



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT

Informe final mezcla modificada con Arena Sintética Fase I y II proyecto: UIIT-2020-01
Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezclas con materiales de desecho

Preparado por:

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte

San José, Costa Rica

Febrero, 2025

Código Postal 11501-2060, Universidad de Costa Rica | Tel: (506) 2511-2500

direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr



1. Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT		2. Copia No 1
3. Título y subtítulo: INFORME FINAL MEZCLA MODIFICADA CON ARENA SINTÉTICA FASE I Y II PROYECTO: UIIT-2020-01 DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MEZCLAS CON MATERIALES DE DESECHO		4. Fecha del Informe Enero 2025
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias: Para detalles complementarios se tienen los informes INF-1473-2022 y INF-0650-2024		
7. Resumen <i>El presente informe presenta los resultados obtenidos en la fase I y II de carga del proyecto de construcción y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica modificada con arena sintética, un material derivado de plásticos reciclados. Este enfoque busca contribuir a la reducción de la contaminación por plásticos no valorizables y promover la economía circular, a la vez que ofrece una posible alternativa para la fabricación de productos prefabricados y concretos.</i> <i>Para evaluar el comportamiento de la mezcla, se construyeron 2 secciones de prueba a escala real en las instalaciones del LanammeUCR (1 tramo se evaluó a temperatura ambiente y otro tramo acondicionado) para comparar con un tramo de control, siguiendo las normativas y prácticas nacionales de diseño, fabricación y construcción. Los tramos fueron sometidos a ensayos acelerados utilizando el simulador de vehículos pesados, HVS modelo MARK VI de la casa Dynatest. En la fase I, se aplicaron 3,1 millones de ejes equivalentes de carga (ESAL) en 10 semanas, con un promedio de 20 000 aplicaciones de carga bidireccional cada 24 horas por tramo. En la fase II, se aplicaron 5,9 millones de ejes equivalentes de carga (ESAL) en 8 semanas, manteniendo el mismo promedio de carga de la fase I.</i> <i>La evaluación de los tramos se realizó mediante un análisis estructural al inicio y al final del ensayo, utilizando herramientas como el deflectómetro de impacto (FWD), perfilómetro láser y el péndulo inglés para medir la fricción. Además, se efectuó un seguimiento visual y fotográfico, así como el monitoreo del ahuellamiento, el IRI y las deflexiones mediante el perfilómetro láser del HVS y el deflectómetro de superficie (RSD).</i> <i>Los resultados de las fases I y II de carga revelaron que las mezclas asfálticas modificadas mantienen un buen comportamiento frente a las cargas, con un desempeño sostenido a lo largo del tiempo.</i>		
8. Palabras clave HVS, Ensayo acelerado de pavimentos, Pavimentos, Desempeño, Materiales Reciclados, arena sintética.	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 65
11. Preparado por:	12. Revisado por:	13. Revisado y aprobado por:
	Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Coordinador Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte	Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc. Coordinador General PITRA



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	LanammeUCR	10
1.2	Experiencias internacionales	10
1.2.1	Dosificaciones y tamaños típicos utilizados de material reciclado	11
1.2.2	Modo de incorporación en planta.....	12
1.2.3	Detalles constructivos y de diseño	13
1.3	Contexto nacional	13
2	OBJETIVOS Y ALCANCE	14
2.1	Objetivo General.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
2.3	Alcance	14
3	ESQUEMA EXPERIMENTAL.....	15
3.1	Ubicación y distribución de los tramos.....	15
3.2	Descripción de los ensayos y mediciones a realizar	18
3.2.1	Ensayo a Escala con el Simulador de Vehículos Pesados	18
3.2.2	Esquema de carga	19
3.3	Mediciones realizadas durante el ensayo acelerado	19
3.4	Acondicionamiento para tramos de estudio.....	24
4	ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS Y CARACTERIZACION DE MATERIALES	25
4.1	Diseño preliminar y respuestas mecánicas esperadas.....	26
4.2	Diseño original de la mezcla asfáltica.....	28
5	RESULTADOS	28
5.1	Descripción inicial general de los tramos.....	28
5.1.1	Capacidad estructural	28
5.1.2	Parámetro de resistencia al deslizamiento	35
5.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	37

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 4 de 70
--	------------	----------------



5.2.1	Deflectometría.....	37
5.2.2	Deformación Permanente	41
5.2.3	Índice de rugosidad internacional (IRI)	48
5.2.4	Resistencia al deslizamiento.....	50
5.2.5	Análisis de módulos retrocalculados.....	53
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
8	ANEXOS.....	66
8.1	Anexo 1: Esquema de ensayo	66
8.2	Anexo 2: Retrocálculo de módulos	69



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL EDIFICIO C DE LANAMMEUCR; MONTES DE OCA, SAN JOSÉ, COSTA RICA (9.9358591°N, -84.0446636°O). FUENTE: GOOGLE EARTH, 2020.....	16
FIGURA 2. VISTA EN PLANTA DEL ESPACIO DONDE SE ENCUENTRAN LOCALIZADOS LOS TRAMOS (COTAS EN METROS) Y UBICACIÓN DE TRAMOS.	17
FIGURA 3. SIMULADOR DE VEHÍCULOS PESADOS, HVS MARK VI DE DYNATEST.....	18
FIGURA 4. PERFILÓMETRO LÁSER.....	20
FIGURA 5. EJEMPLO DE MATRIZ DE DATOS DE DEFORMACIÓN.	20
FIGURA 6. ENSAYOS DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO.	21
FIGURA 7. DEFLECTÓMETRO DE SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.....	22
FIGURA 8. EJEMPLO DE DEFLEXIÓN MEDIDA Y DEFLEXIÓN MODELADA.	23
FIGURA 9. EJEMPLO DE MONITOREO Y DEMARCACIÓN DE AGRIETAMIENTO EN TRAMO DE PRUEBA.	24
FIGURA 10. CÁMARA CLIMÁTICA PARA CONDICIONAMIENTO TÉRMICO.....	25
FIGURA 11. ESTRUCTURA DE LOS TRAMOS EXPERIMENTALES.....	26
FIGURA 12. PUNTOS DE EVALUACIÓN CON EL FWD.	29
FIGURA 13. DEFLEXIÓN D_0 (BAJO PLATO DE CARGA) PARA TRAMOS MODIFICADOS CON ARENA SINTÉTICA (ESTADO:INICIAL).....	30
FIGURA 14. TRAMOS DE CONTROL Y CON ARENA SINTÉTICA EN CONDICIÓN INICIAL VS CONDICIÓN FINAL DE CADA FASE.	39
FIGURA 15. DEFORMACIÓN. TRAMO 015 Y 018. FASE 1 Y FASE 2	42
EN LA FIGURA 16 Y FIGURA 17. SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN DEL AHUELLAMIENTO MÁXIMO ABSOLUTO Y DEL AHUELLAMIENTO PROMEDIO, RESPECTIVAMENTE, PARA EL TRAMO 0T18 DURANTE LAS FASES I Y II DE CARGA. LA FIGURA 18 ILUSTR A LA EVOLUCIÓN DEL AHUELLAMIENTO MÁXIMO LONGITUDINAL PROMEDIO, EN CONCORDANCIA CON EL PERFIL DE LA FIGURA 15 , ESTO PERMITE OBSERVAR DE MANERA DETALLADA LOS CAMBIOS EN EL AHUELLAMIENTO SOBRE EL TRAMO.....	42
FIGURA 16. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO MÁXIMO ABSOLUTO. TRAMO 018, FASE 1 Y FASE 2	43
FIGURA 17. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO MÁXIMO LONGITUDINAL DEL PROMEDIO. TRAMO 018, FASE 1 Y FASE 2	44
FIGURA 18. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO PROMEDIO. TRAMO 018, FASE 1 Y FASE 2.....	44
FIGURA 19. DEFORMACIÓN. TRAMO 019 Y 022. FASE 1 Y FASE 2	45

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 6 de 70
--	------------	----------------



EN LAS **FIGURA 20** Y **FIGURA 21** SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN DEL AHUELLAMIENTO MÁXIMO ABSOLUTO Y DEL AHUELLAMIENTO PROMEDIO, RESPECTIVAMENTE, PARA EL TRAMO 022 DURANTE LAS FASES I Y II DE CARGA. LA **FIGURA 22** ILUSTR A LA EVOLUCIÓN DEL AHUELLAMIENTO MÁXIMO LONGITUDINAL PROMEDIO, EN CONCORDANCIA CON EL PERFIL DE LA **FIGURA 19**, ESTO PERMITE OBSERVAR DE MANERA DETALLADA LOS CAMBIOS EN EL AHUELLAMIENTO SOBRE EL TRAMO. DURANTE LA FASE I, QUE CUBRE EL INTERVALO DE 0 A 3 102 686 ESAL, SE REGISTRARON VALORES DE AHUELLAMIENTO QUE COMENZARON EN 0,00 MM, AUMENTANDO GRADUALMENTE HASTA ALCANZAR UN VALOR DE 7,85 MM A MEDIDA QUE SE ALCANZÓ LA FASE I DE CARGA. A PARTIR DE LA FASE II, QUE COMENZÓ EN 3 102 686 ESAL HASTA 9 014 093, SE EVIDENCIÓ UNA TENDENCIA DE AUMENTO EN LOS VALORES DE AHUELLAMIENTO, ALCANZANDO UN VALOR MÁXIMO DE 11,10 MM HACIA EL FINAL DE LA FASE. EL CUAL FUE CERCANO AL LÍMITE SUPERIOR DEFINIDO DE 12 MM. 46

FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO MÁXIMO ABSOLUTO. TRAMO 022, FASE 1 Y FASE 2 46

FIGURA 21. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO MÁXIMO LONGITUDINAL PROMEDIO. TRAMO 022, FASE 1 Y FASE 2 47

FIGURA 22. EVOLUCIÓN DE AHUELLAMIENTO PROMEDIO. TRAMO 022, FASE 1 Y FASE 2 47

EN LA **FIGURA 23** Y **FIGURA 24** SE MUESTRA LA EVOLUCIÓN DEL IRI PARA EL TRAMO 018, EL CUAL INICIO EN 4,2 M/KM PARA EL VALOR PROMEDIO Y DISMINUYO HASTA LOS 3,71 M/KM. EN LAS **FIGURA 25** Y **FIGURA 26** SE MUESTRA LOS RESULTADOS DE TRAMO 022, CUYO VALOR PROMEDIO DE INICIO FUE 1,80 M/KM Y FINAL DE 2,61 M/KM. 48

FIGURA 23. EVOLUCIÓN DEL IRI PROMEDIO. TRAMO 018, FASE 1 Y FASE 2 48

FIGURA 24. EVOLUCIÓN DEL IRI MÁXIMO. TRAMO 018, FASE 1 Y FASE 2 48

FIGURA 25. EVOLUCIÓN DEL IRI PROMEDIO. TRAMO 022, FASE 1 Y FASE 2 49

FIGURA 26. EVOLUCIÓN DEL IRI MÁXIMO. TRAMO 022, FASE 1 Y FASE 2 49

EN LA **TABLA 11**, **FIGURA 27** Y **FIGURA 28** SE MUESTRAN LOS VALORES RESUMEN PARA LA CONDICIÓN INICIAL, FINAL DE LA FASE I Y FINAL DE LA FASE II. ES DE APRECIAR QUE DESPUÉS DE LA PRIMERA FASE DE CARGA AMBOS TRAMOS PRESENTARON UNA REDUCCIÓN IMPORTANTE DE FRICCIÓN, SIN EMBARGO, EL QUE PRESENTA LA MAYOR REDUCCIÓN CORRESPONDE A LA MEZCLA ASFÁLTICA CON ARENA SINTÉTICA EN SU CONDICIÓN SIN ACONDICIONAMIENTO CON UNA REDUCCIÓN DEL 39 %, SIN EMBARGO, ESTE VALOR AL FINAL DE LA FASE II DE CARGA SE MANTUVO SIN CAMBIOS. MIENTRAS QUE, EN EL CASO DE SU CONTRAPARTE ACONDICIONADA, SI BIEN PRESENTÓ UNA REDUCCIÓN MENOR AL FINAL DE LA FASE I CORRESPONDIENTE AL 20,7 %, AL FINAL DE LA FASE II SU VALOR AUMENTO, ESTO SIN REPRESENTAR GRANDES VARIACIONES. 50

FIGURA 27. FRICCIÓN TRAMO 022 CON ARENA SINTÉTICA. 51

FIGURA 28. RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE FRICCIÓN, PÉNDULO INGLES. 53

FIGURA 29. RESULTADOS TRAMO 018 HMA SIN ACONDICIONAMIENTO 55

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 7 de 70
--	------------	----------------



FIGURA 30. RESULTADOS TRAMO 022 HMA CON ACONDICIONAMIENTO.....	55
FIGURA 31. RESULTADOS TRAMO 018 BG SIN ACONDICIONAMIENTO	56
FIGURA 32. RESULTADOS TRAMO 022 BG CON ACONDICIONAMIENTO	56
FIGURA 33. RESULTADOS TRAMO 018 SBG SIN ACONDICIONAMIENTO.....	57
FIGURA 34. RESULTADOS TRAMO 022 SBG CON ACONDICIONAMIENTO	57
FIGURA 35. RESULTADOS TRAMO 018 SR SIN ACONDICIONAMIENTO	58
FIGURA 36. RESULTADOS TRAMO 022 SR CON ACONDICIONAMIENTO.....	58



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES PAQUETE ESTRUCTURAL PROPUESTO.....	27
TABLA 2. RESPUESTAS TEÓRICAS ESTIMADAS.....	27
TABLA 3. ESTADOS DE COMPORTAMIENTO PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO CON BASES GRANULARES.	33
TABLA 4. NIVELES DE CONDICIÓN ESTRUCTURAL O BENCHMARKING (BM) POR MEDIO DE PARÁMETROS DE CUENCO DE DEFLEXIONES.	34
TABLA 5. RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON ARENA SINTÉTICA (INICIAL).	35
TABLA 6. VALORES RECOMENDADOS DE PTV PARA EL PÉNDULO INGLÉS.....	35
TABLA 7. CLASIFICACIÓN PARA VALORES PTV DEL PÉNDULO INGLÉS.	36
TABLA 8. CLASIFICACIÓN DE LAS MEDICIONES CON PÉNDULO INGLÉS AL INICIO DEL ENSAYO	36
TABLA 9. RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON ARENA SINTÉTICA, SIN TEMPERATURA. DESDE EL INICIO DE LA FASE I HASTA EL FINAL DE LA FASE II.	39
TABLA 10. RESUMEN DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES PARA TRAMOS MODIFICADOS CON ARENA SINTÉTICA, CON TEMPERATURA. DESDE EL INICIO DE LA FASE I HASTA EL FINAL DE LA FASE II.	40
TABLA 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FRICCIÓN ENTRE FASE I Y FASE II.....	52
TABLA 12. RETROCÁLCULO DE MÓDULOS PARA LOS TRAMOS MODIFICADOS CON ARENA SINTÉTICA	53
TABLA 13. DATOS PARA RETROCALCULO DE MODULO FINAL PARA EL TRAMO 18	69
TABLA 14. DATOS PARA RETROCALCULO DE MODULO FINAL PARA EL TRAMO 22	70



1 INTRODUCCIÓN

1.1 LanammeUCR

Este proyecto de investigación se circunscribe dentro de la línea de la sostenibilidad ambiental que persigue el cumplimiento de la Meta Carbono Neutralidad del país. Se pretende destacar los beneficios del uso de nuevas técnicas que contribuyen al desarrollo sostenible, a la economía del país y que a su vez impactan positivamente el desempeño de los materiales, como es el caso de las carreteras con superficies asfálticas.

Los tramos de prueba experimentales de mezcla asfáltica con materiales de desecho fueron contruidos en el Edificio C del Lanamme de la Universidad de Costa Rica en San Pedro de Montes de Oca en Costa Rica el 20 de septiembre del 2019

El edificio de referencia cuenta con una zona dispuesta para ensayos acelerados en pavimentos, y es donde se construyeron las pistas de ensayo. Este espacio cuenta con las dimensiones suficientes para permitir la construcción de múltiples tramos experimentales y también albergar al Simulador de Vehículos pesados HVS durante el desarrollo del experimento.

Los tramos se localizan en un área pavimentada de forma rectangular, con una superficie de 180,73 metros cuadrados y una profundidad que varía entre los 2,55 metros y los 2,75 metros. Se realizó la construcción de tres franjas con dimensiones de 2,05 m de ancho y 22,04 m que contienen seis tramos experimentales a evaluar.

La siguiente figura presenta un diagrama de la configuración y distribución de los tramos de evaluación dentro del área de estudio.

En la primera fase de carga (Fase I) se contemplan aproximadamente 3,1 millones de ESAL, posteriormente, en la segunda fase de carga (Fase II) se aplicó 5,9 millones de ESAL adicionales, lo que llevó las estructuras ensayadas a un total de 9 millones de ESAL.

1.2 Experiencias internacionales

En esta sección se exponen las experiencias recopiladas con respecto al diseño de mezclas bituminosas que incluyen plástico como sustituto de un porcentaje del agregado mineral. Se presentan resultados obtenidos de múltiples proyectos desarrollados en distintos países como Reino Unido, Malasia, Indonesia e Irán.

En el Reino Unido, se utilizó el polietileno de baja densidad reciclado sustituyendo hasta una porción máxima de 30% de agregado entre dos tamaños específicos (2,36 mm a 5 mm). Dependiendo del tamaño de las partículas y un diseño apropiado, se obtuvieron mezclas menos susceptibles al envejecimiento y agrietamiento, además el rendimiento de producción tuvo un incremento. (Zoorob y Suparma, 2000). Los resultados permiten concluir que la producción de mezclas asfálticas con plástico es viable sin necesidad de modificar

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 10 de 70
--	------------	-----------------



las plantas de producción actuales. Respecto a la mezcla asfáltica, se obtuvo mejores parámetros de estabilidad Marshall, gravedades específicas menores y mayor resistencia ante la deformación permanente, al ser comparadas con mezclas convencionales (no modificadas).

En Malasia se han utilizados plásticos de Tereftalato de Polietileno (PET por sus siglas en inglés) y Polietileno Reciclado de Alta Densidad (PEAD o HDPE por sus siglas en inglés) para sustituir desde el 5 % hasta el 25 % del agregado mineral con tamaños entre 1,18 mm y 3,36 mm para el plástico PEAD y 1,18 mm y 2,36 mm para el plástico PET en una mezcla asfáltica. Dentro de los resultados obtenidos se incluyen mejoras en el desempeño a fatiga y a deformación permanente. Además, las mezclas asfálticas con sustitución del 15% y 20% mostraron un aumento de rigidez al ser comparadas con una mezcla convencional (Rahman *et al*, 2014). De acuerdo con Moghaddam, *et al*, (2013), la vida a fatiga de las mezclas asfálticas con botellas plásticas es más larga en comparación con la mezcla no modificada. La flexibilidad de las mezclas se incrementa posponiendo la creación de grietas y su propagación.

