



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**



**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-074-R1

INFORME DE AVANCE FASE 1 ENSAYO ACELERADO A ESCALA NATURAL DE PAVIMENTOS

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Marzo, 2018



| | | |
|---|---|---|
| 1. Informe LM-PI-UMP-074-R1 | | 2. Copia No 1 |
| 3. Título y subtítulo: Informe De Avance - Fase 1 Ensayo Acelerado A Escala Natural De Pavimentos | | 4. Fecha del Informe 20 de Marzo de 2018 |
| 7. 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 / Fax: (506) 2511-4440 | | |
| 8. Notas complementarias | | |
| 9. Resumen <i>El presente informe recopila todas las etapas que fueron necesarias para ejecutar la primera fase del ensayo acelerado a escala natural de pavimentos en Costa Rica. Partiendo de la construcción de las instalaciones del primer laboratorio de ensayos acelerados de pavimentos de la región.</i> <i>Dicha fase tiene como propósito medir la respuesta de dichas estructuras ante cargas reales y así cuantificar su deterioro. Las mediciones se realizan con el objetivo final de calibrar modelos de predicción de los distintos tipos de deterioro (ej. deformación plástica, agrietamiento por fatiga) que puede presentar el pavimento; todo dentro de una mejora sustancial de los procesos de diseño de pavimentos</i> <i>El informe se divide en 7 secciones: la primera plantea el contexto del estudio, con la introducción y los objetivos del mismo. La segunda sección describe los tramos de prueba que se diseñaron y construyeron para la primera serie de ensayos a ser ejecutados en el PaveLab, así como la caracterización de los materiales de las distintas capas de la estructura.</i> <i>La tercera sección describe el tipo de instrumentación que se colocó dentro de las estructuras del pavimento, o que es utilizada con el HVS para medir propiedades específicas de los materiales. La sección cuatro presenta algunos resultados preliminares que se han venido obteniendo, y que resultan de gran interés en el marco del desarrollo de los experimentos. Parte de estos resultados se han incluido en anexos.</i> <i>La sección cinco se ha reservado para las próximas etapas a desarrollar como parte del proyecto. En la sección seis se presenta una actualización del cronograma del proyecto. Finalmente, la sección siete presenta las referencias bibliográficas.</i> | | |
| 10. Palabras clave HVS, Ensayo acelerado de pavimentos, PaveLab | 11. Nivel de seguridad: Ninguno | 12. Núm. de páginas 126 |
| 13. Preparado por: | | |
| Ing. Edgar Camacho Garita Ingeniero Unidad de Materiales y Pavimentos | Ing. Eliécer Arias Barrantes Ingeniero Unidad de Materiales y Pavimentos | |
| Fecha: / / | Fecha: 20 / 03 / 2018 | |
| 14. Revisado por: | | 15. Aprobado por: |
| Ing. José Pablo Aguiar M., Ph. D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos | | Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA |
| Fecha: / / | | Fecha: / / |



TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | Introducción | 9 |
| 1.1. | Contexto general donde se desarrolla el proyecto | 9 |
| 1.2. | Objetivo de este informe..... | 12 |
| 1.3. | Productos esperados..... | 12 |
| 2. | Descripción de las pistas de ensayo | 14 |
| 2.1. | Ubicación de las pistas..... | 14 |
| 2.2. | Definición de los tramos de ensayo | 15 |
| 2.3. | Características de los materiales empleados | 17 |
| 2.4. | Características de espesores colocados..... | 25 |
| 2.5. | Diseño y construcción del espacio para los ensayos..... | 28 |
| 2.6. | Estructura perimetral de la fosa | 29 |
| 2.7. | Sistema de saturación, filtro y drenaje..... | 32 |
| 2.8. | Colocación del material sub-rasante | 36 |
| 2.9. | Proceso constructivo del pavimento de las pistas de ensayo | 38 |
| 2.10. | Limitaciones constructivas | 46 |
| 2.10.1. | Limitaciones de materiales disponibles..... | 46 |
| 2.10.2. | Limitaciones de espacio y acomodo de los equipos..... | 48 |
| 2.10.3. | Limitaciones en la colocación y utilización de los instrumentos | 49 |
| 3. | Instrumentación colocada..... | 50 |
| 3.1. | Distribución de los sensores | 50 |
| 3.2. | Perfilómetro laser 3D (RSP)..... | 51 |
| 3.3. | Dynatest PAST II..... | 53 |
| 3.4. | Dynatest SOPT | 54 |
| 3.5. | Deflectómetro de Profundidad Múltiple (MDD) | 55 |
| 3.6. | Medidor de Actividad de Grietas..... | 58 |
| 3.7. | Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)..... | 59 |
| 3.8. | Termocuplas | 60 |
| 3.9. | Medidor de humedad relativa en suelos y bases granulares | 61 |
| 3.10. | Sistema de Adquisición de Datos (DAS)..... | 62 |
| 4. | RESULTADOS | 64 |
| 4.1. | Resultados generales de primer orden | 65 |
| 4.1.1. | Deformación de las superficies de ensayo..... | 65 |
| 4.1.2. | Regularidad superficial (IRI)..... | 77 |
| 4.1.3. | Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD) | 84 |
| 4.1.4. | Termocuplas | 85 |



