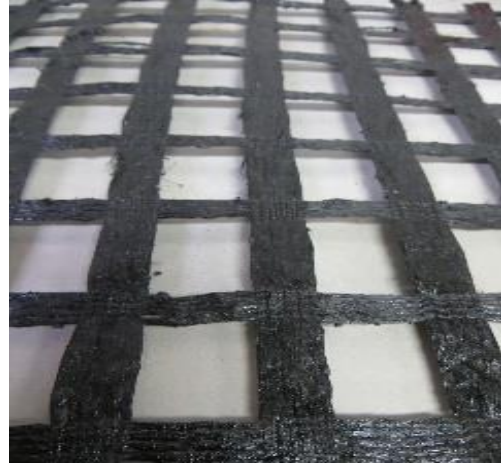
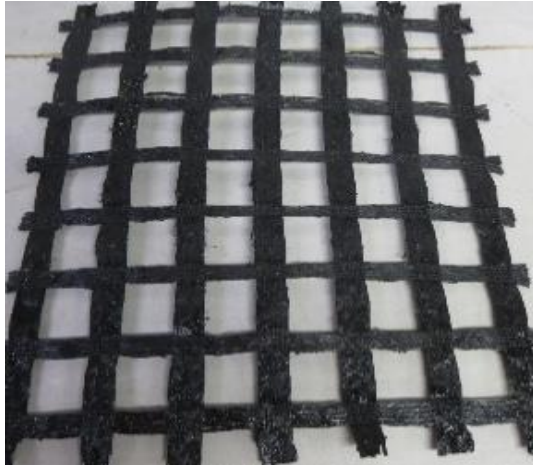
Fotografía 21. Estado Final Geomalla G1 Fibra de Vidrio

En la Fotografía 22. Geomalla 1 se evidencia un gran deterioro de sus fibras, especialmente las fibras transversales, lo cual evidencia el aporte de esta geomalla frente al ensayo de deformación plástica, también puede ser un indicativo de una buena interacción de la mezcla y la geomalla lo cual hizo que el trabajaran en conjunto, una muestra de ello puede ser este daño en el refuerzo.



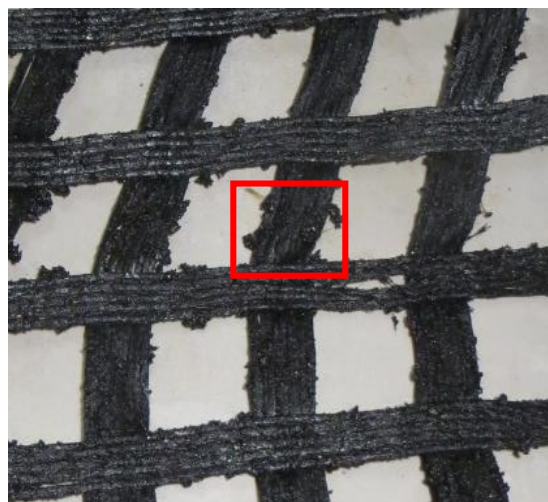
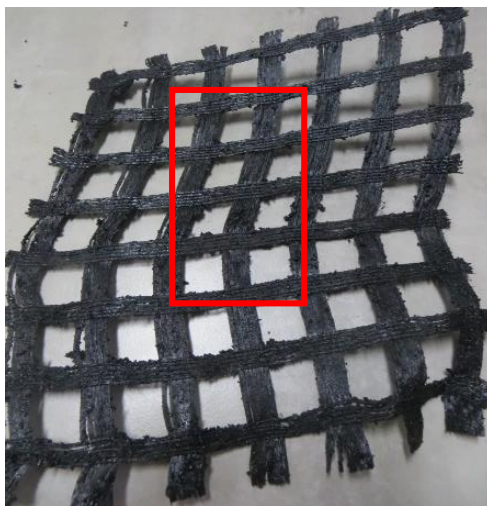
Fotografía 22. Estado Final Geomalla G2 Fibra de Vidrio

La Fotografía 23 muestra el estado de la Geomalla 2 después del ensayo de rueda de Hamburgo, esta geomalla tiene como material de composición fibra de vidrio y presenta un desgaste mayor en las fibras transversales al sentido de la rueda en el ensayo, lo cual indica una mayor sollicitación de estas fibras transversales situación esperada en este tipo de refuerzo, se pudo observar que la geomalla falló por desgarre de sus fibras debido a una fuerza de tracción y no por partidura lo cual indica que el refuerzo funcionó correctamente y se tuvo el cuidado adecuado en la instalación de esta geomalla de fibra de vidrio.