En Indonesia se realizaron proyectos que buscaban sustituir hasta un 100 % del agregado mineral entre las mallas N° 30 y N° 40. El esquema experimental se centra en el análisis exhaustivo de la mezcla con el 25 % de sustitución del agregado mineral, debido a que cumplía con las especificaciones del diseño de mezcla para Indonesia (Aschuri *et al.*, 2016). Dentro de los resultados obtenidos para esta mezcla se identificó mejoras en la rigidez, estabilidad Marshall, resistencia a la deformación permanente y resistencia ante el daño por humedad. Con base en los resultados los autores recomiendan la utilización de la mezcla para capa de rodamiento.

Del proyecto en Irán, se tiene el uso del plástico PET para sustituciones del 20 % al 60 % del agregado mineral entre los 2,36mm y 4,75 mm. En este caso, se observa que las mezclas asfálticas con plástico presentan una disminución de su gravedad específica en comparación con las mezclas convencionales. Los resultados mostraron una disminución en la estabilidad de Marshall y un aumento en el flujo en las mezclas con plástico (Hassani, Ganjidoust y Maghnaki, 2005).

1.2.1 Dosificaciones y tamaños típicos utilizados de material reciclado

En vista de la experiencia anterior, se resume a continuación las dosificaciones y tamaños utilizados internacionalmente, del plástico como sustituto de un porcentaje del agregado mineral en una mezcla asfáltica:

- Reemplazo con plástico del 30 % del volumen del agregado entre 2,36 mm (Malla N° 8) y 5 mm (Malla N° 4) (Zoorob y Suparma, 2000).

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 11 de 70
--	------------	-----------------



- Reemplazo con plástico del 5 % hasta el 25% del peso de la mezcla asfáltica. El tamaño del plástico es de aproximadamente 2 mm, por lo que sustituye el agregado mineral entre las mallas 3,36 mm (Malla N° 8) y 1,18 mm (Malla N° 16) (Rahman et al., 2014).
- Reemplazo con plástico del 5 % hasta el 25 % del peso de la mezcla asfáltica. Se sustituye el agregado mineral entre las mallas 3,36 mm (Malla N° 6) y 1,18 mm (Malla N° 16) (Rahman et al, 2014).
- Reemplazo con plástico del 25 %, 50 % y hasta 100 % del peso agregado mineral pasando la malla N° 30 y retenido en la malla N° 40 (Aschuri, et al. 2016).
- Reemplazo con plástico del 20 % hasta el 60 % por volumen del agregado mineral entre 2,36 mm (Malla N° 8) y 4,75 mm (Malla N° 4). El tamaño del plástico triturado es de aproximadamente 3 mm (Hassani et al., 2005).

1.2.2 Modo de incorporación en planta

De acuerdo con Zoorob y Suparma (2000), uno de los beneficios del uso de la técnica de sustitución del agregado mineral por plástico, corresponde a que no se requiere de la modificación de las plantas de producción de mezclas asfálticas existentes para la incorporación del plástico. Por tal razón, la fabricación de este tipo de mezclas puede realizarse con los procedimientos estándares, en donde solo se requiere la sustitución del porcentaje correspondiente del agregado mineral del tamaño definido por plástico antes del proceso de mezclado con el asfalto.

Un factor importante que se debe controlar en el diseño de estas mezclas es la temperatura. Dependiendo de las características del plástico utilizado la temperatura podrá causar su derretimiento, afectando la trabajabilidad de la mezcla. Lo más recomendable es utilizar una temperatura en donde el plástico se encuentre cerca de su punto de fusión antes de la compactación, ya que esto logra una mejor adherencia entre el plástico y el agregado, generando una mezcla más fuerte (Zoorob y Suparma, 2000).

La desventaja de controlar la temperatura en términos del punto de fusión del plástico es que el plástico presente un punto de fusión bajo, de modo que al trabajar con temperaturas bajas durante el proceso de mezclado, la viscosidad del ligante asfáltico puede verse afectada, por lo que en este tipo de mezcla debe buscarse una temperatura de balance entre ambas propiedades de los materiales (plástico y asfalto). Por lo general, se da un sacrificio en la viscosidad del ligante para lograr la producción de este tipo de mezclas asfálticas (Zoorob y Suparma, 2000).



1.2.3 Detalles constructivos y de diseño

Dentro de los resultados que pueden esperarse, según la literatura, en el comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas al realizar la sustitución de un porcentaje del agregado mineral por plástico, se encuentran:

- Aumento en la resistencia ante la deformación permanente.
- Mejor desempeño en la resistencia al agrietamiento por fatiga
- Mayor resistencia al daño por humedad.
- Mayor resistencia al envejecimiento.
- Problemas de adherencia entre el asfalto y el plástico.
- Disminución en la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica conforme aumenta la cantidad de plástico (disminución en costo por transporte).

Las experiencias internacionales expuestas anteriormente, demuestran viabilidad en el diseño de mezclas asfálticas con plástico, dejando abierto un campo de estudio para el análisis a través de pruebas de laboratorio enfocadas al desempeño de las mezclas y la construcción de tramos experimentales en campo para su evaluación, bajo cargas de tráfico más realistas y simulado condiciones climáticas típicas de la región.

1.3 Contexto nacional

En Costa Rica ya se encuentra vigente una ley para el uso de materiales reutilizables en mezclas asfálticas en obras de infraestructura vial. En general, la ley pretende promover gradualmente el uso de tecnologías de reciclaje en la producción de mezclas asfálticas, entre otros elementos, para carreteras. Las tecnologías que implican la técnica de reciclado en pavimentos son diversas, y entre ellas se incluye el concepto de pavimentos asfálticos reciclados (RAP por sus siglas en inglés). A manera de referencia (NAPA, 2018), en Estados Unidos se utilizaron 82,2 millones de toneladas de RAP en el 2018, lo que se traduce en una reducción de 23 millones de barriles de asfalto y 78 millones de toneladas de agregado virgen, lo que resulta en ahorros económicos y de recursos muy importantes, sobresaliendo la reducción de la huella de carbono.

De forma similar, la ley de materiales reutilizables abre la posibilidad de manejar plásticos o polímeros reciclados en la producción de mezcla asfáltica, temática que coincide directamente con el objetivo del proyecto “Diseño, Construcción y Evaluación del Desempeño de Mezcla Modificada con Material de Desecho”, dentro del cual se enmarca el presente informe el cual servirá como insumo importante a la Administración para validar las tecnologías propuestas por la ley precitada.

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 13 de 70
--	------------	-----------------



2 OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1 Objetivo General

Analizar el desempeño a escala natural de las mezclas asfálticas modificadas con arena sintética, respecto de una mezcla convencional.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el desempeño de estructuras de pavimento con mezcla asfáltica modificada con arena sintética mediante el uso del HVS en condiciones controladas de carga.
- Analizar el desempeño de estructuras de pavimento con mezcla asfáltica modificada con arena sintética mediante la aplicación de ensayos no destructivos como deflectometría de impacto, regularidad superficial y fricción.
- Crear un protocolo de acondicionamiento con temperatura para el ensayo a escala natural que permita evaluar el desempeño de las mezclas a diferentes condiciones.
- Analizar el desempeño y comportamiento de las estructuras bajo las condiciones de carga de la fase I (aplicación de 3,1 millones de ESAL) y fase II (aplicación de 5,9 millones de ESAL adicionales)

2.3 Alcance

El informe final fase I y fase II para arena sintética titulado “Diseño, Construcción y Evaluación del Desempeño de Mezclas con Materiales de Desecho” posee los siguientes alcances:

- Se utilizó un diseño de mezcla patrón y una estructura de pavimento generada por parte de los propios desarrolladores del proyecto.
- La mezcla asfáltica utilizada y los tramos de estudio fueron construidos por una empresa constructora, externa a la Universidad de Costa Rica.
- Para este tipo de modificante, se empleó 1,0 % en peso de la mezcla asfáltica. Este contenido fue establecido como producto de revisiones previas realizadas dentro del LanammeUCR. Manteniendo el diseño original de la mezcla asfáltica.
- Se consideraron dos tratamientos por tipo de mezcla, sin acondicionamiento térmico y con acondicionamiento térmico en un rango de 40°C-42°C por 15-16 horas diarias.
- Se construyó un tramo de estudio para cada tipo de tratamiento, sin embargo, cada uno de los tramos poseen diversos puntos de control (muestras), con sus respectivas repeticiones.
- Los tramos de estudio poseen controles periódicos por medio de Ensayos no destructivos (NDT, por sus siglas en inglés). Se hicieron análisis de deflectometría, regularidad, fricción, deformaciones en la superficie de pavimento, entre otros.

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 14 de 70
--	------------	-----------------



3 ESQUEMA EXPERIMENTAL

En esta sección se describen las generalidades asociadas a la construcción de los tramos de prueba con mezcla asfáltica modificada con materiales reciclados, así como el tramo control de referencia, a ser evaluados con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS) en el LanammeUCR.

A continuación, se detallan diferentes características de los tramos construidos, por ejemplo los espesores de las capas y sus respectivas respuestas, el diseño de mezcla asfáltica utilizado, el proceso de construcción asociado a los tramos, entre otros aspectos importantes que inciden en los resultados, análisis y conclusiones derivadas.

3.1 Ubicación y distribución de los tramos

Los tramos de prueba experimentales de mezcla asfáltica con materiales de desecho fueron construidos en el Edificio C del LanammeUCR de la Universidad de Costa Rica en San Pedro de Montes de Oca en Costa Rica el 20 de septiembre del 2019. En la *Figura 1* se señala la localización geográfica del sitio, muy cercano al campus principal de la Universidad de Costa Rica en San Pedro de Montes de Oca, San José (Ciudad de la Investigación).



Figura 1. Ubicación del Edificio C de LanammeUCR; Montes de Oca, San José, Costa Rica (9.9358591°N, -84.0446636°O). Fuente: Google Earth, 2020.

El edificio de referencia cuenta con una zona dispuesta para ensayos acelerados en pavimentos y es donde se construyeron las pistas de ensayo. Este espacio cuenta con las dimensiones suficientes para permitir la construcción de múltiples tramos experimentales y también albergar al Simulador de Vehículos pesados HVS durante el desarrollo del experimento.

La configuración de los tramos de ensayo fue sometido a un proceso de diseño, sugerencias y revisión por parte de asesores técnicos de la Alianza Internacional HVS (HVSIA, por sus siglas en inglés). La HVSIA, congrega a importantes investigadores a nivel mundial, los cuales son usuarios de este tipo de equipos y disponen de amplia experiencia en este campo de investigación.

Los tramos se localizan en un área pavimentada de forma rectangular, con una superficie de 180,73 metros cuadrados y una profundidad que varía entre los 2,55 metros y los 2,75 metros. Se realizó la construcción de tres franjas con dimensiones de 2,05 m de ancho y 22,04 m que contienen seis tramos experimentales a evaluar.

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 16 de 70
--	------------	-----------------



3.2 Descripción de los ensayos y mediciones a realizar

3.2.1 Ensayo a Escala con el Simulador de Vehículos Pesados

El Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés) es un equipo especializado de la Universidad de Costa Rica, a cargo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Esta herramienta simula cargas de tránsito pesado de forma acelerada, por medio de técnicas de evaluación de pavimentos no destructivas (NDT, por sus siglas en inglés) analiza el desempeño del pavimento, dentro de estas evaluaciones se realizó: deflectometría de impacto, Índice de regularidad internacional IRI, deformación permanente, pérdida de fricción, entre otros.



Figura 3. Simulador de Vehículos Pesados, HVS Mark VI de Dynatest.

Este equipo está clasificado dentro de la categoría APT, por el acrónimo en inglés de Ensayos Acelerados de Pavimentos, y reunidos mediante el comité AFD40 del TRB. La subcategoría de clasificación corresponde a un equipo lineal móvil, el cual tiene la particularidad de poder ser utilizado dentro de las instalaciones especializadas y construidas para este fin específico, con la posibilidad de desplazarse a diferentes sitios para realizar los ensayos.

Una vez construidos los tramos de ensayo, y previo a la aplicación de las cargas con el HVS, se realizó deflectometría de impacto sobre la estructura. De esta manera se pudo tener una medición de la capacidad estructural inicial de los diferentes tramos. Esta información se muestra en el capítulo 5.1.

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 18 de 70
--	------------	-----------------



El siguiente paso fue la colocación del equipo (HVS) sobre el tramo a ensayar y dar inicio a la aplicación de cargas. Antes de aplicar las primeras repeticiones de carga que forman parte del experimento se hace una medición de la superficie del tramo (perfil) mediante la secuencia programada en el equipo HVS con sensores láser que posee. Esta medición establece la referencia inicial contra la cual se medirá la deformación acumulada durante el ensayo (deformación permanente).

Como el ensayo es por duplicado para cada condición, el ensayo inicial en cada tramo es realizado a temperatura ambiente para evaluar la condición crítica de agrietamiento por fatiga y en el segundo escenario se utilizará la cámara térmica (temperatura del pavimento de 40°C) para analizar el desempeño ante la deformación permanente.

3.2.2 Esquema de carga

Para la Fase I de carga, se realizó una carga paulatina y sostenida, se realizó un patrón de carga que inicia en los 40 kN con incrementos de 10 kN, siempre y cuando no se sobrepasen los umbrales establecidos. Con base en resultados previos y con el propósito de mantener una tasa de daño constante (bajo el punto de aplicación de carga) se recomendó monitorear las deflexiones cada 100 000 repeticiones de carga. Si la tasa de daño disminuye, se podría considerar una revisión cada 200 000 repeticiones con un aumento recomendado de 10 kN. El esquema de carga final utilizado en los tramos analizados fue 400000 repeticiones de 40 kN, 200000 repeticiones de 50 kN y 400 000 repeticiones a 60 kN.

En la fase II de carga se partió de los 60 kN de carga con 300 000 repeticiones iniciales y luego 400 000 repeticiones a 70 kN, para un total de 700 000 repeticiones de carga y 5,9 millones de ESAL.

De la misma manera se estableció una secuencia de aplicaciones de carga, considerando al menos 20 000 repeticiones de carga por día (bidireccional), 5 días a la semana (100 000 repeticiones por semana). Dentro del Anexo 1 y se exponen en detalle los esquemas completos de aplicaciones de carga final, tanto para los tramos de prueba sin acondicionamiento y con acondicionamiento por temperatura. El número completo de aplicaciones de carga establecido corresponde a la aplicación aproximada $9,0 \times 10^6$ ESAL.

3.3 Mediciones realizadas durante el ensayo acelerado

Para los tramos experimentales se utilizaron equipos complementarios al HVS, que permitieron obtener las diferentes respuestas del pavimento. A continuación, se detallan cada uno de los equipos utilizados.

- Perfilómetro láser 3D automatizado (RSP)

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 19 de 70
--	------------	-----------------



Por medio del perfilómetro, se realizaron mediciones longitudinales y transversales de la superficie de ensayo, de esta manera se generó un perfil tridimensional del tramo en evaluación. Con este perfil tridimensional se observaron las deformaciones permanentes y ahuellamiento progresivo sobre el tramo a lo largo de la aplicación de carga. Asimismo, se hizo posible el cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) con los datos brindados por el dispositivo. A continuación, se observa una figura del equipo y un ejemplo de la salida de datos de la deformación para un tramo.



Figura 4. Perfilómetro láser.

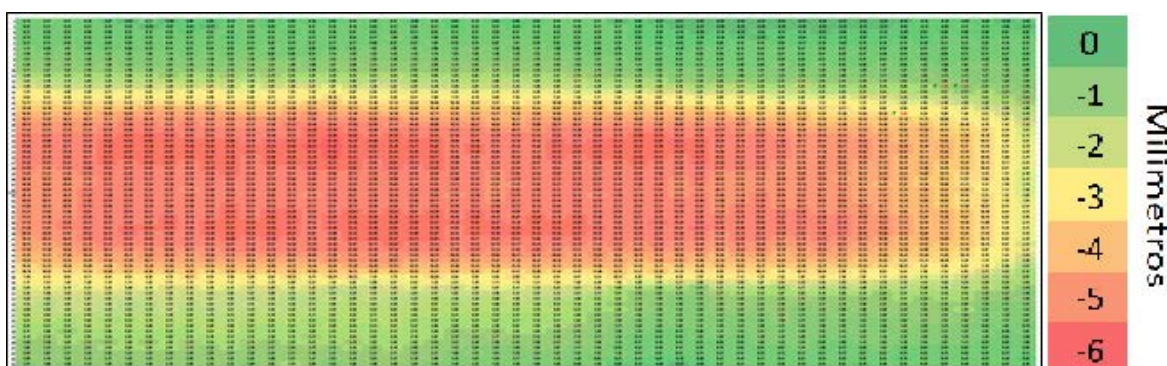


Figura 5. Ejemplo de matriz de datos de deformación.

- Deflectómetro de Impacto (FWD)

Por medio del Deflectómetro de impacto se analizaron las condiciones estructurales del pavimento producto de la aplicación de una carga puntual que contempla esta metodología simulando un eje equivalente de 40KN. Los análisis se realizaron tanto antes de iniciar los procesos de evaluación y también al finalizar la cantidad total de pasadas del HVS al final la fase I y II, con el fin de conocer la capacidad estructural inicial y final de cada una de los tramos y la evolución de la pérdida de capacidad estructural producto de la aplicación de cargas. En la **Figura 6** se muestra la distribución de los puntos de evaluación.