| | | |
|--------|---|----|
| 4.1.5. | Dynatest SOPT | 89 |
| 4.1.6. | Dynatest PAST | 90 |
| 4.2. | Limitaciones | 91 |
| 5. | Calibración de modelos con datos de campo | 92 |
| 6. | Actualización del cronograma..... | 93 |
| 7. | Referencias bibliográficas | 94 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización Edificio C de LanammeUCR; Montes de Oca, San José, Costa Rica. | 14 |
| Figura 2. Vista en planta del espacio donde se encuentran localizados los tramos (cotas en metros)..... | 15 |
| Figura 3. Distribución de las diferentes estructuras construidas y las respectivas pistas de ensayo. | 16 |
| Figura 4. Material de sub-base utilizado en la estructura de pavimento. | 19 |
| Figura 5. Material de la base estabilizada en proceso de colocación. | 21 |
| Figura 6. Granulometría del material utilizado como base granular, comparado con especificaciones. | 22 |
| Figura 7. Colocación de la mezcla asfáltica caliente..... | 25 |
| Figura 8. Perfil de espesores de las estructuras a ensayar. | 26 |
| Figura 9. Programa proyecto del PaveLab. | 29 |
| Figura 10. Excavación del espacio para los ensayos..... | 30 |
| Figura 11. Construcción de paredes perimetrales de la fosa | 30 |
| Figura 12. Proceso de construcción del soporte lateral | 31 |
| Figura 13. Estructura de soporte terminada y soportando el equipo. | 32 |
| Figura 14. Losa de concreto y parte del sistema de filtrado durante la construcción..... | 32 |
| Figura 15. Colocación de capa de material de filtrado colocada..... | 34 |
| Figura 16. Geotextil 3 parte del sistema de drenaje. | 36 |
| Figura 17. Proceso de colocación y compactación del material sub-rasante. | 37 |
| Figura 18. Puntos para realizar pruebas con el deflectómetro..... | 38 |
| Figura 19. Ubicación de los sensores de presión..... | 39 |
| Figura 20. Distribución y compactación del material sub-base. | 40 |
| Figura 21. Proceso de colocación y compactación de la base granular y base estabilizada..... | 40 |
| Figura 22. Proceso de instalación de los sensores de deformación..... | 41 |
| Figura 23. Colocación y acabado de la capa de ligante..... | 42 |
| Figura 24. Material de secado y desprendimiento de emulsión | 42 |
| Figura 25. Fotografía de cámara térmica de colocación de mezcla asfáltica. | 43 |
| Figura 26. Colocación de la mezcla asfáltica | 44 |
| Figura 27. Acabado final de la capa asfáltica con los dos tipos de compactadoras. | 45 |
| Figura 28. Instalación de los sensores de deformación vertical (MDD). | 45 |
| Figura 29. Instalación de los sensores de deformación vertical (MDD). | 46 |
| Figura 30. Desprendimiento de la capa de emulsión por el paso de la maquinaria..... | 47 |
| Figura 31. Perfil térmico de capa asfáltica al momento de compactar..... | 48 |
| Figura 32. Temperatura de mezcla asfáltica al compactar. | 48 |
| Figura 33. Espacio donde la maquinaria no pudo compactar..... | 49 |
| Figura 34. Localización de los sensores en los tramos..... | 51 |
| Figura 35. Perfilómetro láser (RSP)..... | 52 |
| Figura 36. Transductor para medición de deformaciones unitarias. | 53 |
| Figura 37. Transductor para medición de presión..... | 54 |



Figura 38. Elementos que componen el montaje del Deflectómetro de Profundidad Múltiple. 55

Figura 39. Aspecto superficial de la instalación concluida. 56

Figura 40. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor
MDD1 tramo 002. 57

Figura 41. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor
MDD2 tramo 002. 57

Figura 42. Módulos de capa retro-calculados tramo 002. 58

Figura 43. Medidor de actividad de grietas. 59

Figura 44. Deflectómetro de superficie del pavimento. 60

Figura 45. Termocuplas instaladas en los tramos. 60

Figura 46. Sensor de humedad relativa instalado. 62

Figura 47. Sistema de Adquisición de Datos (DAS). 63

Figura 48. Muestra de sección transversal promedio de un tramo de ensayo. 65

Figura 49. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales
promedio según el avance de la aplicación de carga en tramo 001AC1. 66