Fotografía 23. Estado Final Geomalla G3 PET

En la Fotografía 24, se indica el estado después de ser sometida al ensayo de rueda de Hamburgo, de la Geomalla 3 hecha de polilester de alta tenacidad que fue utilizada como refuerzo de una capa de MDC-19, se puede observar una degradación menor de sus fibras en comparación a las geomallas en fibra de vidrio anteriores, el ancho de sus fibras es un ancho considerable y similar en ambos sentidos lo cual puede influenciar en el comportamiento de este refuerzo frente a las deformaciones acumuladas.



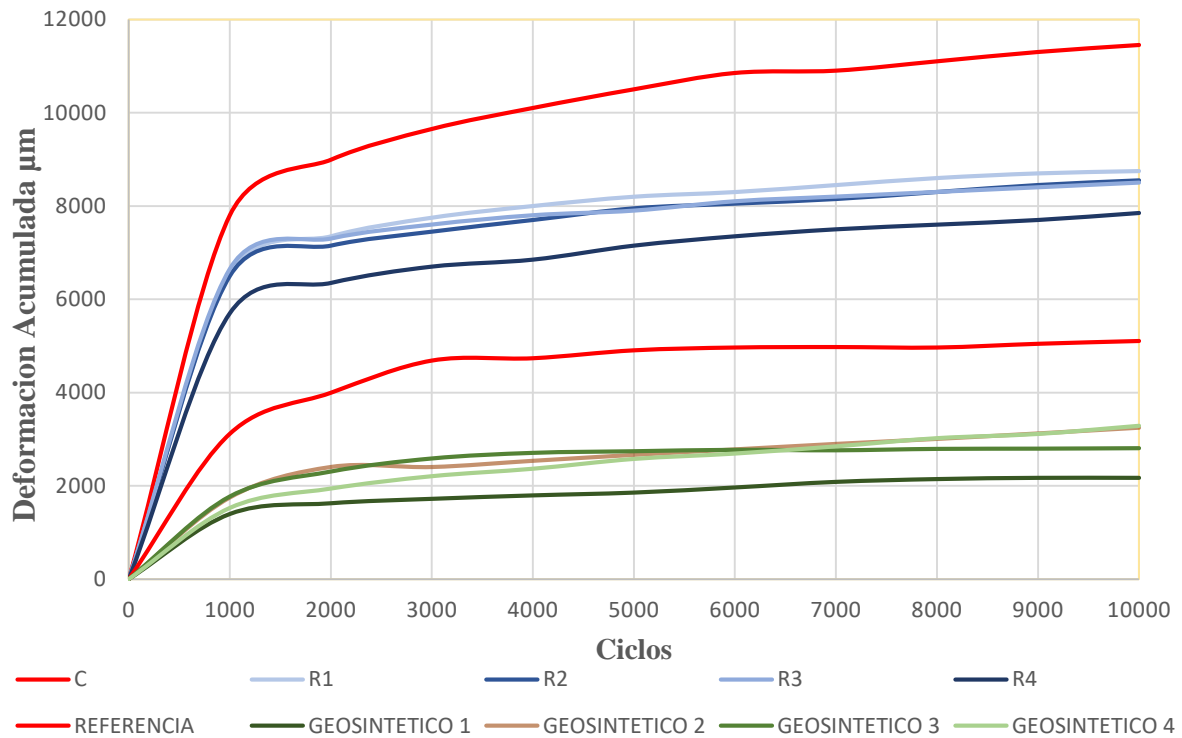
Fotografía 24. Estado Final Geomalla G4 PET

La Fotografía 25 indica el estado de la Geomalla 4 que tiene el mismo material de composición de la geomalla anterior (PET), esta geomalla tiene un ancho de costilla menor a la geomalla anterior y presenta después del ensayo un daño significativo en todas sus fibras, el estado de estas fibras puede ser un indicativo del aporte que tuvo esta geomalla en el ensayo de deformación con la rueda de Hamburgo.