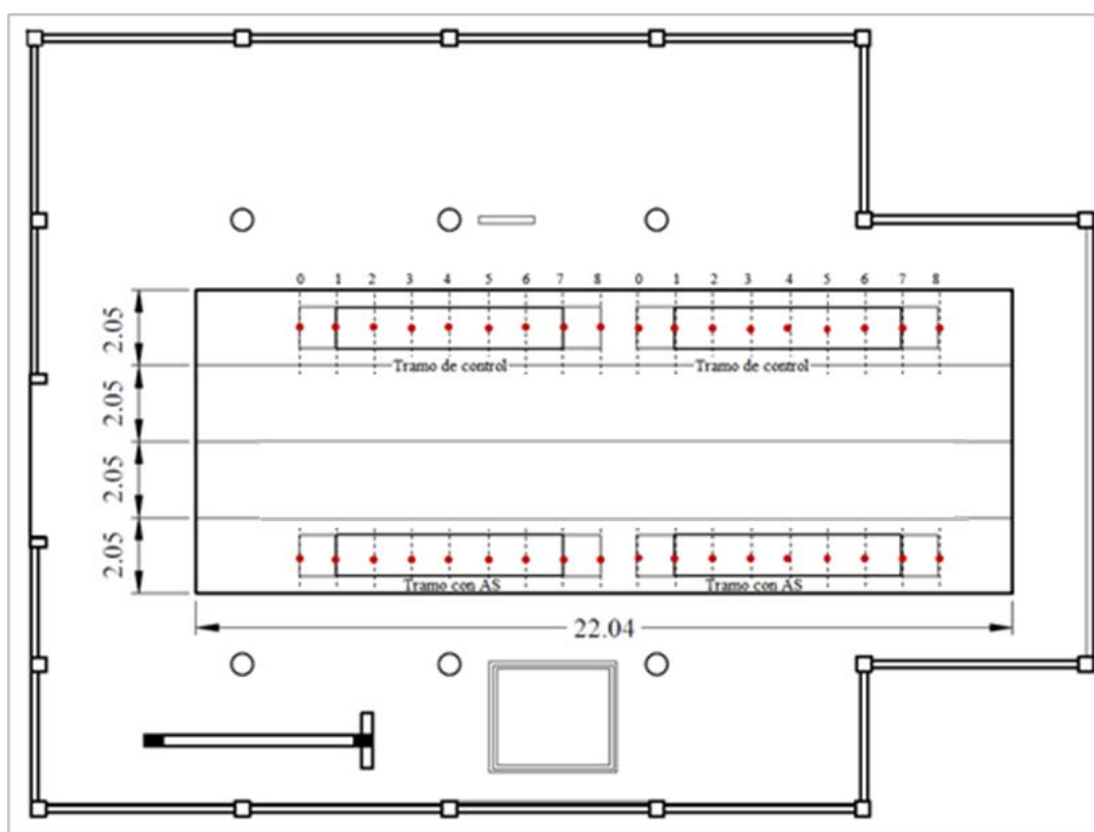


Figura 6. Ensayos de deflectometría de impacto.

- Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)



La deflexión de la superficie del pavimento es un parámetro importante de respuesta estructural para dar seguimiento a la evolución del deterioro en las distintas capas que conforman el paquete estructural del pavimento. Mediante el uso del RSD se midieron las deflexiones sobre la superficie en el pavimento conforme la rueda del equipo se aproxima al sensor ubicado en el extremo delgado de la viga, como se muestra en la **Figura 7**.



Figura 7. Deflectómetro de superficie del pavimento.

Este instrumento también permite documentar el deterioro progresivo que sufre la estructura conforme avanza el número de repeticiones de carga y fue empleado para medir deflexiones en diferentes zonas de cada tramo experimental, los cuales posteriormente permitieron la estimación de módulos de las diferentes capas del pavimento. En la **Figura 8** se observa un ejemplo de los resultados brindados por este equipo.

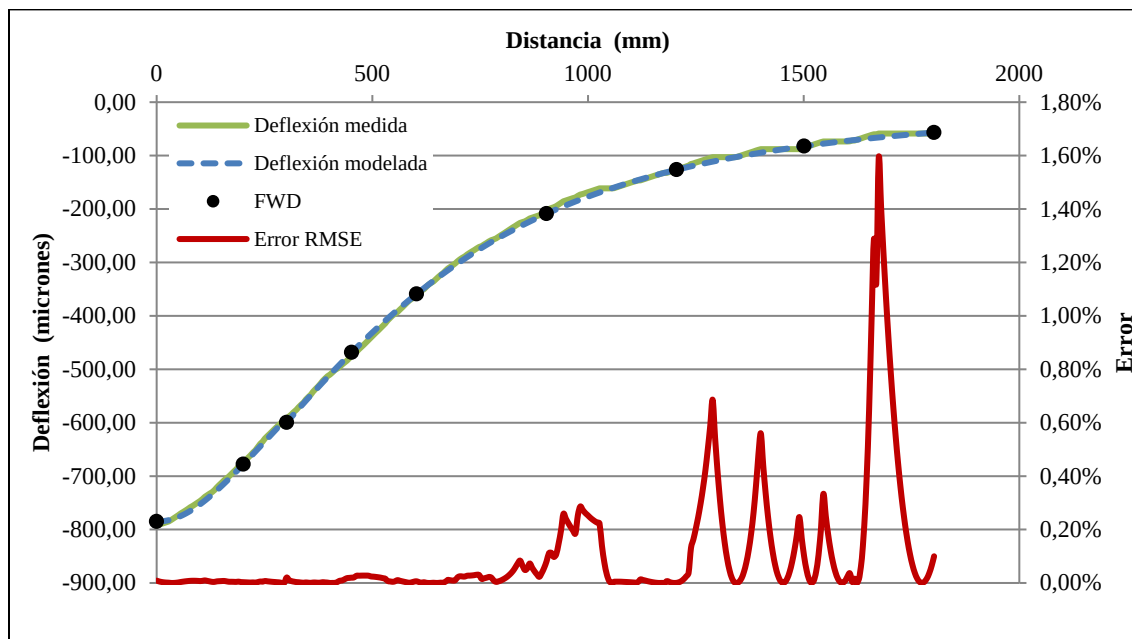


Figura 8. Ejemplo de deflexión medida y deflexión modelada.

- Termopares

Son sensores de temperatura, instalados en la superficie y a cierta profundidad dentro de la capa de mezcla asfáltica que permiten correlacionar la temperatura y la deflexión de la superficie de la estructura del pavimento. Están hechos con 2 cables, uno de níquel y el otro de cromo y registran temperaturas entre -180 y 1300 °C. Funcionan con voltajes generados por el aumento de temperatura.



Figura 9. Ejemplo de monitoreo y demarcación de agrietamiento en tramo de prueba.

- Agrietamiento

Se monitoreó y generó un registro fotográfico del estado superficial del tramo de prueba de manera que se pueda cuantificar el avance de grietas con la finalidad de medir el fisuramiento por fatiga (con base a un área superficial agrietada).

3.4 Acondicionamiento para tramos de estudio

El estudio contempla un acondicionamiento térmico de los tramos evaluados respecto a la condición estándar (temperatura ambiente interna de las instalaciones). Por lo tanto, se tiene 1 réplica del pavimento analizado. El tramo 018 (arena sintética) corresponde al tramo sin acondicionamiento y el tramo 022 (arena sintética) corresponde al tramo ensayado con acondicionamiento. Dicha numeración corresponde con un tema de seguimiento interno histórico de las diversas investigaciones realizadas en los tramos del HVS.

El acondicionamiento por temperatura consiste en el aumento de la temperatura interna del pavimento por medio de lámparas infrarrojas (1500 watt cada una), las cuales fueron programadas para incrementar la temperatura del pavimento (a 5 cm de profundidad) hasta un rango de 40 – 42 °C en promedio, por un lapso entre 15 y 16 horas diarias. Este proceso es realizado mediante el uso de la cámara climática del HVS.

La temperatura del ensayo fue determinada a partir del proyecto de Desempeño de Pavimentos a Largo Plazo desarrollado por el LanammeUCR, con base a registros

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 24 de 70
--	------------	-----------------



climáticos de las secciones del control del proyecto. El acondicionamiento posee una configuración cíclica, es decir, de 6 am hasta las 10 pm se realiza la aplicación de temperatura por medio de las lámparas y las horas restantes del día se dejan sin aplicación de temperatura y con una restitución de la temperatura ambiente teórica.

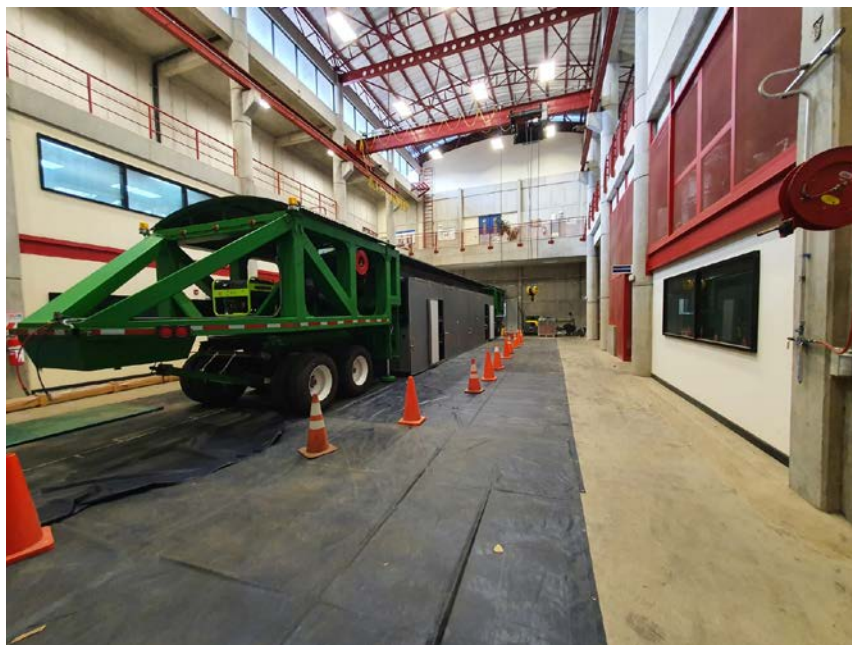


Figura 10. Cámara climática para acondicionamiento térmico.

4 ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS Y CARACTERIZACION DE MATERIALES

Con base en los resultados obtenidos durante el *Primer Ensayo Acelerado de Pavimentos a Escala Natural* (proyecto VI B5A43), realizado entre el 2013 y 2018, se definió la siguiente estructura para los tramos experimentales. La estructura consiste en un sistema de pavimento flexible de tres capas. Ver **Figura 11**.

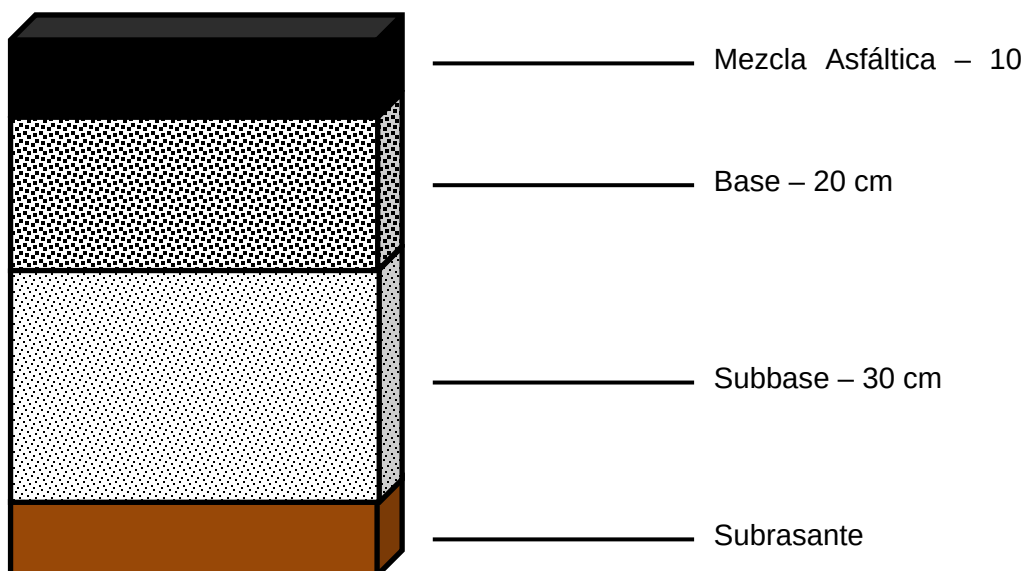


Figura 11. Estructura de los tramos experimentales.

El material de la subrasante corresponde al mismo que se encuentra en el lugar de construcción del Edificio C del LanammeUCR (MH según clasificación SUCS ó A-7-5 según AASHTO, CBR 3 %), mientras que para la subbase y base granular, se utilizaron materiales que cumplen con lo establecido en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2020). La caracterización de los materiales mencionados se presenta en el siguiente apartado.

4.1 Diseño preliminar y respuestas mecánicas esperadas

La vida útil de la estructura de pavimento colocada se estimó con base en los resultados del experimento previo. Los criterios de falla considerados son los siguientes:

1. Deformación permanente promedio en la superficie del pavimento de 12,5 mm en los tramos sin acondicionar, y hasta 16,5 mm acondicionado.
2. Reducción de la capacidad estructural por medio del análisis del módulo elástico, donde la reducción de cualquiera de las capas que conforman el paquete de pavimento no deberá presentar valores menores o iguales al 30% del valor inicial de módulo.

Para estimar la posible vida útil, se tomaron como referencia las especificaciones de materiales utilizados en el **Primer Ensayo Acelerado de Pavimentos a Escala Natural** (proyecto VI B5A43), realizado entre el 2013 y 2018. Los parámetros considerados se

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 26 de 70
--	------------	-----------------



muestran en la **Tabla 1**. Sin embargo, estos datos han sido actualizados a través de ensayos de FWD y retrocálculo de módulos (ver capítulo de resultados).

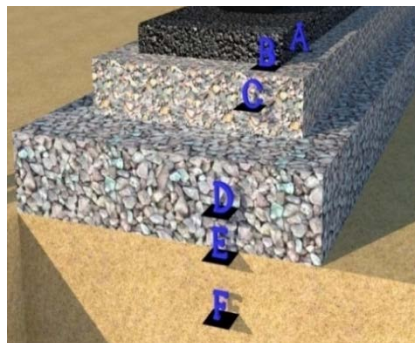
Tabla 1. Características generales paquete estructural propuesto.

Capa	Espesor (cm)	Módulo MPa (típicos primer experimento HVS)
MAC	10	3 500
Base granular	20	170
Subbase	30	140
Subrasante	-	70

Para estimar las respuestas se realizó una modelación a través de la teoría de multicapa elástica. Los datos de entrada (características mecánicas de los materiales) se presentan en la tabla anterior. La configuración de carga empleada corresponde a un eje simple dual de 40 kN (carga), con 690 kPa. Los puntos de interés, respuestas críticas, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Respuestas teóricas estimadas.

Punto	ϵ_t (μs)	ϵ_c (μs)
A (fibra intermedia MAC)	-	84
B (fibra inferior MAC)	236	-
C (fibra intermedia BG)	-	486
D (fibra intermedia SB)	-	302
E (fibra superior SR)	-	271
F (15,2 cm bajo la SR)	-	244



De acuerdo con las estimaciones realizadas a través de modelos de daño (pérdida de rigidez), generados en el LanammeUCR, la vida útil de esta estructura para una pérdida de



rigidez de hasta el 60 % en la MAC podría ser por el orden de 14×10^6 ESALS a 18×10^6 ESALS.

4.2 Diseño original de la mezcla asfáltica

El diseño de mezcla fue realizado por una empresa externa a la Universidad de Costa Rica, la misma que se encargó de los trabajos de producción, colocación y compactación de cada uno de los tramos experimentales. El diseño fue realizado por medio de la metodología Marshall para la mezcla de control la misma que fue replicada para la mezcla con la adición de 1% de arena sintética. Asimismo, el LanammeUCR posteriormente realizó un proceso completo de verificación de diseño de mezcla. El diseño de mezcla completo puede consultarse en el informe de Fase I (EIC-Lanamme-INF-1473-2022).

5 RESULTADOS

5.1 Descripción inicial general de los tramos

5.1.1 Capacidad estructural

Previo a la aplicación de las cargas con el HVS, se determinó la capacidad estructural inicial de los tramos experimentales a través de ensayos de deflectometría con Deflectómetro de Impacto (FWD). Con la información generada se estimaron las respuestas de las estructuras de pavimento y su capacidad mecánica mediante los módulos de cada capa, incluyendo la del suelo de apoyo (subrasante).

Se efectuaron 9 mediciones con FWD. La distancia entre cada punto evaluado es de 1 metro para los tramos en la fase I, en cuanto a la fase II, las mediciones se hicieron cada 0,5 metros, ver Figura 12. En cada uno de los puntos de aplicación de carga se realizó el ensayo de deflectometría a 3 niveles de carga (con 3 repeticiones para cada condición), para un análisis posterior de no linealidad de los materiales (40 kN). Estos niveles de carga también son congruentes con los que serán aplicados posteriormente con el HVS.

Los puntos de evaluación con el FWD se detallan en siguiente figura.

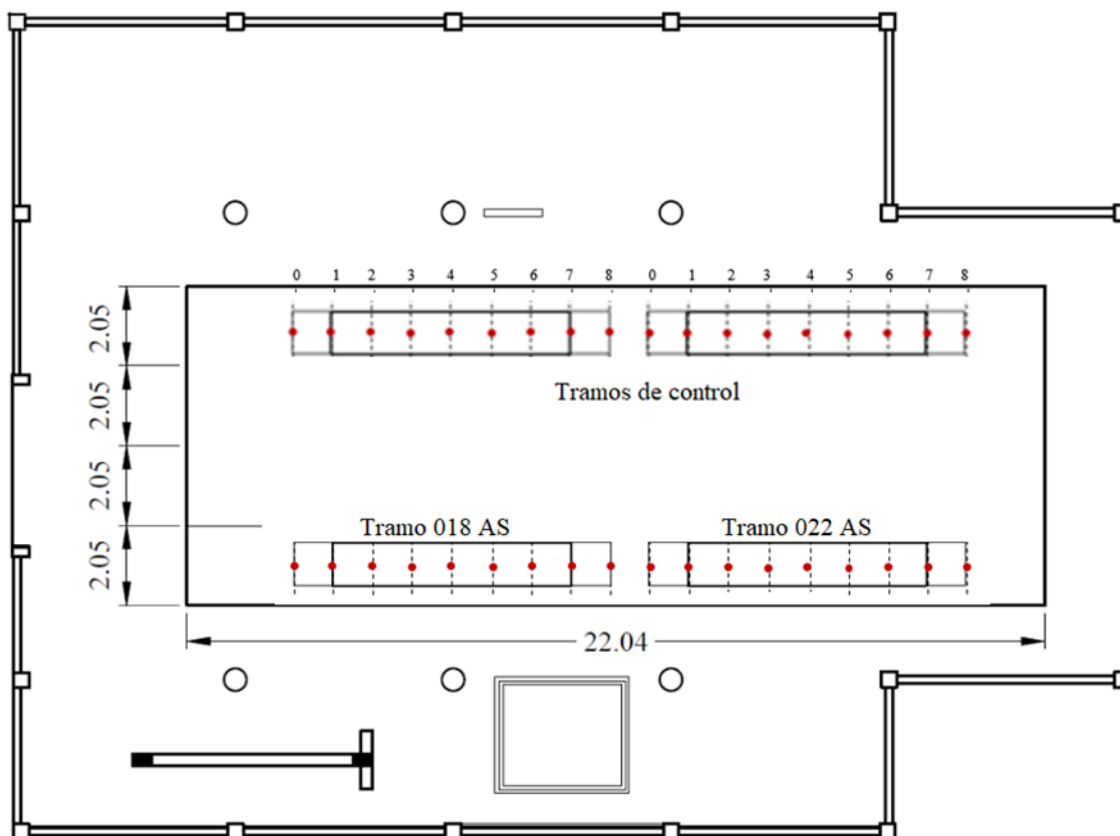


Figura 12. Puntos de evaluación con el FWD.