Figura 50. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de
la aplicación de carga en tramo 001AC1. 67

Figura 51. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio
según el avance de la aplicación de carga tramo 002AC4. 68

Figura 52. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de la
aplicación de carga en tramo 002AC4. 69

Figura 53. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio
según el avance de la aplicación de carga tramo 003AC2. 70

Figura 54. Evolución de la deformación de la sección longitudinal según el avance de
la aplicación de carga tramo 003AC2. 71

Figura 55. Evolución de la deformación de la sección transversal promedio según el
avance de la aplicación de carga tramo 004AC3. 72

Figura 56. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio
según el avance de la aplicación de carga tramo 007AC2H. 73

Figura 57. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de
la aplicación de carga tramo 007AC2H. 74

Figura 58. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio
según el avance de la aplicación de carga tramo 008AC1H. 75

Figura 59. Evolución de la deformación de la sección longitudinal según el avance de
la aplicación de carga tramo 008AC1H. 76

Figura 60. Evolución de la regularidad superficial (IRI) según la cantidad de repeticiones
de carga en tramo 001AC1. 78

Figura 61. Evolución de la regularidad superficial según el avance de la aplicación
de carga tramo 002AC4. 79



Figura 62. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 003AC2..... 80

Figura 63. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 004. 81

Figura 64. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 007AC2H..... 82

Figura 65. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 008. 83

Figura 66. Temperatura de la estructura de pavimento en tramo 001. 85

Figura 67. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 002..... 86

Figura 68. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 003..... 87

Figura 69. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 007..... 88

Figura 70. Carga Aplicada y Presión vertical medido a nivel de subrasante tramo 002. 89

Figura 71. Pulso generado durante la captura de deformaciones unitarias en el tramo 010AC3H. .. 90



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Resumen de resultados realizados al material sub-rasante AASHTO T-11 y T-27. | 17 |
| Tabla 2. Resultados de los diferentes ensayos realizados al material sub-base. | 18 |
| Tabla 3. Resultados de los diferentes ensayos realizados a la base estabilizada..... | 19 |
| Tabla 4. Resultados de resistencia a la compresión de base estabilizada..... | 20 |
| Tabla 5. Resultados de los diferentes ensayos realizados a la base granular. | 21 |
| Tabla 6. Distribución granulométrica de diseño de la mezcla asfáltica. | 22 |
| Tabla 7. Parámetros de la mezcla con el óptimo porcentaje de asfalto. | 23 |
| Tabla 8. Resumen de los resultados realizados a la mezcla asfáltica. | 24 |
| Tabla 9. Estructuras de los tramos Experimentales..... | 27 |
| Tabla 10. Especificaciones para materiales filtrantes colocados..... | 35 |
| Tabla 11. Cronograma del proyecto actualizado..... | 93 |



1. Introducción

1.1. Contexto general donde se desarrolla el proyecto

El experimento que se describe en el presente informe responde a la necesidad de profundizar en el estudio del comportamiento y desempeño de estructuras de pavimento. Esto con la finalidad de conocer cómo se comportan sus distintos materiales componentes, de manera que los mismos puedan ser optimizados para brindar las mejores propiedades de servicio y durabilidad. La necesidad de realizar experimentos de este tipo es imperante, puesto que no hay modelos calibrados para predecir el deterioro de los pavimentos en Costa Rica; y por tanto se requiere de investigación que permita medir cómo y en cuánto se deterioran las estructuras de pavimento en función de los materiales, el clima y el tránsito al que están expuestos. Lo anterior es de aún más importancia cuando se considera que en el país se están diseñando carreteras mediante el uso de modelos de deterioro calibrados para condiciones completamente distintas, con modelos meramente empíricos y por tanto con muy baja correlación al desempeño real futuro de la estructura.

Por otra parte, en los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo para asegurar la implementación y aplicación de ensayos de laboratorio normados y acreditados en el país. Gracias a esto, hoy en día están contemplados en la especificación nacional distintos ensayos de laboratorio para ser realizados durante el control de calidad de las obras viales.

Los diferentes ensayos que se han venido utilizando son imprescindibles para control de las obras viales, pues son parámetros históricamente conocidos y asociados a las propiedades de los diferentes materiales que se utilizan para la construcción de carreteras. De esta forma se controlan características esenciales como densidad, cantidad de ligante utilizado, propiedades granulométricas y otros más elaborados.