6.4. Análisis de resultados entre la presente investigación y la investigación de Mounes et al 2016.

Como se ha venido desarrollando en la presente investigación, se han evidenciado diferentes investigaciones y cuestionamientos entre el aporte a la resistencia de deformación permanente, que puede ofrecer la instalación de diferentes tipos de geosintéticos en las carpetas de mezcla asfáltica; entre ellas una de las que más brinda aportes a este campo es la investigación de Mounes et al. (2016); Por lo anterior se ha realizado un análisis de resultados entre los hallados en la presente investigación y los evidenciados en la investigación de Mounes et al. (2016), como se muestra a continuación.

La Gráfica 20. Comparación de resultados de este trabajo de grado y el trabajo de Mounes et al. (2016), muestra los resultados de deformación acumulada obtenidos en esta investigación y los obtenidos en la investigación de Mounes et al. (2016). En la gráfica, se puede observar que las geomallas entre las dos investigaciones, tienen comportamientos muy similares a pesar de tener geomallas de diferentes características.



Gráfica 20. Comparación de resultados de este trabajo de grado y el trabajo de Mounes et al.2016

Como se puede observar en las dos situaciones el uso de las geomallas reduce en gran parte las deformaciones acumuladas con respecto a sus respectivas muestras de referencia C y R, para Mounes y referencia para esta investigación. Se evidencia que los resultados obtenidos con Mounes, R1, R2, R3 y R4, presentan mayores deformaciones acumuladas que los resultados de este proyecto G1, G2, G3 y G4, con la característica de tener los dos grupos de prueba un comportamiento similar lo cual se ve reflejado en las curvas de deformación indicadas. La diferencia en el valor de deformaciones acumuladas entre Mounes y el trabajo actual puede deberse a las características de la mezcla asfálticas, ya que Mounes utilizó un agregado de tamaño máximo nominal de 9.5 mm y un asfalto de penetración 80/100 y en este proyecto se utilizó un agregado de tamaño máximo nominal de 12.5 mm y un asfalto de penetración 60/70. Esta diferencia de agregados y tipo de asfalto entre los dos trabajos puede ser el motivo por el cual el trabajo de

Mounes presenta mayores deformaciones respecto a las deformaciones acumuladas presentadas en este presente trabajo.

Adicionalmente se debe indicar la diferencia entre los dos métodos de ensayo utilizados en estos trabajos. Mounes implementó el ensayo uniaxial cíclico para encontrar las deformaciones acumuladas y en este trabajo se utilizó el ensayo de rueda cargada o rueda de Hamburgo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Este trabajo de grado tuvo como objetivo el evaluar la deformación permanente de una mezcla densa en caliente MDC-19 reforzada con geosintéticos, se evaluará mediante el ensayo Rueda de Hamburgo (HWTT) el cual simula las condiciones críticas que se puede someter a los pavimentos asfálticos en nuestro medio, con los resultados obtenidos se pueden inferir las siguientes conclusiones:

- Generalmente el uso de refuerzos geosintéticos en capas asfálticas se hace para prevenir la aparición de grietas provenientes de una capa inferior, pero poco se ha hablado del aporte que se puede tener frente a deformaciones permanentes, en este proyecto se encontró que la muestra reforzada con la geomalla 1, fue aquella que presento menor profundidad de ahuellamiento con respecto a la muestra de referencia, 179 μm y 463 μm respectivamente, teniendo con este geosintético una reducción de deformación plástica del 61%.
- Las muestras reforzadas con los geosintéticos 2, 3 y 4 también tuvieron una reducción de deformación plástica significativa con respecto a la muestra de referencia, teniendo valores de deformación de 248 μm , 260 μm y 221 μm respectivamente y unas reducciones de deformación de 46%, 44% y 52%, estos resultados indican que mediante la implementación de cualquiera de los cuatro refuerzos utilizados se obtiene una reducción de deformación plástica respecto a la muestra de referencia.
- Las aberturas y el material de que están hechas las geomallas infieren su desempeño esto se puede verificar al comparar los resultados obtenidos entre las muestras con geosintéticos 2 y 4, las dos geomallas tienen la misma resistencia ultima a la tracción, la geomalla 2 tiene menor longitud en sus aberturas que la geomalla 4, pero la que tuvo mejor comportamiento fue geomalla 4, la cual está hecha de fibra de vidrio.

- En los resultados obtenidos se tienen las velocidades de deformación de las diferentes muestras reforzadas y de referencia, los datos obtenidos muestran una reducción de la velocidad de deformación de todas las muestras de reforzadas y desde el primer intervalo de tiempo, con respecto a la de muestra de referencia, lo que nos lleva a decir que el geosintético empieza a trabajar desde el primer momento que se empieza a cargar la capa asfáltica.

7.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

Con el desarrollo de este trabajo se pueden hacer las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras:

- Estudiar el comportamiento de los geosintéticos implementados en profundidades diferentes dentro de una capa asfáltica.
- Tomar tramos de prueba donde se permita evaluar las propiedades de los geosintéticos, en el comportamiento de un pavimento en asfalto.
- Evaluar el daño mecánico que presentan los geosintéticos después de ser sometidos a los ensayos de carga cíclica y/o al ser utilizados como refuerzo en un tramo experimental.
- Realizar ensayos utilizando diferentes tipos de mezclas asfálticas, con diferentes espesores y con la colocación del refuerzo a diferentes profundidades.
- Realizar ensayos de prueba utilizando diferentes tipos de geosintéticos, colocados a diferentes profundidades de los cuerpos de prueba.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO T 324. (2017). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*, AASHTO.
- Angelone, S.; Martínez, F.; Santamaria, E.; Gavilán, E. y Chaupé, M. (2006). *Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas. Reporte Técnico RT-ID-06-02*, Laboratorio Vial; Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Carrera Investigador Científico, Universidad del Rosario, Argentina, 67p.
- Austin, R.A. y Gilchrist, A., J.T. Enhanced performance of asphalt pavements using geocomposites. *Geotextiles and Geomembranes*. 1996, 14, pp. 175-186.
- Bertulienė, L.; Oginskas, R. y Bulevici, M. (2011). *Research of Rut Depth Asphalt Pavements Reinforced with Geosynthetic Materials*. Lithuania: Environmental Engineering.
- Button, J.W. y Lytton, R. L. (2007). Guidelines for using geosynthetics with hot-mix asphalt overlays to reduce reflective cracking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2004, Washington, D.C. p. 111–119.
- Correia, N.S. (2014). *Performance of flexible pavements enhanced using geogrid-reinforced asphalt overlays*. (Tese de Doutorado), Programa de Pós-Graduação na Área de concentração em Geotecnia, Escola de Engenharia de Sao Carlos da Universidade de Sao Paulo, Sao Carlos, SP, 205p.
- Correia, N.S. y Zornberg, J.G. (2016). *Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays*. *Geosynthetics International*, pp.183 - 193.
- Derechos Reservados PAVCO, Geosistemas (2012). *Manual de Diseño con Geosintéticos*. 9a ed., junio del 2012., Bogotá D.C. – Colombia: Norte Gráfico, p.474.