Los promedios de las deflexiones para cada uno de los tramos de prueba se presentan en las siguientes figuras, estos promedios se graficaron tanto en condiciones iniciales (1 000 000 pasadas del HVS) y finales (después de 1 700 000 de pasadas del HVS) del pavimento. De manera general se observa que las deflexiones iniciales en promedio se encuentran cercanas a los 800×10^{-3} mm para una carga de 40 kN.

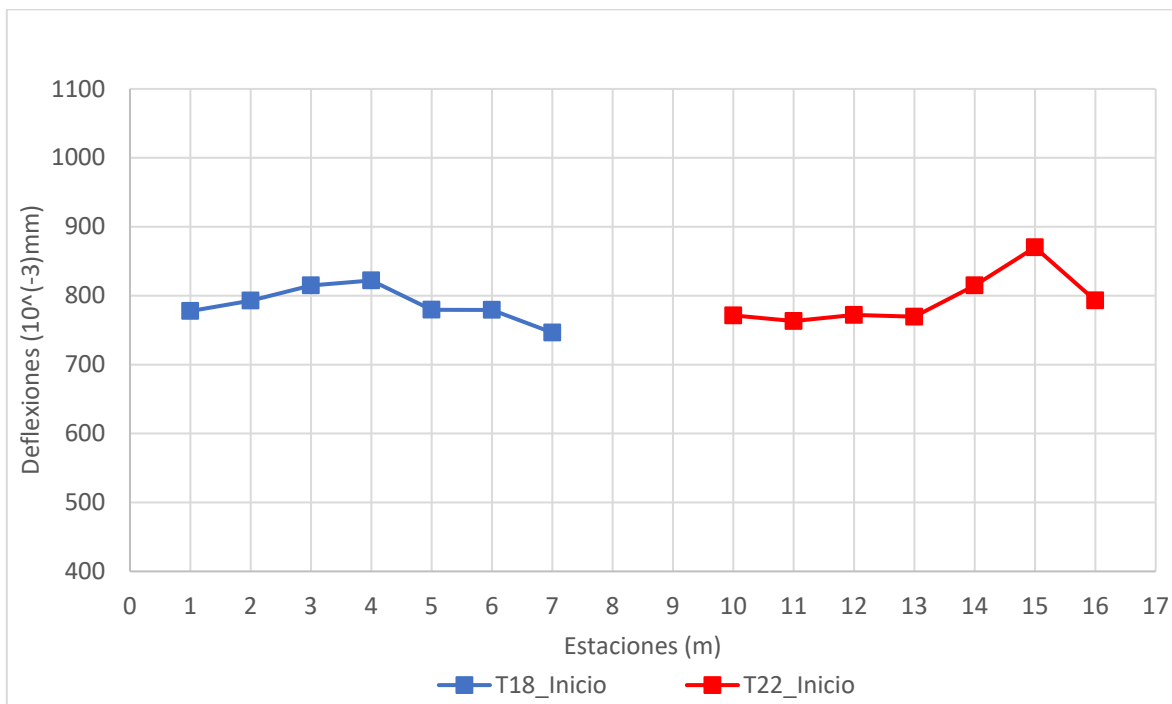


Figura 13. Deflexión D_0 (bajo plato de carga) para tramos modificados con arena sintética (Estado:Inicial).

Cabe recordar que el indicador D_0 (deflexión debajo del plato de carga) corresponde a un indicador de la capacidad de toda la estructura del pavimento. En este aspecto y bajo el supuesto que las capas de soporte son relativamente uniformes, mayores deflexiones indican una menor capacidad estructural. Sin embargo, es importante aclarar que siempre pueden existir efectos constructivos en el sitio de los tramos que podrían inducir a variaciones adicionales en lo referente a la capacidad de la estructura, ej. compactación, principalmente en la cercanía de los bordes de la fosa o variaciones en los espesores.

5.1.1.1 Parámetros estructurales de los tramos de estudio

En el informe LM-PI-UMP-083-R1 (2018) se plantea el uso de distintos indicadores de condición estructural que pueden ser estimados a partir de las deflexiones medidas con el FWD. Se destacan estos indicadores pues a diferencias del retrocálculo de módulo, no requiere de información adicional para poder generar una estimación de la capacidad de las capas que conforman la estructura más que las deflexiones medidas en los distintos



sensores. Los indicadores son empíricos, pero buscan brindar información estructural de las distintas capas de la estructura de forma directa.

Con base en el informe precitado, se han analizado los parámetros estructurales indicados en la siguiente tabla:

Nombre	Modelo	Parámetros
Radio de Curvatura (RoC) ¹	$R_oC = \frac{(200)^2}{2d_0 \left(1 - \frac{d_{200}}{d_0}\right)}$	R_oC = Radio de curvatura en metros. d_0 = Deflexión en mm a la distancia 0 desde el centro de aplicación de la carga. d_{200} = Deflexión a 200 mm desde el centro de aplicación de la carga.
AREA ²	$AREA = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{d_0}$	AREA = Parámetro AREA en mm. $d_0, d_{300}, d_{600}, d_{900}$ = Deflexiones en mm medidas a la distancia 0, 300, 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga.
Índice de capa Base (BLI) ⁴	$BLI = d_0 - d_{300}$	BLI = Índice de capa Base d_0, d_{300} = Deflexiones en mm medidas a la distancia 0 y 300, mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga
Índice de capa Intermedia (MLI) ⁴	$MLI = d_{300} - d_{600}$	MLI = Índice de capa intermedia d_{300}, d_{600} = Deflexiones en mm medidas a la distancia 300 y 600 mm respectivamente,



Nombre	Modelo	Parámetros
		desde el centro de aplicación de la carga.
Índice de capa Inferior (LLI) ⁴	$LLI = d_{600} - d_{900}$	$LLI = \text{Índice de capa Inferior}$ $d_{600}, d_{900} = \text{Deflexiones en mm medidas a la distancia 600 y 900 mm respectivamente, desde el centro de aplicación de la carga}$

Nota: una descripción más detallada de los indicadores se puede encontrar en el informe LM-PI-UMP-083-R1 (2018).

¹Formula para datos de FWD. Para el modelo de Dehlen (1961) reemplazar el valor de 200 mm por 127 mm.

²Fórmula adaptada de Hoffman, M. (1980).

³Fórmula adaptada de Saleh (2015).

⁴Formula adaptada y actualizada de Horak (2008).

El parámetro ÁREA evalúa las respuestas del pavimento en un radio de hasta 900 mm del punto de aplicación de carga y se estandarizan con respecto a D_0 . Hoffman (1980) afirma que este valor de ÁREA para la mayoría de los pavimentos se encuentra en un rango de 28 cm a 100 cm (11,1 pulgadas a 36 pulgadas). Entre más rígido sea el pavimento, mayor será el valor del parámetro ÁREA, ya que, mide la rigidez relativa de las capas superficiales (mezcla asfáltica) con la de la subrasante. Por tanto, una capa de rueda rígida o una capa de subrasante de baja capacidad pueden aumentar el indicador (nótese que la subrasante utilizada para soporte de los pavimentos en este experimento es de baja capacidad de soporte).

El Radio de Curvatura (RoC) da una indicación de la condición estructural de las capas de rueda y base, y presenta poca afectación de las capas inferiores y subrasante. Horak (2008) indica que valores por encima de 100 pueden ser considerados como buenos para estructuras con base granular.

Los indicadores restantes se enfocan en explicar la capacidad de secciones específicas de la estructura. El índice de capa base (BLI) presenta correlaciones con los comportamientos y estados de las capas superficiales, es decir con la superficie de rodadura y capas de base, el índice de capa intermedia (MLI) se correlaciona de mejor manera con las capas intermedias, es decir con la capa de subbase y el índice de capa inferior (LLI) se



correlaciona con las capas más profundas de la estructura, es decir con capas de materiales seleccionados de relleno y capas de subrasante. (Horak, 2008).

La clasificación del estado de comportamiento de la estructura de pavimento, específicamente compuestos por bases granulares, se realiza por medio de la **Tabla 3**. En principio, esta clasificación se realizaba por medio de los parámetros calculados de la deflexión máxima y de esta forma se clasificaban las condiciones estructurales del pavimento en términos de respuestas elásticas. Actualmente, se muestran rangos del cuenco de deflexiones y la vida remanente del pavimento, empleando los indicadores de Indicador de capa base (BLI), Indicador de capa intermedia (MLI) y el Indicador de capa inferior (LLI). (Horak, 2008).

Tabla 3. Estados de comportamiento para estructuras de pavimento con bases granulares.

Estado de comportamiento	Rango transito ESAL's (millones)	Deflexión Máxima (mm)	BLI (mm)	MLI (mm)	LLI (mm)
Muy rígido	12 a 50	< 0,3	< 0,08	< 0,05	< 0,04
Rígido	3 a 8	0,3 a 0,5	0,08 a 0,25	0,05 a 0,15	0,04 a 0,08
Flexible	0,8 a 3	0,5 a 0,75	0,25 a 0,50	0,15 a 0,20	0,08 a 0,10
Muy flexible	< 0,8	> 0,75	> 0,50	> 0,20	> 0,10

Por medio del Benchmarking (BM) o análisis visual comparativo, empleando los parámetros antes descritos, se puede establecer un nivel visual de la condición de la estructura y relacionarlo con su estado de comportamiento o explicar la causa directa de algún tipo de falla, a un nivel preliminar.

Este análisis visual por lo general se resume en una codificación de 3 niveles o colores: Verde (Estructura Buena), Amarillo (Estructura Regular) y Rojo (Estructura débil o con daño severo). (Horak, 2008). La **Tabla 4** contiene la descripción de la caracterización o Benchmarking (BM) antes descrita, se encuentra desarrollada para estructuras de pavimento con 3 tipos de capa base y con diferentes intervalos numéricos para cada parámetro analizado.



Tabla 4. Niveles de condición estructural o benchmarking (BM) por medio de parámetros de cuenco de deflexiones.

Tipo de base	Condición estructural	Parámetros de cuenco de deflexiones				
		Do (μm)	RoC (μm)	BLI (μm)	MLI (μm)	LLI (μm)
Base granular	Buena	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Regular	500 - 750	50 - 100	200 - 400	100 - 200	50 - 100
	Débil	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Base cementada	Buena	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Regular	200 - 400	80 - 150	100 - 300	50 - 100	40 - 80
	Débil	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80
Base bituminosa	Buena	< 400	> 250	< 200	< 100	< 50
	Regular	400 - 600	100 - 250	200 - 400	100 - 150	50 - 80
	Débil	> 600	< 100	> 400	> 150	> 80
Nota: Este criterio de evaluación puede ser ajustado para mejorar la sensibilidad de la caracterización.						

Fuente: Horak E. (2008)

Los parámetros calculados para los tramos de prueba construidos se presentan en las siguientes tablas, donde a su vez se realiza la estimación y caracterización.



Tabla 5. Resumen de Parametros Estructurales para Tramo de Control y Tramo Modificado con Arena Sintética (inicial).

Tramo de control

Tramo de Control	015B - Cond. Inicial			019B - Cond. Inicial		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	470,24		11,23	512,16		10,47
AREA'	0,00049		0,00004	0,00061		0,00004
BLI	389,79		41,44	271,61		23,42
MLI	322,58		23,32	304,51		18,77
LLI	169,46		15,54	164,74		6,32
RoC	92,94		10,77	136,70		12,30

Tramo con arena sintética

Tramo de Arena Sintética	018 - Cond. Inicial			022 - Cond. Inicial		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	492,21		7,52	484,70		10,14
BLI	248,60		14,38	262,78		17,92
MLI	251,47		13,31	256,31		15,24
LLI	123,91		5,89	124,06		10,27
RoC	144,55		10,95	135,99		10,22

5.1.2 Parámetro de resistencia al deslizamiento

A continuación, se presenta la Tabla 6, que muestra los valores mínimos sugeridos para la prueba de péndulo (PTV) en relación con la resistencia al deslizamiento de diferentes tipos de carreteras. Esta tabla proporciona una referencia útil para determinar los niveles de fricción necesarios en diversas condiciones de tráfico y diseño de vías, destacando la importancia de mantener un coeficiente de fricción adecuado para garantizar la seguridad vial. Los valores son adaptados de la guía de *Safety Direct America (2024)*, que establece criterios específicos basados en las características de cada tipo de carretera.

Tabla 6. Valores recomendados de PTV para el péndulo inglés

Categoría	Tipo de carretera	PTV mínimo sugerido
A	Carreteras con altos requerimientos de tracción:	65

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 35 de 70
--	------------	-----------------



Categoría	Tipo de carretera	PTV mínimo sugerido
	(i) Enfoques a semáforos en carreteras sin restricciones (velocidad > 40 mph)	
	(ii) Curvas con un radio menor a aproximadamente 500 pies	
	(iii) Carreteras con una pendiente mayor a 2.86° durante al menos 100 yardas	
	(iv) Rotondas, carreteras de montaña, etc.	
B	Autopistas y carreteras con alto tráfico en áreas urbanas (más de 2000 vehículos por día)	55
C	Todas las demás carreteras	45

Fuente: Adaptado de Safety Direct America (2024.)

En la Tabla 7 se muestra una escala de clasificación para valores PTV del péndulo inglés.

Tabla 7. Clasificación para valores PTV del péndulo inglés.

Clasificación	Rango de Valores PTV
Excelente	70 y más
Buena	50 – 69,9
Regular	40 – 49,9
Mala	30 – 39,9
Muy Mala	Menos de 30

A continuación, se presenta una tabla que resume los valores de fricción obtenidos mediante el uso del péndulo inglés para los tramos evaluados al inicio del ensayo. Estos datos reflejan las condiciones iniciales de fricción en los tramos 018, y 022. La tabla incluye las clasificaciones correspondientes según la escala de fricción establecida, lo que permite visualizar de manera clara la capacidad de adherencia de cada tramo.

Tabla 8. Clasificación de las mediciones con péndulo ingles al inicio del ensayo

Tramo de control

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 36 de 70
--	------------	-----------------



Tramo	Péndulo Inglés (Inicial)	Clasificación
Sin Acondicionamiento		
Tramo 015	69,58	Buena
Con Acondicionamiento		
Tramo 019	71,50	Excelente

Tramo con arena sintética

Tramo	Péndulo Inglés (Inicial)	Clasificación
Sin Acondicionamiento		
Tramo 018	69,15	Buena
Con Acondicionamiento		
Tramo 022	63,53	Buena

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

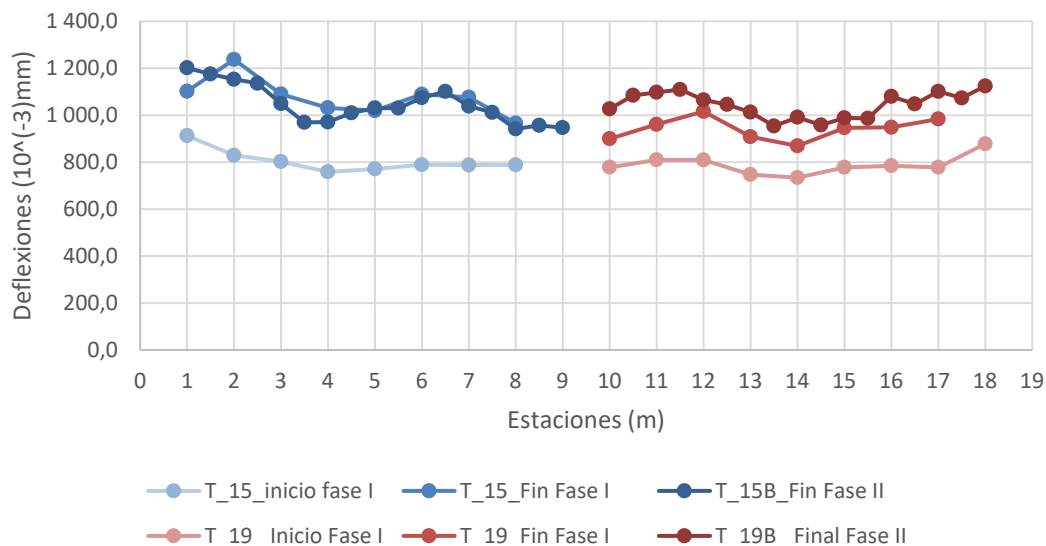
5.2.1 Deflectometría

5.2.1.1 Deflexiones máximas

Tramo de control



Tramo de Control - Condición Inicial vs final de cada fase



Tramo con arena sintética

Condición Inicial vs final de cada fase
Arena Sintética

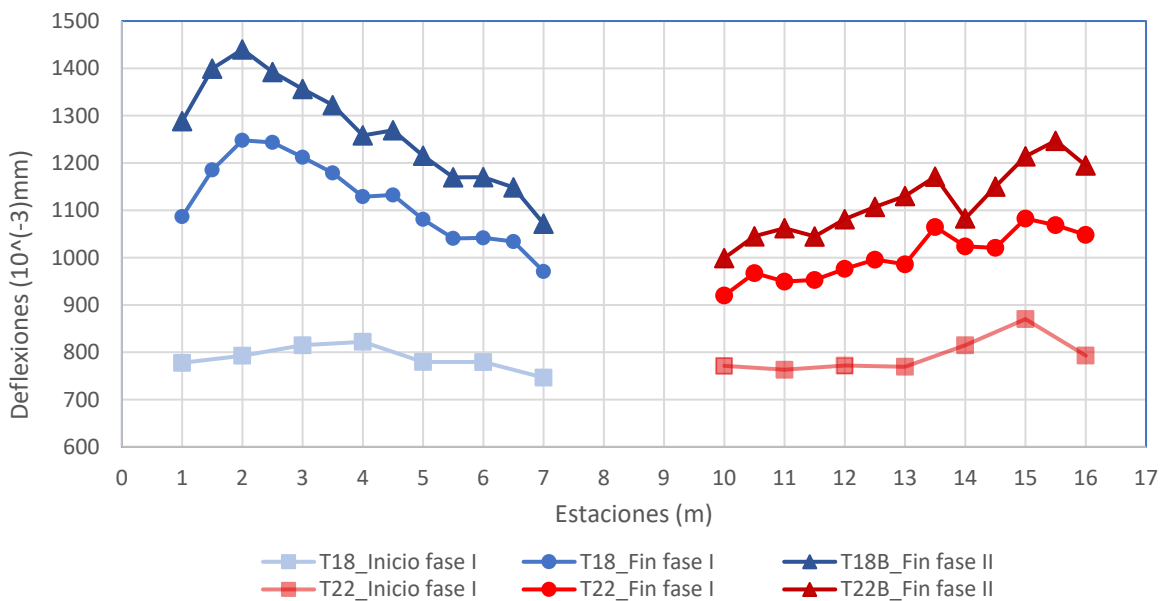




Figura 14. Tramos de control y con arena sintética en condición inicial vs condición final de cada fase.