Sin embargo, existen diversas limitaciones en los ensayos de laboratorio, particularmente en la relación de estos con el desempeño real de las estructuras en servicio. Por ejemplo, si bien se pueden realizar ensayos de laboratorio a los materiales que conforman una capa de base granular como medir la granulometría del material, no se conoce con detalle como esta granulometría afectará el desempeño real de dicha capa. De la misma forma, así como se le pueden medir algunas propiedades a los materiales que conforman una capa de ruedo de mezcla asfáltica, no es común poder conocer

| | | |
|--------------------------|---------------|-----------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 9 de 125 |
|--------------------------|---------------|-----------------|



con detalle (en el laboratorio) el comportamiento de una mezcla asfáltica con respecto a una base granular específica. Aun cuando se desarrollan ensayos que miden propiedades fundamentales del material, existen diferencias entre las condiciones de laboratorio y las que se presentan durante el servicio de la estructura.

Parte del esfuerzo histórico que se ha venido desarrollando, particularmente en Costa Rica desde el año 2004 mediante la realización de evaluaciones a nivel de red, es el uso de ensayos de campo para profundizar en el conocimiento de las estructuras en servicio. En el caso costarricense se han utilizado deflectómetros de impacto (FWD) para la estimación de la capacidad estructural y mediciones láser de los perfiles de las carreteras (RSP) para el cálculo de la regularidad superficial (IRI), así como se han incorporado algunas otras herramientas con el paso de los años (ej. fricción).

El uso de ensayos de campo amplía el alcance de la información disponible en cuanto a la condición estructural y funcional de los pavimentos, lo cual permite realizar la gestión y administración de los activos viales ensayados. Estos ensayos de campo reflejan la condición al momento en que se realiza la medición, razón por la cual es particularmente importante dar seguimiento en el tiempo a la forma en que cambia la condición con el paso de los vehículos y el tiempo. Adicionalmente, es de vital importancia contar con la información de demanda a que ha estado sujeta la carretera, información que no se encuentra disponible actualmente.

En Costa Rica las evaluaciones a nivel de red vial nacional las realiza por ley el LanammeUCR cada dos años, lo cual ha permitido brindar herramientas importantes a la Administración para la gestión y administración de la red vial nacional; de la misma forma se ha desarrollado una importante base de datos que permitirá realizar análisis e investigaciones relacionadas con el desempeño de las estructuras reales en servicio con el paso del tiempo.

Es importante entender las limitaciones que tienen estas evaluaciones a nivel de red para el estudio de las estructuras de pavimentos, pues para generar la información se requiere una gran cantidad de tiempo, mayor a 20 años normalmente; para profundizar en el estudio de su comportamiento. También existen limitaciones en cuanto al conocimiento de las cargas aplicadas a la estructura, por lo que no se puede analizar el desempeño real de la estructura ante la aplicación repetida de cargas en tanto no se conozca su cantidad y magnitud. Adicionalmente, hay que resaltar que la evaluación de una red



para fines de gestión es muy distinta a la evaluación de una carretera a nivel de proyecto donde se busca conocer claramente el comportamiento y variabilidad de la estructura en estudio.

Una limitación adicional de las evaluaciones de redes para determinar el desempeño de un pavimento es que por tratarse de estructuras en servicio, son muy limitados los casos donde se puede documentar las condiciones constructivas y obtener muestras del material utilizado para la construcción para realizar estudios comparativos.

En síntesis, y adicional a la información que aporta la evaluación de la red vial, se requiere profundizar en los siguientes aspectos:

- Conocimiento de magnitud, cantidad y características de las cargas aplicadas.
- Conocimiento detallado de los materiales existentes, sus propiedades mecánicas y espesores.
- Medición detallada del comportamiento de la estructura en el tiempo y documentación de los mecanismos de falla que se presentan.
- El tiempo de recolección de datos es de largo plazo.
- Implementación de nuevas tecnologías es necesaria la construcción de tramos experimentales.

Adicionalmente, hay que considerar que la información obtenida en los diferentes laboratorios de control de calidad de las obras viales no puede ser directamente relacionada con el desempeño de los pavimentos en servicio. La separación entre los resultados de laboratorio y la forma en que las estructuras en servicio se desempeñan plantea retos en diferentes niveles, pues no solamente se debe conocer cuál es la relación entre los resultados de laboratorio, sino conocer los diferentes mecanismos de falla que tendrán las estructuras durante su vida de servicio, la vida útil de las estructuras, el beneficio de modificar características específicas de las mismas y la razonabilidad de los costos.

En este contexto se desarrolla la construcción del primer grupo de tramos de estudio a escala natural en Costa Rica, buscando ahondar en el estudio del comportamiento de diferentes estructuras de pavimento, documentando y generando la información necesaria para la mejora de los procesos de diseño y construcción de estructuras de pavimento.



1.2. Objetivo de este informe

Presentar un avance del proyecto “Primer ensayo acelerado a escala natural de pavimentos” ante la Vicerrectoría de Investigación, documentando las condiciones del proceso constructivo asociado, programa de ensayos desarrollados, así como una muestra de los primeros resultados que se han generado.