- Delbono, H.L. y Rebollo, O.R. (2017). *Ahuellamiento en Pavimentos Asfálticos Utilizando Geosintéticos*. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín -Colombia.
- Instituto Nacional De Vías. INV 450-13. (2013). *Mezclas asfálticas en caliente de gradación continúa*, INVIAS, Colombia.
- _____. INV.E-125. (2013). *Determinación de limite liquido de los suelos*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-126. (2013). *Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-133. (2013). *Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-218 (2013). *Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%)*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-220 (2013). *Perdidas de ensayo de solidez en sulfato de Magnesio agregado fino y grueso, máximo (%)*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-224 (2013). *Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de rodadura*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-227 (2013). *Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-232 (2013). *Coeficiente de pulimiento acelerado para rodadura mínimo*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-235 (2013). *Valor de azul de metileno en agregados finos*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.

- _____. INV.E-237 (2013). *Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-238 (2013). *Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval máximo (%)*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-239 (2013). *Determinación de contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-240 (2013). *Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-725 (2013). *Evaluación de susceptibilidad al agude de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-730 (2013). *Muestreo aleatorio de materiales de construcción de carreteras*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-741 (2013). *Espesor de película de asfalto en mezclas bituminosas*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-745 (2013). *Concentración crítica de llenante en mezclas de concreto asfáltico*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-748 (2013). *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- _____. INV.E-799 (2013). *Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.

- _____. INV.E-800 (2013). *Resistencia mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall sobre probetas de 152.4 milímetros (6 pulgadas) de diámetro*. Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- Iskakbayev, A.; Teltayev, B. y Oliveri, C. (2017). *Steady - State Creep of Asphalt Concrete. Applied sciences*, 13.
- Khodaii, A.; Fallah S. y Moghadas Nejad F. *Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays. Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27, pp. 187–195.
- Laurinavičius, A. y Oginskas, R. Experimental research on the development of rutting in asphalt concrete pavements reinforced with geosynthetic materials. *Journal of civil engineering and management*, 2006, 311-317.
- Lee, J.; Kimb, R. y Leec, J. Rutting performance evaluation of asphalt mix with different types of geosynthetics using MMLS3. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013.
- Leiva, F.; Pérez, E.; Aguilar, J. y Loria, L. (2017). *Permanent deformation model for pavement. Ingeniería de construcción*, 11.
- Lopes, M.P.; Lopes, M. de L. (2010). *A durabilidade dos geossintéticos, primeira edição*. FEUP edições, Porto – Portugal, 294 p.
- Lotti, C.L. y Bueno, B.S. (2015). *Manual Brasileiro de Geossintéticos - Capítulo 2 Matérias Primas*. 2a ed. Editora Edgar Blucher Ltda, Sao Paulo - SP, Brasil. 413 p.
- Lubinda F.; Jun Z.; Gautam D.; Xiaodi H.; Charles M.; Allex A. y Thomas S. *Deformación Permanente en Mezclas asfálticas evaluada por Rueda De Hamburgo, Módulo Dinámico y Pruebas de carga repetidas*.
- Lytton, R. L. Use of Geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete. *Geotextiles and Geomembranes. Texas*, 1989, 8, pp. 217-237.

- Mounes, S.M.; Karim, M.R.; Ali, K. y Almasi, M.H. (2016). Evaluation of permanent deformation of geogrid reinforced asphalt concrete using dynamic creep test. *Getext. Geomembranes*, 44(1): 109 - 116.
- Morea, F. (2011). Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. (Tese de Doctorado). Departamento de construcciones, Universidade Nacional de la Plata, Argentina.
- Obando, J., R.A. (2016). *Desempenho de misturas asfálticas reforçadas com geossintéticos*. (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Pasquini, E.; Bocci, M.; Ferrotti, G. y Canestrari. Laboratory characterization and field validation of geogrid-reinforced asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 2013, 14(1), 17-35.
- Ricci, L.A. (2011). Evaluación de la adherencia entre capas asfálticas con intercapa de geosintético. (Tesis en Magister en Ingeniería del Transporte - Orientación Vial). Universidad de Buenos Aires.
- Saraf, C.; Majidzadeh, K.; Tribbett, W. Effect of reinforcement on fatigue life of asphalt beams. *Journal of Transportation Research Board*, 1534 (-1), 1996, pp. 66-71.
- Shukla, S.K. (2002). *Geosynthetics and their applications*. Thomas Telford Ltd, London, UK.