La figura muestra la evolución de las deflexiones en los tramos T18 (estaciones 1-7) y T22 (estaciones 10-16), evidenciando un aumento progresivo desde la condición inicial, al final de la fase I y posteriormente al final de la fase II. En el tramo T18, las deflexiones inician en valores bajos (700-800 micras) y alcanzan hasta 1400 micras al final de la fase II. En el tramo T22, las deflexiones iniciales son similares (800-1100 micras) y aumentan de manera consistente, alcanzando valores inferiores a los observados en el T18. Este comportamiento refleja un deterioro acumulativo asociado al incremento de las cargas aplicadas durante las fases.

Sin embargo, es importante considerar que el tramo T22 fue sometido al protocolo de acondicionamiento, lo que implicó que la mitad del tiempo de ensayo se realizó a temperaturas más altas. Aunque ambas mediciones fueron tomadas cuando el pavimento estaba frío, el protocolo de temperatura aplicado en el tramo T22 podría haber influido en el comportamiento de las deflexiones observadas. Es posible que el aumento de la temperatura haya afectado los mecanismos de transferencia de daño, moderando el crecimiento de las deflexiones en comparación con el tramo T18, que no estuvo expuesto a este protocolo. Lo anterior teóricamente se explicaría debido a que un aumento de temperatura se relacionaría con una reducción de la rigidez de la mezcla asfáltica, por lo que la pérdida de capacidad estructural se mitigaría al estar en presencia de una capa más flexible de menor módulo reduciendo su susceptibilidad al fisuramiento por fatiga.

5.2.1.2 Parámetros estructurales

Tabla 9. Resumen de Parámetros Estructurales para tramo de control y modificados con Arena Sintética, sin temperatura. Desde el inicio de la fase I hasta el final de la fase II.

Tramo de control



Tramo de Control	015 - Cond. Inicial			015 - Cond. Final fase I			015B - Cond. Final fa		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Des
AREA	502,82		12,49	470,24		11,23	462,73		8
AREA'	0,00070		0,00004	0,00049		0,00004	0,00042		0,0
BLI	243,61		15,20	389,79		41,44	375,68		23
MLI	247,84		17,20	322,58		23,32	319,30		18
LLI	127,79		13,15	169,46		15,54	153,49		6
RoC	147,22		10,14	92,94		10,77	96,37		12

Tramo de con arena sintética

Tramo de Arena Sintética	018 - Cond. Inicial			018 - Cond. Final fase I			018B - Cond. Final II		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	492,21		7,52	456,96		13,53	444,11		12,24
BLI	248,60		14,38	392,24		61,42	464,04		70,32
MLI	251,47		13,31	364,32		54,29	417,93		71,96
LLI	123,91		5,89	152,81		19,17	160,09		18,28
RoC	144,55		10,95	95,11		21,04	81,39		19,68

Tabla 10. Resumen de Parámetros Estructurales para Tramos de Control y Modificado con Arena Sintética, con temperatura. Desde el inicio de la fase I hasta el final de la fase II.

Tramos de control



Tramo de Control	019 - Cond. Inicial			019 - Cond. Final			019B - Cond. Final fase II		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	512,16		8,28	512,16		8,28	492,61		10,47
AREA'	0,00061		0,00004	0,00061		0,00004	0,00050		0,00004
BLI	237,24		18,08	271,61		23,42	326,59		31,96
MLI	244,29		18,30	304,51		18,77	337,07		28,98
LLI	124,54		9,33	164,74		6,32	173,55		10,45
RoC	155,66		13,90	136,70		12,30	111,65		11,33

Tramo de con arena sintética

Tramo de Arena Sintética	022 - Cond. Inicial			022 - Cond. Final fase I			022B - Cond. Final fase II		
	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.	Promedio	BM	Desv.Est.
AREA	484,70		10,14	468,84		22,22	458,28		16,82
BLI	262,78		17,92	341,21		56,52	390,35		55,66
MLI	256,31		15,24	317,59		40,75	366,20		46,94
LLI	124,06		10,27	148,25		12,08	157,59		17,77
RoC	135,99		10,22	111,54		31,10	98,64		23,44

5.2.2 Deformación Permanente

5.2.2.1 Mezcla asfáltica con arena sintética

Tramo de arena sintética sin acondicionamiento por temperatura (T18B)

En la **Figura 15** se presenta el perfil de ahuellamiento transversal correspondiente al tramo T18, un tramo experimental compuesto por arena sintética sin acondicionamiento térmico. Los resultados muestran la evolución de la deformación permanente del pavimento tras las fases I y II de carga del ensayo, realizadas utilizando el Simulador de Vehículos Pesados (HVS). Las mediciones se llevaron a cabo con un perfilómetro láser 3D automatizado (RSP), que permitió capturar un perfil tridimensional de la superficie del tramo evaluado. En la figura, se observa un incremento progresivo en el nivel de deformación tras cada fase, evidenciando el estado final del pavimento bajo las condiciones de ensayo aplicadas.

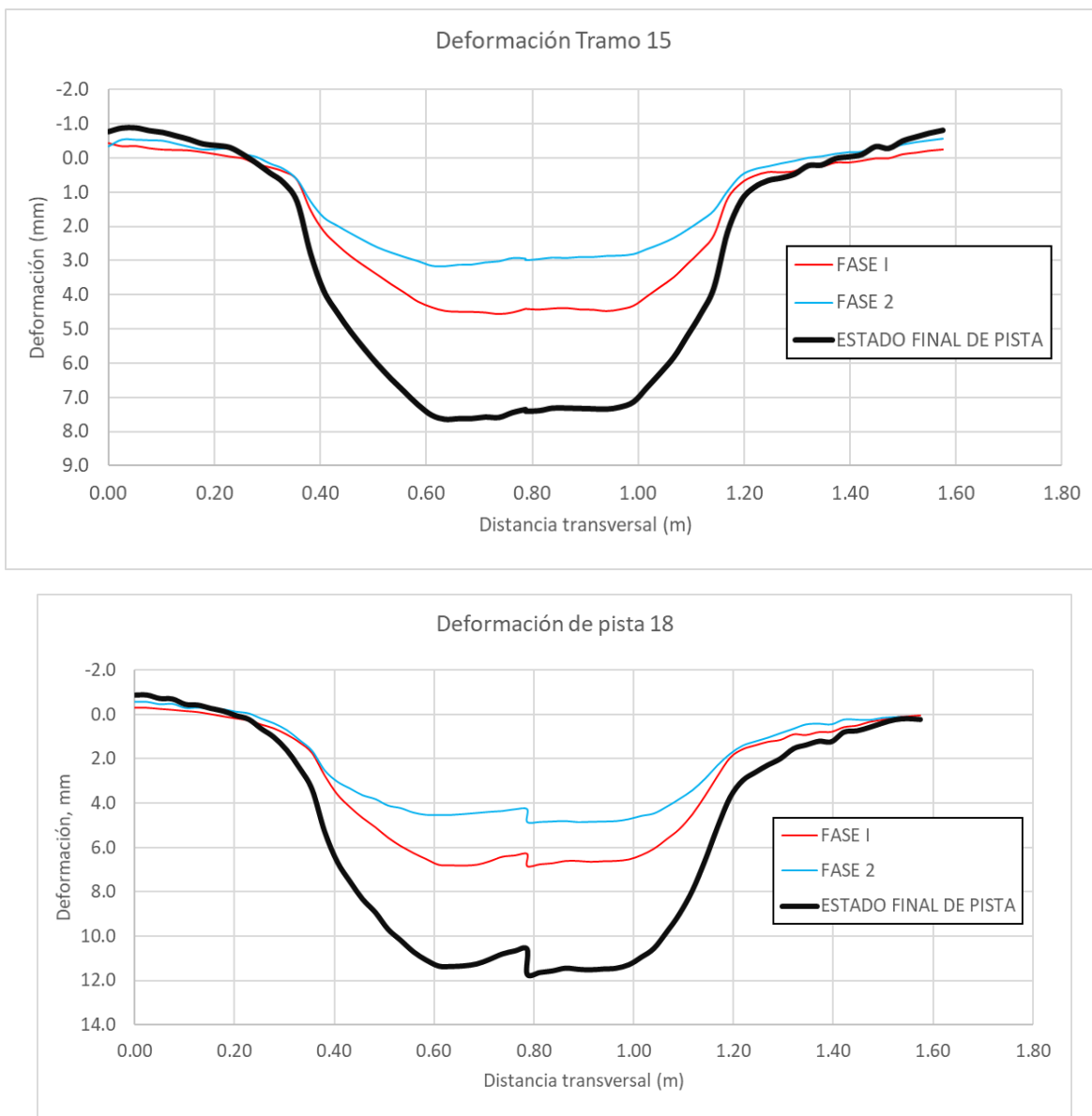


Figura 15. Deformación. Tramo 015 y 018. Fase 1 y Fase 2

En la **Figura 16** y **Figura 17**, se muestra la evolución del ahuellamiento máximo absoluto y del ahuellamiento promedio, respectivamente, para el tramo OT18 durante las fases I y II de carga. La **Figura 18** ilustra la evolución del ahuellamiento máximo longitudinal promedio,



en concordancia con el perfil de la *Figura 15*, esto permite observar de manera detallada los cambios en el ahuellamiento sobre el tramo.

Durante la fase I, que cubre el intervalo de 0 a 3 102 686 ESAL, se registraron valores de ahuellamiento que comenzaron en 0,00 mm, aumentando gradualmente hasta alcanzar un valor de 6,85 mm a medida que se alcanzó la fase I de carga. A partir de la fase II, que comenzó en 3,102,686 ESAL y continuó hasta 9 014 093 ESAL, se evidenció una tendencia de aumento en los valores de ahuellamiento, alcanzando un valor máximo de 11,71 mm hacia el final de la fase. El cual fue cercano al límite superior definido de 12 mm.

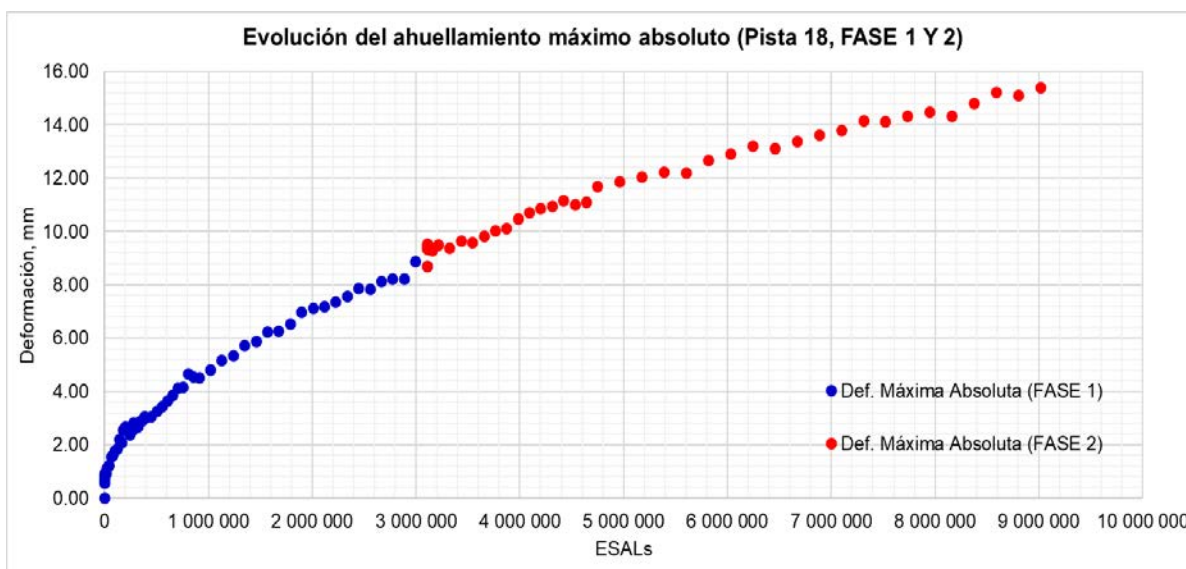


Figura 19. Evolución de ahuellamiento máximo absoluto. Tramo 018, Fase 1 y Fase 2

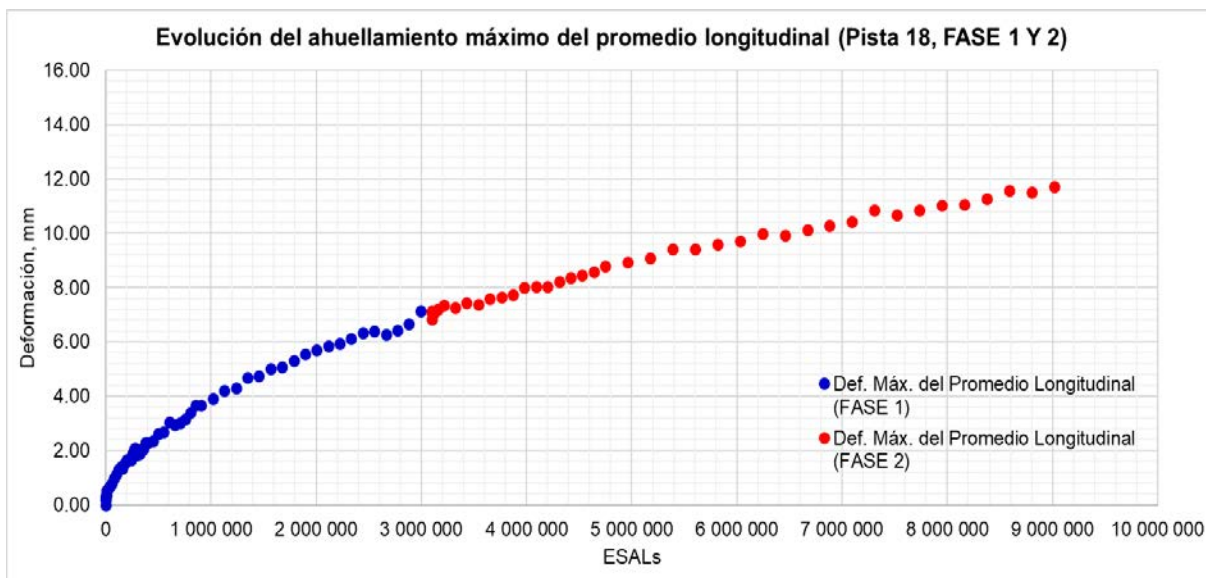


Figura 20. Evolución de ahuellamiento máximo longitudinal del promedio. Tramo 018, Fase 1 y Fase 2

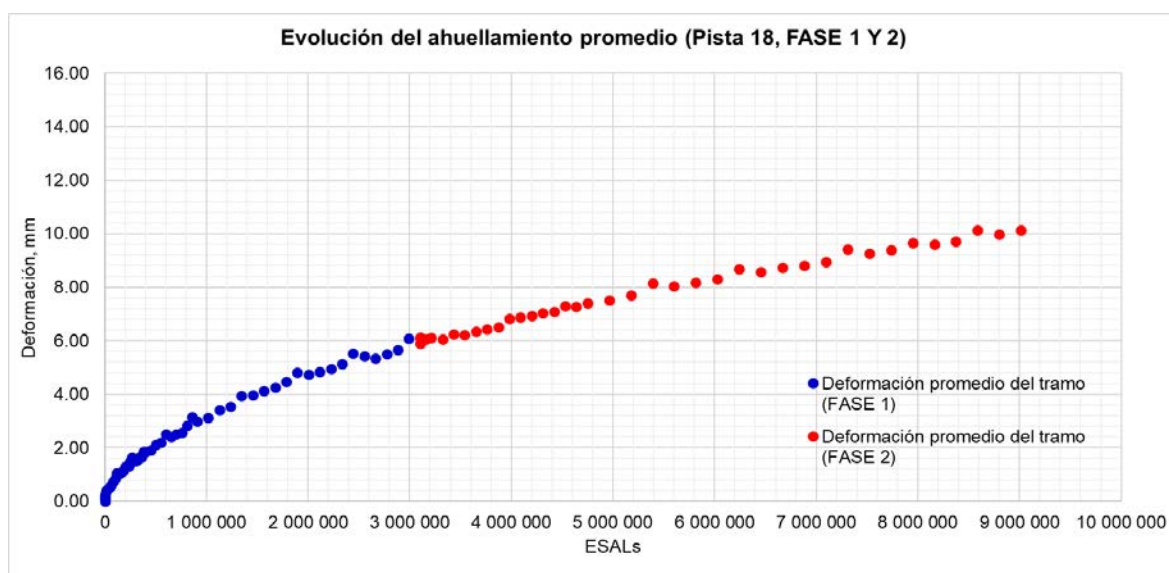


Figura 21. Evolución de ahuellamiento promedio. Tramo 018, Fase 1 y Fase 2



Tramo de arena sintética con acondicionamiento por temperatura (T22)

En la **Figura 19**, se muestra el perfil transversal para el tramo 022, el cual fue muy similar al tramo 018 en términos de magnitud.