1.3. Productos esperados

El uso del HVS es fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR, y por medio del cual, en la medida que los ensayos y el análisis de los datos avance, se posibilitará la generación de una serie de productos tales como:

1. Metodología de diseño mecánica - empírica de pavimentos, basándose en las condiciones de materiales, climáticas, de tráfico y constructivas reales de Costa Rica.
2. Desarrollo de un software que permita la implementación de la metodología de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica, que se base en los modelos de desempeño obtenidos mediante el uso de HVS.
3. Desarrollo de nuevas especificaciones de materiales que se basen en el desempeño real y aporte estructural de los materiales en campo.
4. Optimización de estructuras de pavimentos en uso en el país, basándose en las condiciones climáticas, estructurales, de materiales y tráfico de la zona específica donde se planea construir la estructura.
5. Posibilidad de evaluación de materiales mejorados o nuevos materiales en una estructura de pavimento real.
6. Posibilidad de evaluar estructuras de pavimentos de alta importancia para el país en campo previo a su apertura al tráfico vehicular con el fin de corroborar el correcto desempeño de la estructura o identificar posibles deficiencias en la misma.



Los ensayos acelerados de pavimentos han tomado un auge importante a nivel mundial, pues brindan diversas ventajas para el mejor entendimiento de las estructuras de pavimento, como estas funcionan y como se presentan los diversos mecanismos de falla que sufren. Y es a partir de este conocimiento e información generada que se generan los productos mencionados.

Los equipos móviles para el ensayo de estructuras de pavimentos (como el HVS o similares) han tomado un especial interés de la comunidad científica mundial por la versatilidad que brindan en los ensayos, y por las características que poseen, el equipo utilizado por el LanammeUCR permite:

- Simular el deterioro que sufre una carretera durante toda su vida útil en períodos cortos de algunos meses.
- Se puede utilizar tanto dentro de instalaciones previamente acondicionadas o bien, puede ser transportado a una sección de interés de una carretera.
- Puede controlarse la cantidad, velocidad, magnitud y ubicación de las aplicaciones de carga.
- Permite relacionar la información genera con la información de laboratorio y otros equipos de campo.



2. Descripción de las pistas de ensayo

El presente apartado describe las generalidades constructivas del primer conjunto de pistas de ensayo probadas con el simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés) en el PaveLab del LanammeUCR. A continuación, se detallan los diferentes aspectos de los tramos construidos, los materiales utilizados en la estructura de pavimento construida, los diversos espesores de las capas, entre otros aspectos importantes.

2.1. Ubicación de las pistas

Las pistas fueron construidas en el interior del Edificio C de LanammeUCR en San Pedro de Montes de Oca en Costa Rica. La siguiente Figura muestra un cuadro que 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) como se aprecia en la Figura 1.

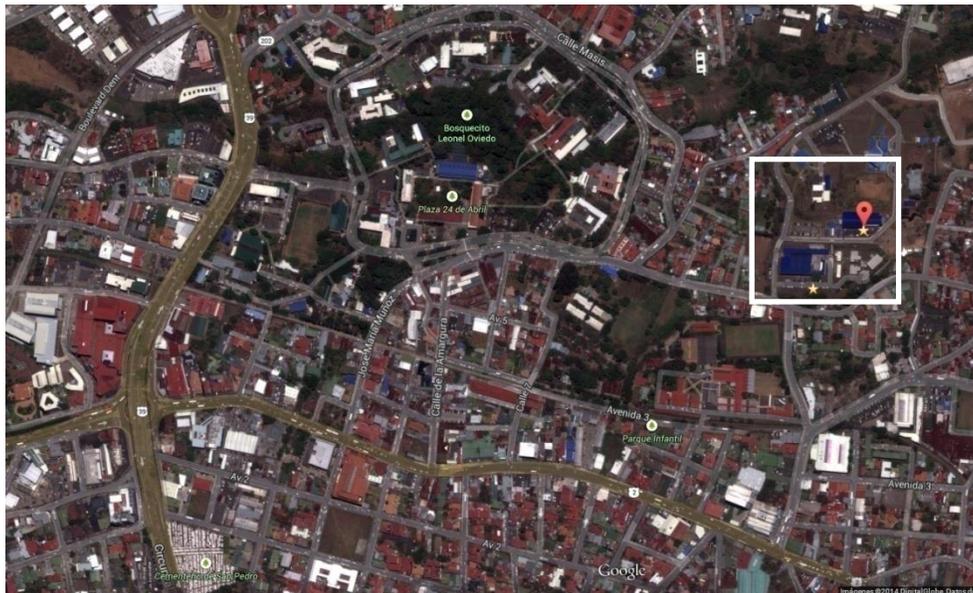


Figura 1. Localización Edificio C de LanammeUCR; Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Fuente: Google Maps, 2017.