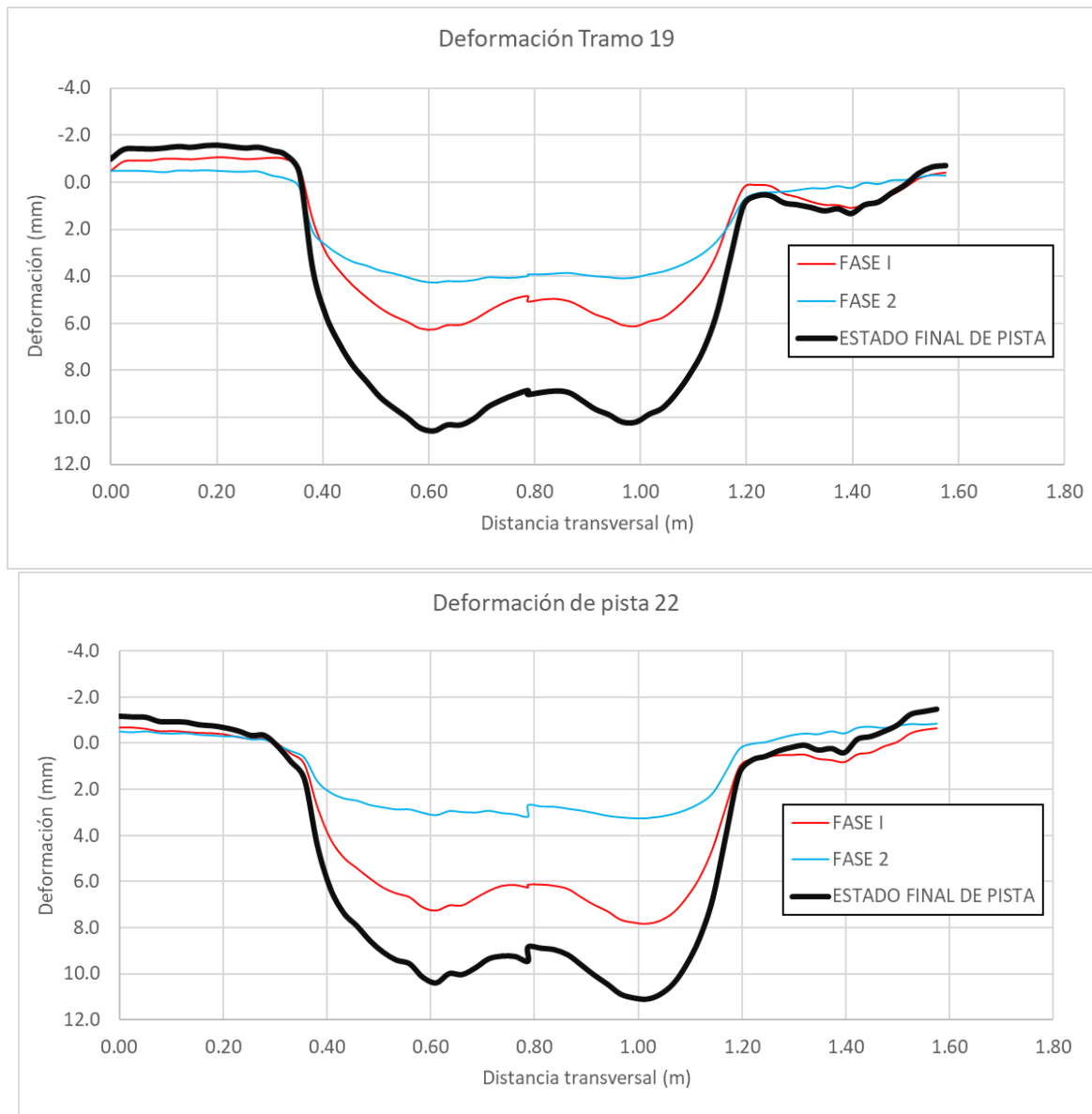


Figura 22. Deformación. Tramo 019 y 022. Fase 1 y Fase 2



En las **Figura 23** y **Figura 24** se muestra la evolución del ahuellamiento máximo absoluto y del ahuellamiento promedio, respectivamente, para el tramo 022 durante las fases I y II de carga. La **Figura 25** ilustra la evolución del ahuellamiento máximo longitudinal promedio, en concordancia con el perfil de la **Figura 26**, esto permite observar de manera detallada los cambios en el ahuellamiento sobre el tramo. Durante la fase I, que cubre el intervalo de 0 a 3 102 686 ESAL, se registraron valores de ahuellamiento que comenzaron en 0,00 mm, aumentando gradualmente hasta alcanzar un valor de 7,85 mm a medida que se alcanzó la fase I de carga. A partir de la fase II, que comenzó en 3 102 686 ESAL hasta 9 014 093, se evidenció una tendencia de aumento en los valores de ahuellamiento, alcanzando un valor máximo de 11,10 mm hacia el final de la fase. El cual fue cercano al límite superior definido de 12 mm.

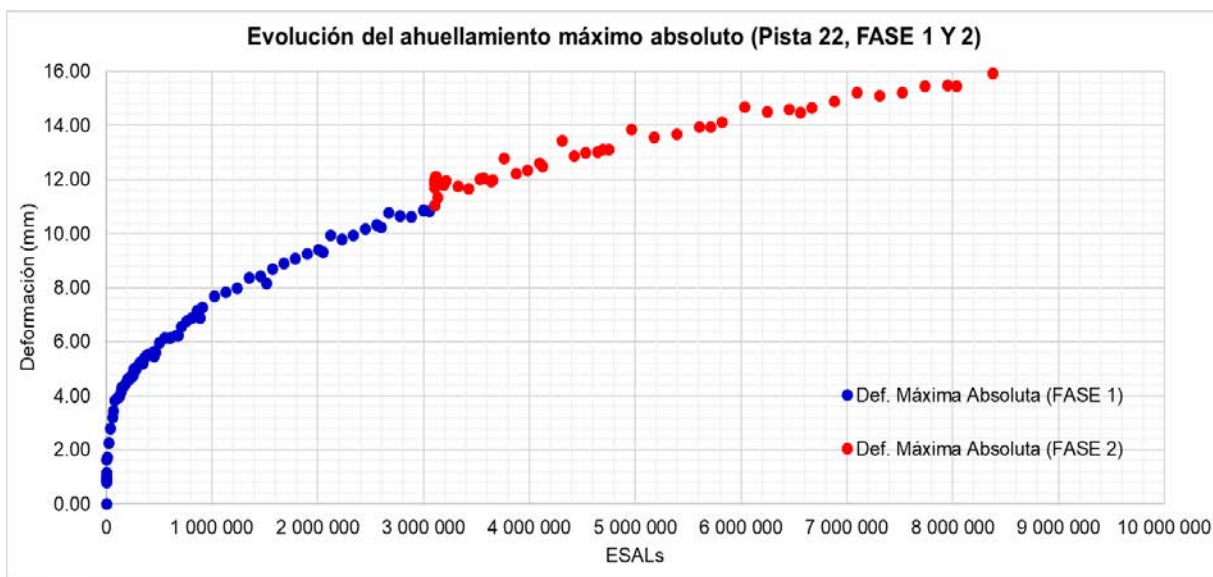


Figura 27. Evolución de ahuellamiento máximo absoluto. Tramo 022, Fase 1 y Fase 2

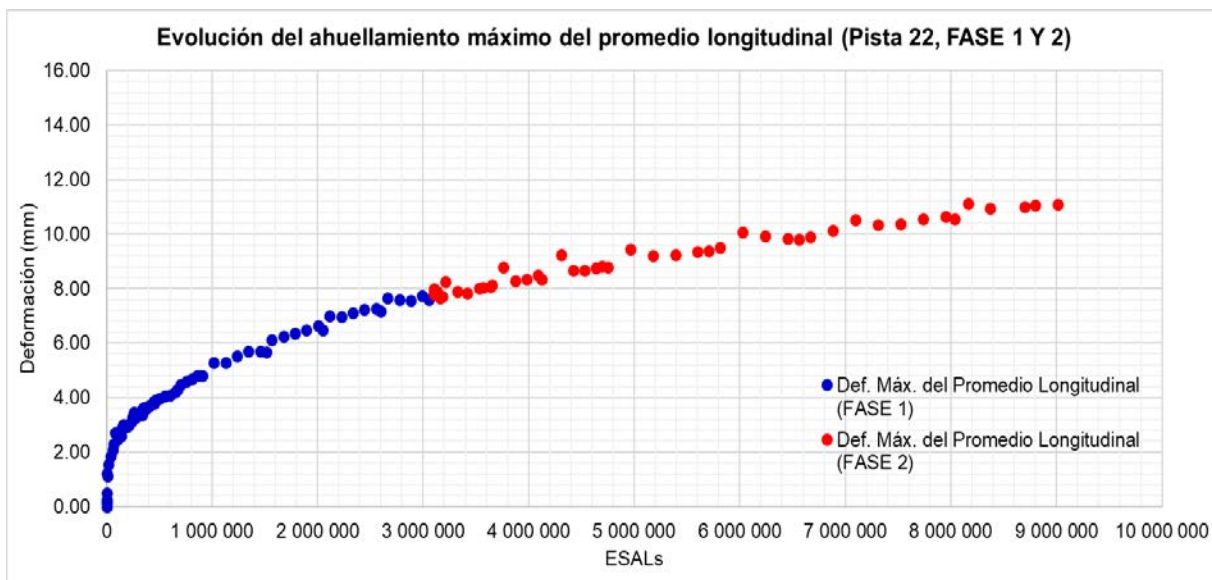


Figura 28. Evolución de ahuellamiento máximo longitudinal promedio. Tramo 022, Fase 1 y Fase 2

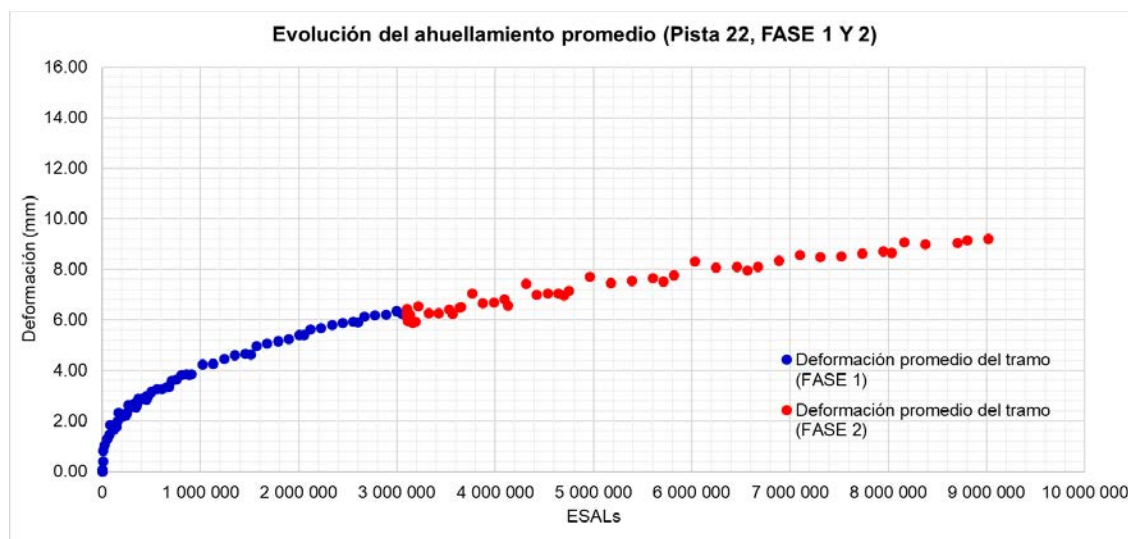


Figura 29. Evolución de ahuellamiento promedio. Tramo 022, Fase 1 y Fase 2

5.2.3 Índice de rugosidad internacional (IRI)

En la **Figura 30** y **Figura 31** se muestra la evolución del IRI para el tramo 018, el cual inicio en 4,2 m/km para el valor promedio y disminuyo hasta los 3,71 m/km. En las **Figura 32** y **Figura 33** se muestra los resultados de tramo 022, cuyo valor promedio de inicio fue 1,80 m/km y final de 2,61 m/km.

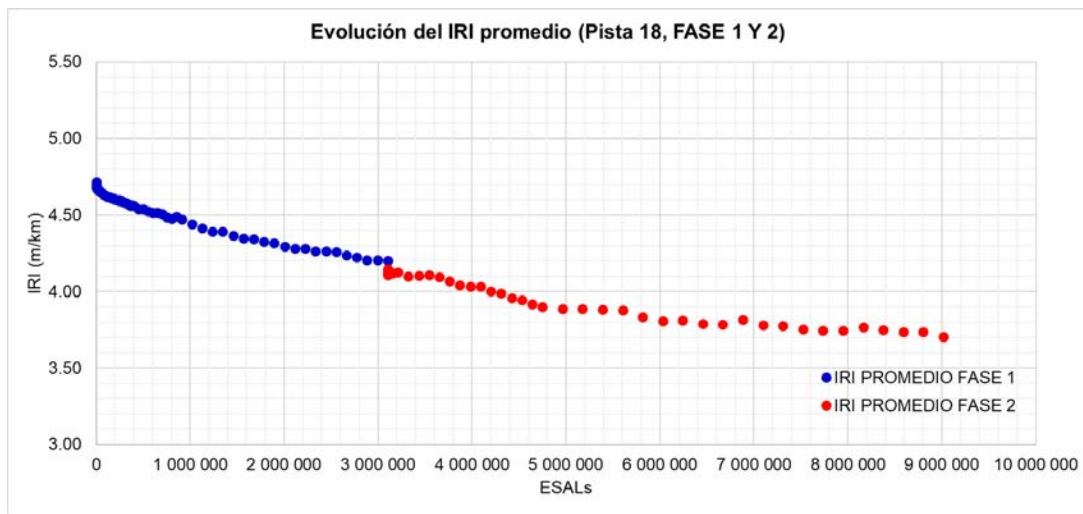


Figura 34. Evolución del IRI promedio. Tramo 018, Fase 1 y Fase 2

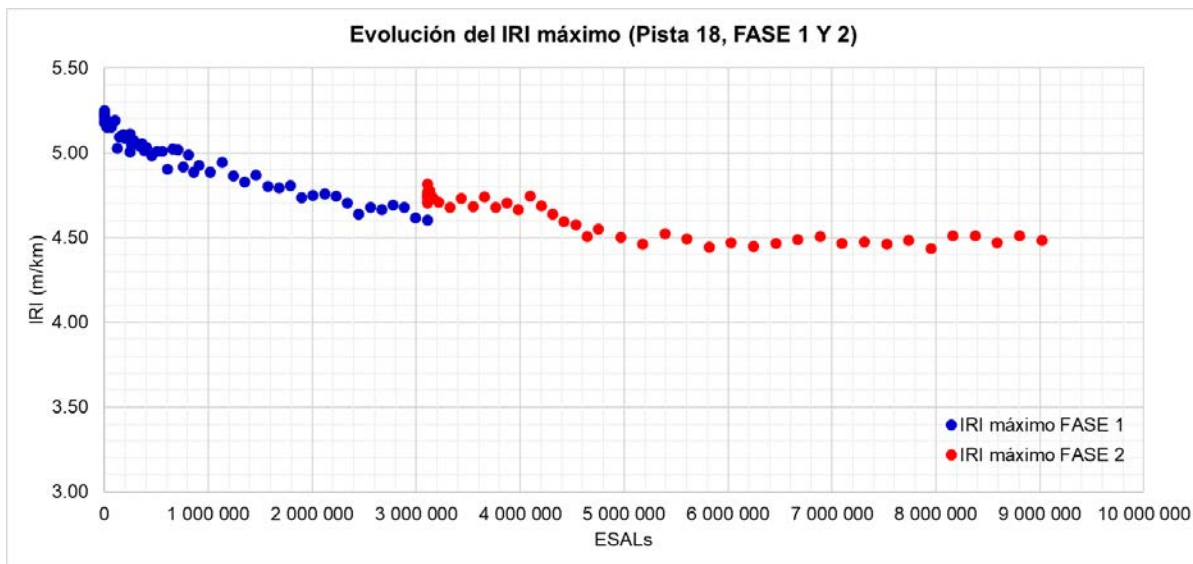


Figura 35. Evolución del IRI máximo. Tramo 018, Fase 1 y Fase 2

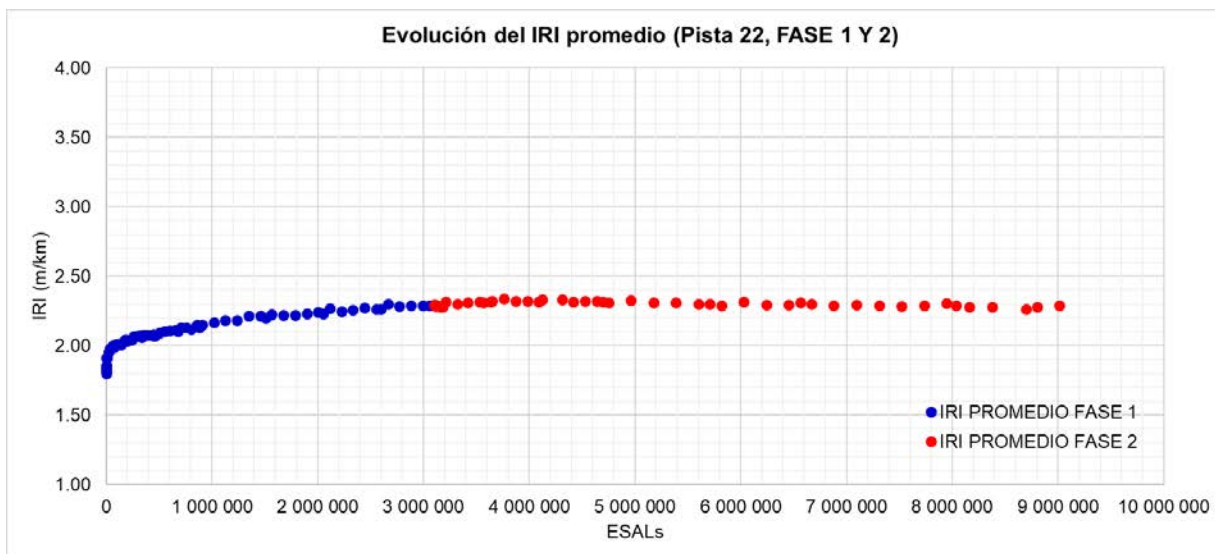


Figura 36. Evolución del IRI promedio. Tramo 022, Fase 1 y Fase 2

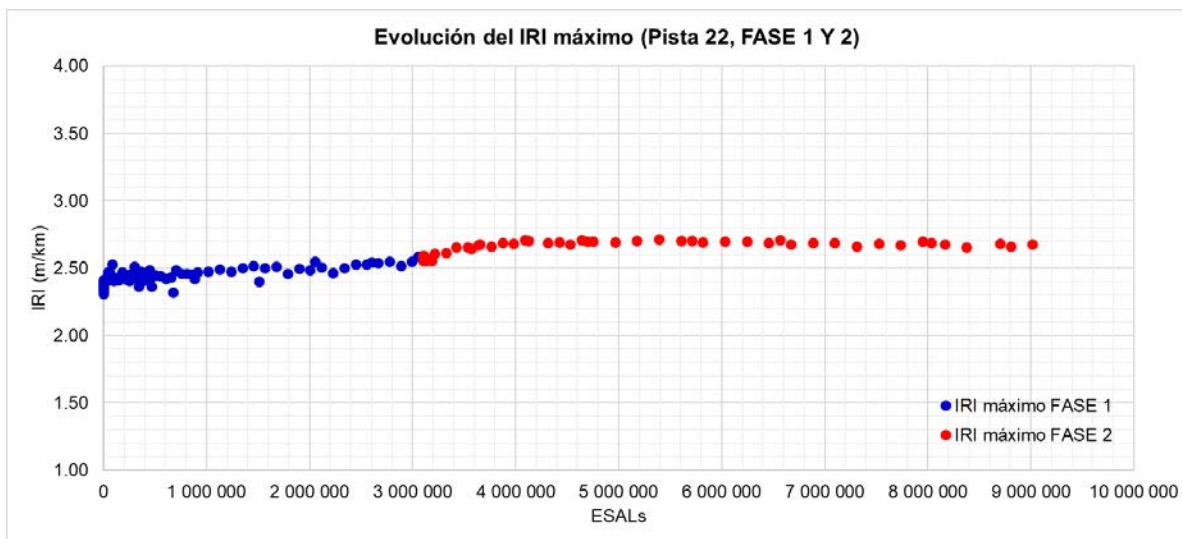


Figura 37. Evolución del IRI máximo. Tramo 022, Fase 1 y Fase 2



5.2.4 Resistencia al deslizamiento

En la **Tabla 11**, **Figura 38** y **Figura 28** se muestran los valores resumen para la condición inicial, final de la fase I y final de la fase II. Es de apreciar que después de la primera fase de carga ambos tramos presentaron una reducción importante de fricción, sin embargo, el que presenta la mayor reducción corresponde a la mezcla asfáltica con arena sintética en su condición sin acondicionamiento con una reducción del 39 %, sin embargo, este valor al final de la fase II de carga se mantuvo sin cambios. Mientras que, en el caso de su contraparte acondicionada, si bien presentó una reducción menor al final de la fase I correspondiente al 20,7 %, al final de la fase II su valor aumento, esto sin representar grandes variaciones.