Dicho edificio cuenta con un espacio en el cual fueron construidas las pistas de ensayo. Tal espacio presenta las dimensiones suficientes para permitir la construcción de las pistas y también albergar al equipo HVS durante su funcionamiento en los ensayos. Dicha área se ha denominado PaveLab. La

| | | |
|--------------------------|---------------|------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 14 de 125 |
|--------------------------|---------------|------------------|

Figura 2 ilustra mediante un sencillo boceto el espacio en el cual se construyeron los tramos, además de mostrar sus correspondientes dimensiones.

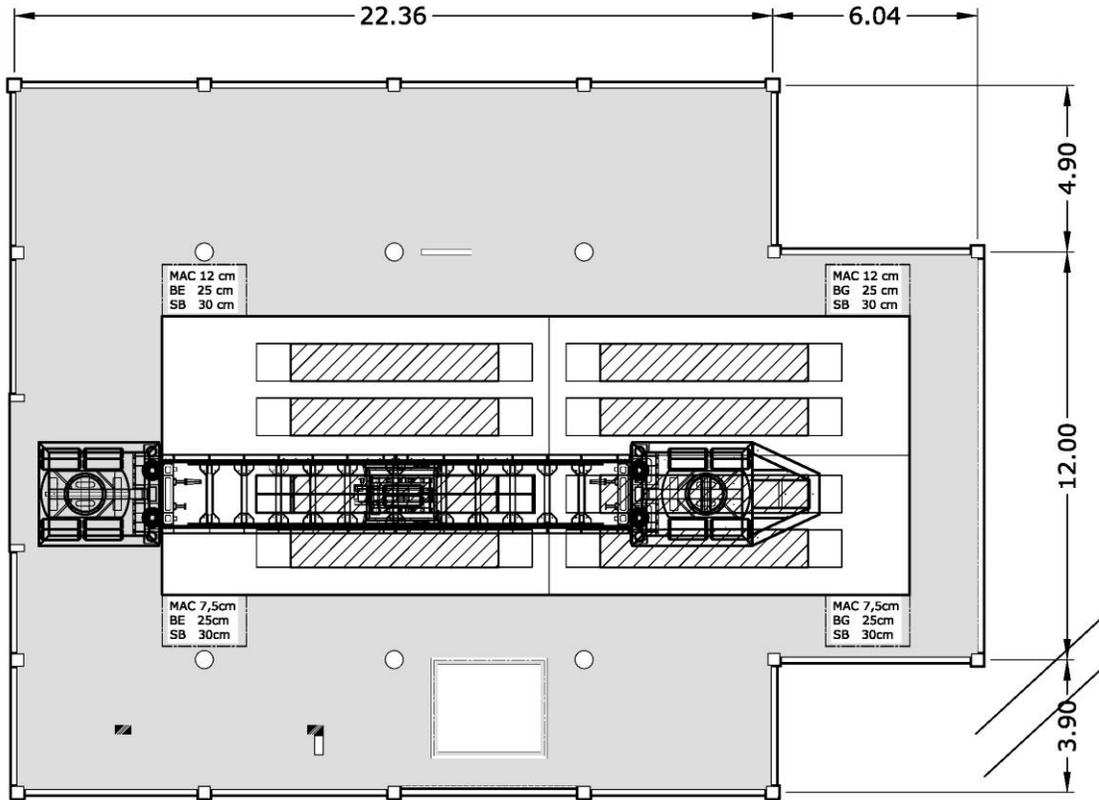


Figura 2. Vista en planta del espacio donde se encuentran localizados los tramos (cotas en metros).

2.2. Definición de los tramos de ensayo

La configuración de los tramos de ensayo fue sometido a un proceso de diseño, sugerencias y revisión por parte de los colegas de la Alianza Internacional HVS (HVSIA, por sus siglas en inglés). Dicha alianza congrega a importantes investigadores a nivel mundial, los cuales son usuarios de este tipo de equipo.

Como parte del desarrollo de los ensayos se analizó previamente el efecto de borde que se presentar en las pistas externas, así como la influencia que puede tener el tipo de estructura en este efecto.

Los tramos se localizan en una estructura de pavimento en un área rectangular con una superficie de 22,0 metros de largo, 8,2 metros de ancho y una profundidad que varía entre los 2,55 metros y los

2,75 metros. Para definir los tramos se definieron y analizaron diferentes criterios, los cuales se resumen a continuación:

- Equipos de construcción disponibles, y el procedimiento constructivo requerido por los mismos.
- Esfuerzos generados, y la distancia requerida para evitar una condición de borde no deseada. Esto en las tres dimensiones de la fosa construida.
- Maximizar la cantidad de tramos de ensayo para cada proceso constructivo.