En contraparte, el tramo modificado presentó un mejor comportamiento al final de la fase I, en ambas condiciones, sin embargo, al final de la fase II de carga sí fue evidente una reducción de la fricción para ambas condiciones. A pesar de que ambos tramos iniciaron la fase II de carga con valores muy similares, el tramo sin acondicionamiento presentó una mayor caída, respecto a su homologo y en general. De los datos observados para todos los tramos, se tiene como conclusión que la condición más crítica para la perdida de fricción es sin acondicionamiento, no obstante, debe ponerse atención a la pérdida abrupta para el tramo modificado, ya que fue el que presento el valor más bajo de todos.

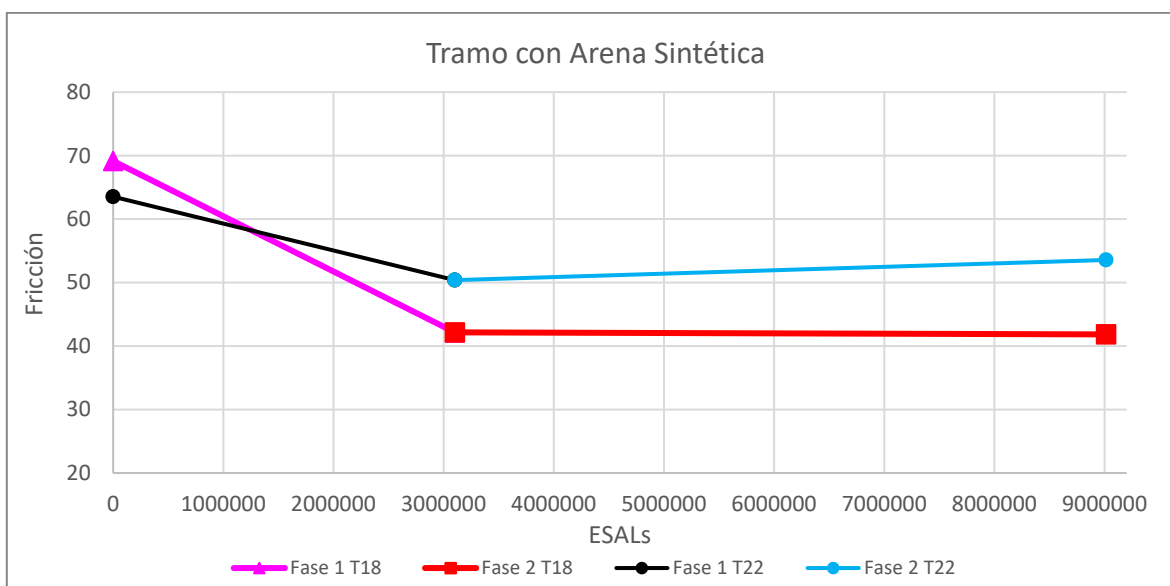
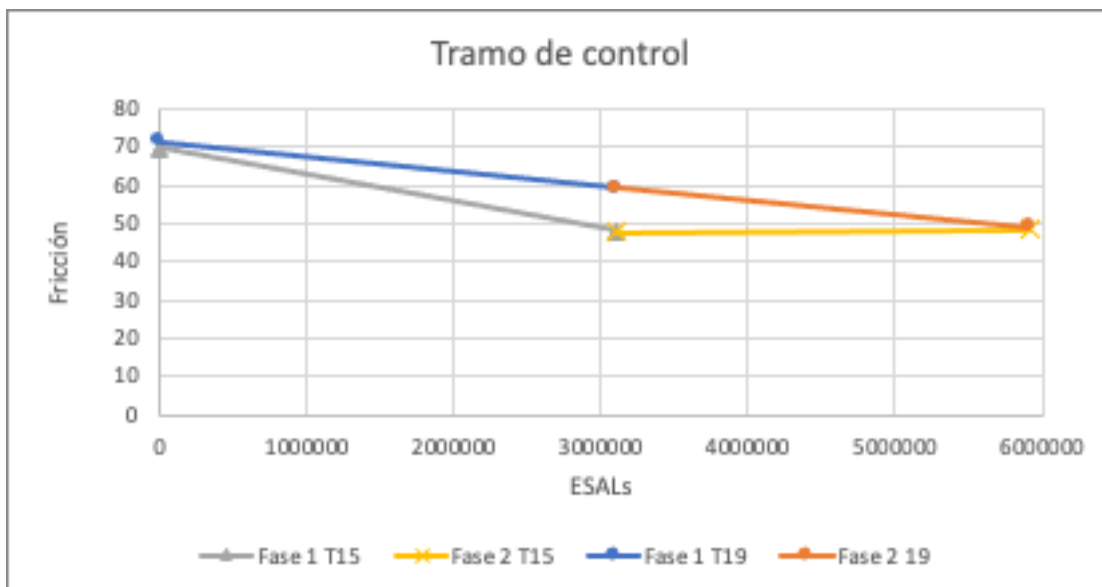


Figura 39. Fricción tramo 022 con arena sintética.



Tabla 11. Comparación de resultados de fricción entre fase I y fase II

Tramo de control

Resumen Fricción de dos fases				
Tramo control		Inicial Péndulo Inglés	Final Fase I Péndulo Inglés	Final Fase II Péndulo Inglés
Sin Acondicionamiento	Tramo 015	69,58	47,83	48,36
Con Acondicionamiento	Tramo 019	71,50	59,00	49,9

Tramo con arena sintética

Resumen Fricción de dos fases				
Tramo con Arena Sintética		Inicial Péndulo Inglés	Final Fase I Péndulo Inglés	Final Fase II Péndulo Inglés
Sin Acondicionamiento	Tramo 018	69,15	42,16	41,84
Con Acondicionamiento	Tramo 022	63,53	50,38	53,56



Grouping Information Using Fisher Method			
Tratamiento	N	Mean	Grouping
T18-F1_I	11	69,145	A
T22-F1_I	11	63,527	B
T22B-F2_F	10	53,560	C
T22B-F2_I	11	50,382	D
T22-F1_F	11	50,382	D
T18B-F2_I	9	42,156	E
T18-F1_F	9	42,156	E
T18B-F2_F	11	41,836	E

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 40. Resultados estadísticos de fricción, péndulo ingles.

5.2.5 Análisis de módulos retrocalculados.

En la **Tabla 12**, se muestran los resultados del proceso retrocálculo de módulos para los tramos 018 y 022. Dicho proceso produjo módulos iniciales similares con leves cambios en los patrones de falla, comentados en las secciones siguientes, debido a las variaciones estadísticas que pueden darse en los valores obtenidos.

Tabla 12. Retrocálculo de módulos para los tramos de control y modificados con arena sintética

Tramo de control

Tramo de control	Capa	Espesor (mm)	Promedio módulo calculado (MPa)		
			Inicial	Final fase I	Final fase II
015	HMA	100	3249	1530	1705
	GB	200	99	100	82
	GSB	300	56	36	46
	SG	-	44	47	36
019	HMA	100	3370	3259	2441
	GB	200	98	98	71
	GSB	300	63	63	58
	SG	-	43	43	32



Tramo con arena sintética

Tramo arena sintética	Capa	Espesor (mm)	Promedio módulo calculado (MPa)		
			Inicial	Final fase I	Final fase II
018	HMA	100	3108	1931	1609
	GB	200	101	60	51
	GSB	300	59	51	50
	SG	-	46	41	39
022	HMA	100	2890	2222	2074
	GB	200	99	73	69
	GSB	300	65	51	44
	SG	-	40	41	42

5.2.5.1 Análisis de varianza para los módulos retrocalculados

Mezcla asfáltica

El análisis de varianza y la agrupación con el método de Tukey al 95 % para la mezcla asfáltica (MAC) en los tramos 018 y 022 muestran tendencias claras en el comportamiento del módulo resiliente.

Para el tramo 018, las medias correspondientes a las condiciones inicial (INI), final de la Fase I (FI) y final de la Fase II (FII) están agrupadas en categorías separadas (A, B, y C) (ver **Figura 29**). Esto indica una disminución significativa y progresiva en la rigidez de la mezcla asfáltica conforme avanza el ensayo, lo que sugiere un deterioro continuo bajo las cargas aplicadas, quedando un módulo residual de aproximadamente un 50 % del módulo inicial.

En el caso del Tramo 022, aunque también se observa una reducción en las medias, las agrupaciones (A, A B, y B) indican que la mayor diferencia significativa ocurre entre la condición inicial (INI) y la final de la Fase II (FII). La condición final de la Fase I (FI) no presenta diferencias significativas claras con las otras dos condiciones, funcionando como un estado intermedio. En este caso el módulo final fue de un 70 % (ver **Figura 30**).



Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable	MAC	N	Media	Agrupación
T18_INI_MAC	9	3121.2	A	
T18_FI_MAC	13	2006	B	
T18_FII_MAC	13	1574.9	C	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 41. Resultados tramo 018 HMA sin acondicionamiento

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable	MAC	N	Media	Agrupación
T22_INI_MAC	9	2910	A	
T22_FI_MAC	13	2454	A B	
T22_FII_MAC	13	2017.5	B	

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 42. Resultados tramo 022 HMA con acondicionamiento

Base granular

Para la base granular (BG) en los tramos 018 y 022 muestran diferencias claras en el comportamiento del módulo resiliente bajo las distintas condiciones de ensayo.

Para el tramo 018, las medias correspondientes a las condiciones inicial (INI), final de la Fase I (FI) y final de la Fase II (FII) están agrupadas en dos categorías principales (A y B). La condición inicial (INI) presenta una media significativamente mayor que las otras dos condiciones (FI y FII), que no muestran diferencias significativas entre sí. Este patrón sugiere que la rigidez de la base granular en el tramo 018 disminuye de forma notable al inicio del ensayo, pero se estabiliza después de la Fase I de carga sin un deterioro adicional significativo hacia la Fase II (ver **Figura 31**).

Por otro lado, en el tramo 022, las medias de las tres condiciones también muestran una tendencia de reducción en la rigidez. La condición inicial (INI) tiene una media significativamente mayor que la condición final de la Fase II (FII), mientras que la condición final de la Fase I (FI) se encuentra en un estado intermedio (A B), sin diferencias significativas con las otras dos condiciones. Esto indica que en el tramo 022, la base granular experimenta una disminución de rigidez desde el inicio del ensayo, pero la mayor

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 55 de 70
--	------------	-----------------



reducción ocurre durante la Fase I de carga, sin cambios significativos hacia la Fase II (ver **Figura 32**).

En resumen, ambos tramos muestran una disminución en la rigidez de la base granular con el avance de las fases de carga, con una estabilización después de la Fase I, lo que sugiere que la base granular se acomoda y alcanza un estado de equilibrio tras las cargas aplicadas. Sin embargo, el comportamiento es más pronunciado en el tramo 018, donde la diferencia entre la condición inicial y las fases de carga es más significativa.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable BG	N	Media	Agrupación
T18_INI_BG	9	102.00	A
T18_FI_BG	13	60.62	B
T18_FII_BG	13	49.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 43. Resultados tramo 018 BG sin acondicionamiento

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable BG	N	Media	Agrupación
T22_INI_BG	9	99.22	A
T22_FI_BG	13	75.26	B
T22_FII_BG	13	71.76	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 44. Resultados tramo 022 BG con acondicionamiento

Subbase

Para la subbase (SB) en los tramos 018 y 022 muestra una tendencia clara de disminución en el módulo resiliente a medida que avanza el ensayo en ambos tramos.

Para el tramo 018, las medias correspondientes a las condiciones inicial (INI), final de la Fase I (FI) y final de la Fase II (FII) están agrupadas en dos categorías (A y B). La condición inicial (INI) presenta una media significativamente mayor que las condiciones de la Fase I (FI) y la Fase II (FII), que no muestran diferencias significativas entre sí. Esto indica que la



rigidez de la subbase disminuye notablemente al inicio del ensayo, pero se estabiliza después de la Fase I de carga, sin un deterioro adicional significativo hacia la Fase II (ver **Figura 33**).

Por otro lado, en el tramo 022, las medias de las tres condiciones también muestran una tendencia decreciente en la rigidez, con la condición inicial (INI) siendo significativamente mayor que las condiciones de la Fase I (FI) y la Fase II (FII), las cuales no presentan diferencias significativas entre sí. Esto sugiere que, al igual que en el tramo 018, la subbase experimenta una disminución de rigidez al inicio del ensayo, pero se estabiliza a medida que avanzan las fases de carga, con la mayor reducción ocurriendo durante la Fase I (ver **Figura 34**).

En resumen, ambos tramos presentan un comportamiento similar, donde la rigidez de la subbase disminuye progresivamente desde la condición inicial hasta la Fase I de carga, pero se estabiliza en la Fase II. Sin embargo, el tramo 018 muestra una ligera mayor diferencia entre la condición inicial y las fases de carga en comparación con el tramo 022, donde la reducción de rigidez es algo más pronunciada

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable SB N Media Agrupación

T18_INI_SB	9	59.67	A
T18_FI_SB	13	48.93	B
T18_FII_SB	13	48.67	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 45. Resultados tramo 018 SBG sin acondicionamiento

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable SB N Media Agrupación

T22_INI_SB	9	66.22	A
T22_FI_SB	13	49.18	B
T22_FII_SB	13	45.04	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 46. Resultados tramo 022 SBG con acondicionamiento

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 57 de 70
--	------------	-----------------



Subrasante

Para el tramo 018, las medias correspondientes a las condiciones inicial (INI), final de la Fase I (FI) y final de la Fase II (FII) están agrupadas en dos categorías (A y B). La condición inicial (INI) tiene una media significativamente mayor que las condiciones de la Fase I (FI) y la Fase II (FII), que no muestran diferencias significativas entre sí. Esto sugiere que la rigidez de la subrasante disminuye al inicio del ensayo y se estabiliza posteriormente en las fases de carga (ver **Figura 35**).

En el tramo 022, las medias correspondientes a las tres condiciones (INI, FI, y FII) están agrupadas en una única categoría (A), lo que indica que no hay diferencias significativas entre las distintas fases del ensayo. Esto sugiere que, en este tramo, la subrasante mantiene una rigidez más constante a lo largo del ensayo sin que exista una transferencia de daño que afecte la rigidez (ver **Figura 36**).

En resumen, mientras que en el tramo 018 se observa una reducción significativa en la rigidez de la subrasante desde la condición inicial hacia las fases de carga, en el tramo 022 la rigidez parece mantenerse relativamente estable a lo largo del ensayo.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable SR	N	Media	Agrupación
T18_INI_SR	9	46.11	A
T18_FI_SR	13	40.682	B
T18_FII_SR	13	38.827	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 47. Resultados tramo 018 SR sin acondicionamiento

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Variable SR	N	Media	Agrupación
T22_FII_SR	13	41.90	A
T22_FI_SR	13	40.93	A
T22_INI_SR	9	40.56	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 48. Resultados tramo 022 SR con acondicionamiento

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 58 de 70
--	------------	-----------------



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Para evaluar el desempeño mediante un ensayo acelerado de desempeño de pavimentos se construyeron dos tramos con mezcla asfáltica con la adición de 1 % de arena sintética, uno de los tramos fue evaluado a temperatura ambiente cercana a los 22 °C (tramo 018) y el segundo (tramo 022) sometido a un protocolo de alta temperatura (acondicionamiento) con valor objetivo de 42 °C.
2. Se evaluaron complementariamente dos tramos de control sin adición de arena sintética los cuales mantienen las mismas características en cuanto a estructura y materiales que los tramos modificados. Estos tramos se ensayaron con el objetivo de comprar el comportamiento y determinar los efectos de la adición del material reciclado en el desempeño de la estructura de pavimento respecto de la estructura de control.
3. Se logró realizar lo establecido en el esquema del experimento que se dividió en dos fases; en una primera se aplicaron un total de 3,1 millones de ESALs y en la segunda fase se aplicaron 6,9 millones de ESALs adicionales, para una aplicación de cargas totales equivalente a 9 millones de ESALs.
4. Se evaluó el tramo con ensayos no destructivos mediante deflectometría de impacto FWD que permitió valorar la capacidad estructural inicial y final de los tramos (control y con arena sintética) ensayados a temperatura ambiente (22 °C) y alta temperatura (41 °C), resultando lo siguiente:
 - 4.1. La deflexión inicial de los tramos 018 y 022 con arena sintética presentaron valores entre 750 y 850 micras, por su parte, los tramos de control presentaron valores dentro del mismo rango de deflexiones. Esto permite establecer que el paquete estructural inicial presentaba una capacidad estructural similar para ambos tramos.
 - 4.2. La deflexión final al finalizar la fase II de carga (9 millones de ESAL) para los tramos con arena sintética presentó: -valores entre 1100 y 1400 micras para el tramo ensayado a temperatura ambiente (T018) y -valores entre 1000 y 1250 micras para el tramo a alta temperatura (T022). Estas diferencias en las deflexiones finales corresponden a una diferencia en la caída de la capacidad estructural que podría

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 59 de 70
--	------------	-----------------



deberse a la menor rigidez de la mezcla asfáltica a alta temperatura, que a su vez está relacionada con una menor susceptibilidad a la pérdida de capacidad por fatiga del material.

- 4.3. La deflexión final de la fase II de carga (9 millones de ESA) para los tramos de control presentó: -valores entre 950 y 1200 micras para el tramo ensayado a temperatura ambiente y -valores entre 950 y 1100 micras para el tramo a alta temperatura. Al comparar estos resultados se puede ver que estas deflexiones son menores que los registrados para la arena sintética. Lo anterior, se relaciona con una mayor pérdida de capacidad estructural de los tramos con arena sintética en comparación con los tramos de control ensayadas en ambas condiciones de temperatura.
5. Con base en la misma deflectometría de impacto se establecieron parámetros estructurales que permiten analizar de manera segmentada (capa superficial, capa intermedia y capa inferior) la capacidad estructural de ambos paquetes (control y arena sintética) y valorar cómo se distribuye la pérdida de capacidad en las distintas capas producto de la aplicación de cargas.
- 5.1. Los parámetros BLI, MLI y LLI para los tramos 018 y 022 muestran la degradación progresiva que sufren las capas del pavimento producto de la aplicación de cargas durante las fases I y II del experimento. Mediante el BLI se puede establecer que existe un menor deterioro promedio de la capa superior (mezcla asfáltica) ensayada a alta temperatura ($BLI = 390$) respecto de la condición con temperatura ambiente ($BLI = 464$), las diferencias en la capacidad estructural final de ambos tramos se deben teóricamente a las diferencias en rigidez por encontrarse a distintas temperaturas.
- 5.2. Al comparar los parámetros MLI y LLI de los tramos (022 y 018) a alta temperatura respecto a la temperatura ambiente, la desviación estándar de los resultados no permite concluir que exista alguna diferencia en reducción de capacidad para las capas intermedias e inferiores para los tramos con adición de arena sintética.
- 5.3. Los valores de BLI al finalizar la fase II de carga para los tramos de control fueron de 375 para el tramo a temperatura ambiente y de 326 para el tramo a alta temperatura. Al comparar estos resultados vemos que son menores que los presentados para la arena sintética. Esto se relaciona con una mayor pérdida de capacidad estructural en la capa superficial de arena sintética, en comparación con



los tramos de control ensayadas en ambas condiciones de temperatura, donde la diferencia es más marcada a temperatura ambiente.