Considerando los elementos anteriores, se optó por la construcción de cuatro estructuras distintas en el área definida para los ensayos. Las dimensiones totales de las estructuras construidas, y el acomodo de los tramos se pueden apreciar en la Figura 3.

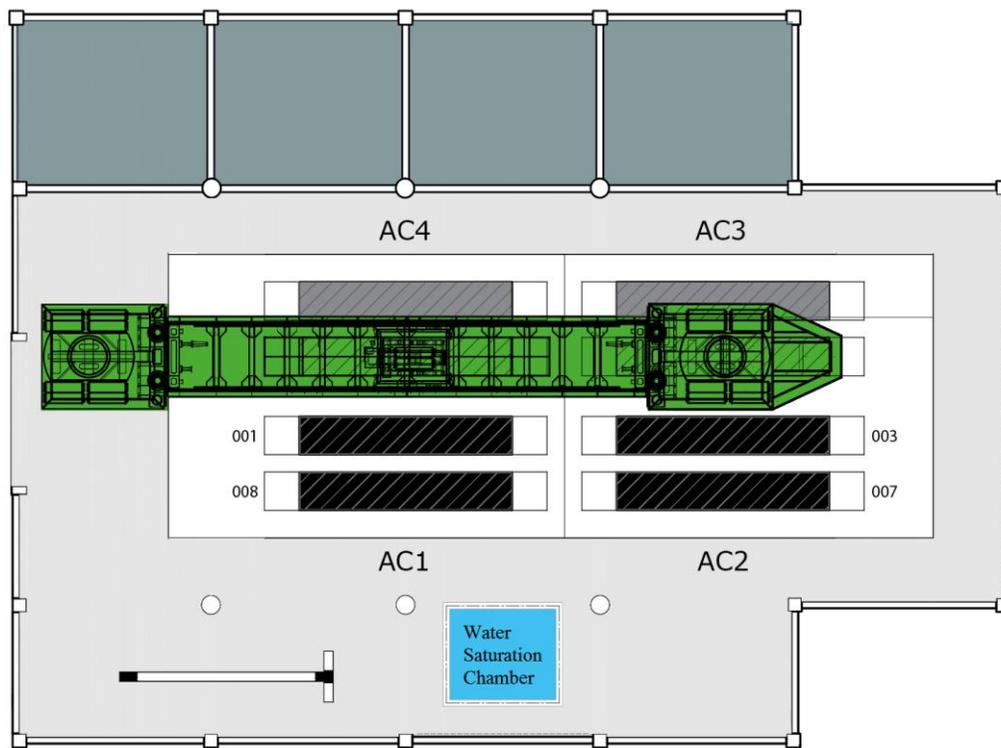


Figura 3. Distribución de las diferentes estructuras construidas y las respectivas pistas de ensayo.



2.3. Características de los materiales empleados

Para describir las pistas de ensayo es necesario conocer los materiales con los que se trabajó. Por tanto, seguidamente se describen cada uno de ellos y se adjuntan resultados de diferentes ensayos realizados.

Tabla 1. Resumen de resultados realizados al material sub-rasante AASHTO T-11 y T-27.

| Granulometría | | |
|-------------------------|---|-------------|
| Malla | | %Pas |
| 9,50 mm (3/8") | | 100,0 |
| 4,75 mm (N°4) | | 100,0 |
| 2,00 mm (N°10) | | 100,0 |
| 0,850 mm (N°20) | | 100,0 |
| 0,425 mm (N°40) | | 98,8 |
| 0,250 mm (N°60) | | 96,9 |
| 0,150 mm (N°100) | | 93,9 |
| 0,106 mm (N°140) | | 91,5 |
| 0,075 mm (N°200) | | 89,2 |
| 0,031 mm | | 68,9 |
| 0,02 mm | | 61,4 |
| 0,012 mm | | 56,1 |
| 0,008 mm | | 51,8 |
| 0,006 mm | | 47,6 |
| 0,003 mm | | 41,6 |
| 0,001 mm | | 33,4 |
| Gravedad específica, Gs | | 2,284 |
| Límites de Atterberg | LL | 60 |
| | LP | 41 |
| | IP | 19 |
| Próctor Estándar y CBR | W _{opt} (%) | 57,1 |
| | γ _d max (kg/m ³) | 998 |
| | CBR (90%) | 1,6 |
| | CBR (95%) | 3,0 |
| Clasificación | SUCS | MH |
| | AASHTO | A-7-5 (16) |

En cuanto al material sub-rasante, se utilizó el mismo suelo que se encontraba en el lugar de construcción de las pistas de ensayo. A continuación, se presentan los diferentes resultados de los



ensayos realizados a este material (ver Tabla 1). El material corresponde a un tipo de suelo típico para el valle central del país.