6. En cuanto a la deformación permanente, medida a lo largo del experimento, se estableció un valor límite superior correspondiente a 12 mm.
 - 6.1. Para los tramos con arena sintética luego de los 9 millones de ESALs, arrojó valores máximos correspondientes a 11,7 mm y 11,1 mm para los tramos 018 y 022 respectivamente, inferior al límite superior definido de 12 mm.
 - 6.2. Los valores de deformación permanente obtenidos para el tramo de control correspondieron a valores máximos de 8 mm para el tramo a temperatura ambiente y de 10,5 mm para el tramo a alta temperatura, valores un poco menores respecto de los tramos con arena sintética, manteniéndose en todos los casos por debajo del valor límite de 12mm. Para todas las condiciones las mezclas mostraron cumplimiento del requerimiento establecido para deformación permanente.
7. En cuanto al índice de regularidad internacional (IRI) medido a lo largo del experimento y ligado con el estado funcional de las estructuras, donde su aumento se relaciona con el deterioro estructural progresivo producto de las cargas. Los valores iniciales de IRI se relacionan con procesos constructivos o condiciones propias del tramo que afectan la regularidad de la superficie, un pavimento con un IRI inicial más bajo podría experimentar un menor incremento en el IRI a lo largo del tiempo, lo que podría hacer parecer que su desempeño es superior. Los resultados fueron los siguientes.
 - 7.1. Los tramos con arena sintética obtuvieron valores iniciales de IRI de 4,20 m/km y de 1,80 m/km para los tramos 018 (temperatura ambiente) y 022 (alta temperatura) respectivamente.
 - 7.2. Los valores finales de IRI promedio fueron de 3,71 m/km en el tramo 018 (temperatura ambiente) mejorando su regularidad en relación con el valor inicial medido, mientras que para el tramo 022 (alta temperatura) fue de 2,61 desmejorando.
 - 7.3. Por su parte los valores iniciales para los tramos de control fueron 6,55 m/km (temperatura ambiente) y 3,41 m/km (alta temperatura). Estos evolucionaron al final del ensayo a valores de 7,31 m/km (temperatura ambiente) desmejorando y 3,31 (alta temperatura) para una leve mejora.



- 7.4. Tanto para los tramos de control como para los tramos con adición de arena sintética se registró una mejora y desmejora de la regularidad, por lo no se pueden establecer relaciones basadas en la adición o no de la arena sintética.
8. En cuanto a la fricción superficial de las estructuras medida a lo largo del experimento y ligado con requerimientos de seguridad de los usuarios (frenado o hidroplaneo en condiciones de lluvia), los resultados obtenidos fueron los siguientes.
- 8.1. Los tramos con arena sintética obtuvieron valores iniciales de fricción de 69,15 y de 63,53 para los tramos 018 (temperatura ambiente) y 022 (alta temperatura) respectivamente.
- 8.2. Los valores finales fricción fueron de 41,84 en el tramo 018 (temperatura ambiente) lo que corresponde a un 39 % de reducción, mientras que para el tramo 022 (alta temperatura) fue de 53,56 correspondiente a un 20,7 % de reducción.
- 8.3. Por su parte los valores iniciales para los tramos de control fueron 69,58 (temperatura ambiente) y 71,50 (alta temperatura). Estos evolucionaron al final del ensayo a valores de 48,36 (temperatura ambiente) y 52,36 (alta temperatura) para una reducción del 30 % y 27 % respectivamente.
9. Se desarrolló un protocolo efectivo para el acondicionamiento térmico de las mezclas, permitiendo evaluar su desempeño a diferentes temperaturas, lo cual es crucial para replicar las condiciones reales de servicio.
10. Con base en el análisis de retrocálculos de módulos a partir de la deflectometría de impacto (FWD) para los tramos de control y con arena sintética se obtuvieron los módulos resilientes iniciales (capacidad estructural) de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento y el deterioro sufrido por la aplicación de las cargas mediante los módulos de las capas al final de la aplicación de cargas. Los análisis y comparaciones muestran lo siguiente.
- 10.1. Los módulos iniciales para las distintas capas del tramo 018 (temperatura ambiente) correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 3108 kPa, base granular (BG) 101 kPa, subbase granular 59 kPa y subrasante 46 kPa. Por su parte, los módulos iniciales para estas mismas capas del tramo 022 (alta temperatura) correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 2890 kPa, base granular (BG) 99 kPa, subbase granular 65 kPa y subrasante 40 kPa. Los resultados muestran que el módulo de cada una de las capas para los dos tramos con arena sintética presenta



una capacidad estructural similar, donde las variaciones estarían asociadas a la dispersión o incertidumbre propia del procedimiento de ensayo y análisis.

10.2. Por su parte los módulos finales del tramo 018 (temperatura ambiente) correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 1609 kPa, base granular (BG) 51 kPa, subbase granular 50 kPa y subrasante 39 kPa, mientras que para las capas del tramo 022 (alta temperatura) los módulos finales correspondieron a mezcla asfáltica (MAC) 2074 kPa, base granular (BG) 69 kPa, subbase granular 44 kPa y subrasante 42 kPa. Al analizar la pérdida de capacidad de ambos tramos, se concluye que el tramo a temperatura ambiente fue el que mayor pérdida de capacidad sufrió en comparación con el tramo a alta temperatura, este daño es más evidente en la capa de MAC. Lo anterior reafirma que la menor rigidez de la mezcla asfáltica producto de una mayor temperatura podría generar una tasa de daño menor a la que tiene a una menor temperatura, lo anterior de acuerdo con criterios teóricos de daño por cargas repetidas o fatiga.

10.3. Los módulos iniciales para las distintas capas del tramo de control a temperatura ambiente correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 3249 kPa, base granular (BG) 99 kPa, subbase granular 56 kPa y subrasante 44 kPa. Por su parte los módulos iniciales para estas mismas capas del tramo a alta temperatura correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 3370 kPa, base granular (BG) 98 kPa, subbase granular 63 kPa y subrasante 43 kPa. La capacidad estructural inicial de los tramos de control y con arena sintética se encuentra dentro de los mismos rangos para las distintas capas.

10.4. Los módulos finales para el tramo de control a temperatura ambiente correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 1564 kPa, base granular (BG) 84 kPa, subbase granular 36 kPa y subrasante 36 kPa. Por su parte los módulos finales para estas mismas capas del tramo a alta temperatura correspondieron a: mezcla asfáltica (MAC) 2477 kPa, base granular (BG) 79 kPa, subbase granular 36 kPa y subrasante 32 kPa. Al igual que para los tramos con arena sintética se observa que el menor deterioro se presentó en el tramo a alta temperatura.

10.5. Al comparar el deterioro de la capa de mezcla asfáltica (control y arena sintética) los módulos para los tramos a temperatura ambiente sufrieron un deterioro similar, mientras que para alta temperatura se presentó una mayor reducción del módulo o pérdida de capacidad estructural en el tramo con la arena sintética.



11. La construcción de tramos de prueba con mezclas asfálticas modificadas utilizando materiales de desecho permitió obtener datos valiosos sobre el comportamiento de estos materiales en condiciones de carga real.
12. Se recomienda realizar estudios para profundizar y tener mayor claridad sobre el índice de regularidad internacional (IRI).
13. Se recomienda analizar las causas por las cuales se presentó una mayor caída de la capacidad estructural de la mezcla con arena sintética respecto al tramo de control lo cual podría relacionarse con una mayor evolución del agrietamiento por fatiga y deterioro en la estructura en condiciones de humedad.
14. Se recomienda en futuros experimentos mejorar el control de la regularidad inicial (IRI) de los tramos de prueba pues estos inciden en la evolución de la regularidad a lo largo del experimento y en la evolución del deterioro.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aschuri, I., Yamin, A., & Widyasih, Y. D. (2016). The use of waste plastic as a partial substitution aggregate in asphalt concrete pavement. Indonesia.
- Hassani, A., Ganjidoust, H., & Maghanaki, A. A. (2005). Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement. Irán.
- Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 50(2), 2-9.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) (2018). *Parámetros de Análisis Estructural de Pavimentos en Costa Rica* (LM-PI-UMP-083-R1). Montes de Oca, San José, Costa Rica: LanammeUCR.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2020). Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2020). San José: MOPT.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M., & Karim, M. R. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. Malasia: Journal of Engineering Science and Technology.



- NAPA (2018). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2018. Information Series 138 — Executive Summary. National Asphalt Pavement Association. Greenbelt, MD
- Rahman, W. M., Wahab, A. F., & Yahaya, F. (2014). Optimisation of recycled high-density polyethylene pellet as aggregate replacement for road pavement. Malasia: Journal of Engineering and Technology.
- Zoorob, S., & Suparma, L. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). Reino Unido: Elviesier Science Ltd



8 ANEXOS

8.1 Anexo 1: Esquema de ensayo

En las siguientes líneas se muestra los detalles de la solicitud de ensayos:

Cliente: Unidad de investigación en infraestructura y transporte (UIIT), PITRA

Proyecto: UIIT-2020-01 Diseño, construcción y evaluación del desempeño de mezcla modificada con material de desecho, aprobado según Acta 9-2019 del Consejo Técnico del LanammeUCR

Muestras: En la Tabla 1 se enumera la muestra por ensayar.

Descripción del trabajo: A continuación, se describen los ensayos que se solicitan a los Laboratorios del Área de Transportes y Pavimentos.

Protocolo de ejecución del ensayo: se solicita que se ejecuten 20 000 repeticiones de carga por día, bidireccional con una desviación lateral de 8 in a 10 km/h, presión de inflado 100 psi, además de lo establecido en la **Tabla 4**. El ensayo deberá detenerse si ocurre alguna de las especificaciones mostradas en la **Tabla 3**.

Resumen de ensayos: En la **Tabla 1** se detalla a manera de resumen los ensayos que se desean realizar en los tramos de prueba.

Tabla 1. Resumen de ensayos a realizar por tramo

# muestra	Tramo	Ensayos por realizar	Frecuencia
		Perfil Superficial	Cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Deflectómetro de superficie	Una vez al día o Cada 20 000 repeticiones de carga ²
		Control de temperatura	Cada 30 minutos ³ los 7 días de la semana
		Fotografías	Cada 100 000 repeticiones de carga ³

² La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla 2

³ La aplicación y frecuencia del ensayo se detallan en la tabla 5



Ensayos de desempeño: Para cada tramo individual efectuar los ensayos que se especifican en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Ensayos de desempeño por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Perfil superficial	Perfil de la pista antes de iniciar el ensayo (0 repeticiones), que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial	Una vez antes de iniciar el ensayo
	Perfil de la pista que permita ver la evolución del ahuellamiento y regularidad superficial en el tramo	Cada 20 000 ^a repeticiones hasta la falla (Tabla 3)
Deflectómetro de superficie (RSD, por sus siglas en inglés)	Se definirán 5 puntos de análisis a cada 1m dentro del tramo	Una vez antes de iniciar el ensayo
	Las mediciones deberán realizarse todos los días antes de iniciar con el ciclo de calentamiento de la Cámara. Y los viernes se deberá realizar una medición adicional al final de la jornada (temperatura alta).	
	Se deberá generar un archivo inicial de calibración en cada cambio de carga, en dos extremos de los 5 puntos definidos, con mediciones paralelas a la línea de centro (centro de llanta), a 40 kN y 2 km/h con 3 repeticiones por punto	Una vez al día o aproximadamente cada 20 000 ^b repeticiones
	Mediciones a 40 kN y 2 km/h en los 5 puntos de medición, utilizando la desviación angular en la posición de la viga definida en el primer ensayo a escala natural	Una vez al día o aproximadamente cada 20 000 ^b repeticiones
	Medición a 20 kN y 2 km/h en los 2 puntos extremos de las 5 ubicaciones definidas, con orientación paralela a la línea de centro.	Cada 100 000 repeticiones

Notas:

- ^a Para las primeras 20 000 repeticiones de cargas, se realizarán los ensayos a una mayor frecuencia. A saber, se tomarán mediciones a las 0, 10, 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 repeticiones.
- ^b Para las primeras 20 000 repeticiones de cargas, se realizarán los ensayos a una mayor frecuencia. A saber, se tomarán mediciones a las 0, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000 repeticiones. Reportar de forma adicional las temperaturas (aire, superficial, 2cm, 5 cm, y

Informe EIC-Lanamme-INF-1129-2024-UIIT	Enero 2025	Página 67 de 70
--	------------	-----------------



9cm, en las repeticiones de 0, 1000, 2000, 5000, 10000 y 20000). Se recomienda apagar las lámparas sólo cuando sea estrictamente necesario.

Tabla 3. Especificaciones de falla para detención del ensayo

Ocurrencia	Especificación
1	Se cumplen la totalidad de las repeticiones de carga establecidas en la Tabla 4.
2	El módulo de la mezcla asfáltica es igual o menor al 30% del valor del módulo inicial (según la etapa I), calculado a partir de los datos asociados al retrocálculo realizado por la UIIT.
3	Ocorre una deformación promedio máxima de 12 mm (calculada promediando los valores de mayor deformación de cada perfil transversal obtenido). Este valor puede ser revisable semanalmente en caso de que el ahuellamiento sea acelerado y se tenga un número bajo de repeticiones.

Tabla 4. Protocolo de ejecución del ensayo por tramo de pavimento individual

Cantidad de repeticiones	Carga	Ejecución de las repeticiones de carga
300 000	60 kN	Completas
400 000	70 kN	Revisable según especificaciones de falla (Tabla 3)

Otras mediciones: Además de lo solicitado anteriormente se deberán realizar los ensayos definidos en la Tabla 5.

Tabla 5. Otras mediciones a realizar por tramo de pavimento individual

Ensayo	Descripción	Periodicidad
Temperatura	Perfil de temperatura del pavimento a estas profundidades (aire, superficial, 2cm, 5cm y 9 cm).	Mediciones continuas cada 30 minutos
Fotografía	Registro fotográfico en planta, conformado por una secuencia de fotografías estándar en alta definición tal que, permita realizar un foto "stitching" del tramo	Cada 100 000 repeticiones ó a la aparición de nuevos deterioros. Notificar a la UIIT

8.2 Anexo 2: Retrocálculo de módulos

Tablas de resultados de retrocálculo de módulos posterior al ensayo de deflectometría de impacto FWD. Los valores extremos fueron descartados ya que no pertenecen a la zona donde aplica daño el HVS

Tabla 13. Datos para retrocalculo de modulo final para el tramo 018

Tramo	Pto	Estación	HMA	GB	GSB	SG	Log (HMA)	Log (GB)	Log (GSB)	Log (SG)
018	Fina fase II	0	3420	34	65	44	3.53405	1.52758	1.81402	1.63920
018	Fina fase II	0.001	1359	38	43	37	3.13335	1.58433	1.63185	1.57278
018	Fina fase II	0.001	1710	30	49	37	3.23302	1.47355	1.68867	1.57278
018	Fina fase II	0.001	1545	38	58	40	3.18887	1.58433	1.76466	1.59866
018	Fina fase II	0.002	1699	34	51	36	3.23026	1.52758	1.70541	1.56178
018	Fina fase II	0.002	1663	33	48	37	3.22079	1.51658	1.67746	1.56746
018	Fina fase II	0.003	1363	49	49	36	3.13434	1.68923	1.68646	1.55727
018	Fina fase II	0.004	1380	83	31	43	3.13974	1.91784	1.49147	1.63397
018	Fina fase II	0.004	1363	52	51	39	3.13434	1.71587	1.71103	1.59506
018	Fina fase II	0.004	1614	50	45	37	3.20799	1.70243	1.65205	1.56703
018	Fina fase II	0.005	1545	63	43	44	3.18887	1.79727	1.63185	1.64621
018	Fina fase II	0.005	1931	48	54	37	3.28578	1.68015	1.73222	1.57278
018	Fina fase II	0.006	1542	65	74	35	3.18797	1.81296	1.86954	1.54930
018	Fina fase II	0.006	1761	63	38	44	3.24578	1.79934	1.57732	1.64741
018	Fina fase II	0.007	1084	170	67	39	3.03508	2.23076	1.82830	1.59069
Promedio			1575	50	49	39	1,566	48	48	39

Informe EIC-Lanamme-INF-1473-2022	Mayo 2023	Página 69 de 70
-----------------------------------	-----------	-----------------



Tabla 14. Datos para retrocalculo de modulo final para el tramo 22

Tramo	Pto	Estación	HMA	GB	GSB	SG	Log (HMA)	Log (GB)	Log (GSB)	Log (SG)
022	Final fase II	0	4518	94	44	49	3.65499	1.97457	1.64096	1.69457
022	Final fase II	0.001	1628	92	54	40	3.21164	1.96365	1.73136	1.60514
022	Final fase II	0.001	2186	49	83	47	3.33974	1.69371	1.91928	1.67382
022	Final fase II	0.002	2222	56	56	41	3.34674	1.75105	1.75172	1.61263
022	Final fase II	0.002	1815	83	51	42	3.25895	1.92099	1.70667	1.62110
022	Final fase II	0.002	1811	85	44	47	3.25795	1.93095	1.64257	1.67324
022	Final fase II	0.003	1638	99	33	42	3.21427	1.99462	1.52447	1.62585
022	Final fase II	0.004	2229	45	43	44	3.34813	1.65566	1.63006	1.64242
022	Final fase II	0.004	2110	60	31	51	3.32420	1.77578	1.48838	1.70383
022	Final fase II	0.005	2666	49	39	39	3.42593	1.68862	1.58706	1.58742
022	Final fase II	0.005	2444	61	45	34	3.38814	1.78760	1.65026	1.53470
022	Final fase II	0.006	2002	47	36	40	3.30142	1.67477	1.55377	1.60148
022	Final fase II	0.006	2026	54	33	42	3.30674	1.73208	1.51806	1.62735
022	Final fase II	0.007	1450	151	38	35	3.16130	2.18027	1.58427	1.54759
022	Final fase II	0.007	1635	70	47	37	3.21343	1.84222	1.66757	1.56820
Promedio			2018	72	45	42	1,990	67	43	42