Las estructuras de pavimento por ensayar están constituidas por una sub-rasante natural, una sub-base, base estabilizada con cemento o granular y una capa de mezcla asfáltica colocada en caliente.

Para la sub-base, el agregado se extrajo de un apilamiento de Javillos en San Carlos de Alajuela, posee una densidad máxima seca de 2204 kg/m³ y una humedad óptima de 8,9 %. En la siguiente tabla se resumen los resultados realizados al material de sub-base y se muestra una imagen de este material en la Figura 4.

Tabla 2. Resultados de los diferentes ensayos realizados al material sub-base.

| Prueba | Designación | Resultados |
|---------------------------------------|--------------------|------------|
| Granulometría | AASHTO T-11 y T-27 | % Pasando |
| Malla | - | - |
| 7,62 mm (3") | - | 100 |
| 4,75 mm (N 4) | - | 41 |
| 0,425 mm (N 40) | - | 12 |
| 0,075mm (N 200) | - | 5,2 |
| Límite Líquido | AASHTO T-89 | N.P |
| Índice Plástico | AASHTO T-89 y T-90 | N.P |
| Densidad máxima seca (kg/m3) | AASHTO T-180 | 2204 |
| Humedad óptima (%) | AASHTO T-180 | 8,9 |
| Capacidad de soporte California "CBR" | ASTM D-1883 | 95 |



Figura 4. Material de sub-base utilizado en la estructura de pavimento.

La base estabilizada utilizada corresponde al tipo BE-25; se constituye de un agregado extraído de Tapezco, y además se utilizó como estabilizante un cemento Sansón UG. Presenta una densidad máxima seca de 2013 kg/m³ y 11,5 % de humedad óptima.

Tabla 3. Resultados de los diferentes ensayos realizados a la base estabilizada

| Prueba | Designación | Resultados |
|---|--------------------|------------|
| Granulometría | AASHTO T-11 y T-27 | % Pasando |
| Malla | - | - |
| 50,8 mm (2 plg) | - | 100 |
| 4,75 mm (N° 4) | - | 63 |
| 0,425 mm (N° 40) | - | 24 |
| 0,075mm (N° 200) | - | 11,2 |
| Límite Líquido | AASHTO T-89 | 24,8 |
| Índice Plástico | AASHTO T-89 y T90 | 4,4 |
| Densidad máxima seca (kg/m ³) | AASHTO T-99 | 2013 |
| Humedad óptima (%) | AASHTO T-99 | 11,5 |



En la Tabla 3 se resumen los resultados de los diferentes ensayos hechos a la base estabilizada, incluyendo los resultados de resistencia a compresión (ver Tabla 4; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La resistencia promedio de diseño con factor de seguridad de 15% es de 35 kg/cm², y para el cumplimiento de dicha resistencia se dosificó cemento a razón de 1,7 sacos/m³; siendo sacos de 50 kg de peso y el metro cúbico en condición compactada de material.

Tabla 4. Resultados de resistencia a la compresión de base estabilizada.

| Nº muestra | Fecha moldeo | Fecha falla | Sacos/m ³ | Esfuerzo a 7 días (kg/cm ²) | Densidad máxima seca (kg/m ³) | Humedad Óptima (%) |
|------------|--------------|-------------|----------------------|---|---|--------------------|
| 1 | 05/04/2013 | 12/04/2013 | 1,5 | 31,9 | 2013 | 11,5 |
| 2 | 05/04/2013 | 12/04/2013 | 2,0 | 39,3 | 2013 | 11,5 |
| 3 | 05/04/2013 | 12/04/2013 | 2,5 | 46,8 | 2013 | 11,5 |

Igualmente, para la base granular el agregado se extrajo de Tapezco, posee una graduación tipo “B” según el CR-77, con una densidad máxima seca de 2217 kg/m³ y una humedad óptima de 8,6 %.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de varios ensayos realizados a la base granular, en la Figura 6 observa la granulometría de la base granular al compararla con la granulometría de la base estabilizada.

Tabla 5. Resultados de los diferentes ensayos realizados a la base granular.

| Prueba | Designación | Resultados |
|---|--------------------|-------------|
| Granulometría | AASHTO T-11 y T-27 | % Pasando |
| Malla | | |
| 50,8 mm (2 plg) | | |
| 38,1 mm (1 ½ plg) | | |
| 25,4 mm (1 plg) | | |
| 19,1 mm (¾ plg) | | |
| 9,52 mm (3/8 plg) | | |
| 4,75 mm (Nº 4) | | |
| 2,00 mm (Nº 10) | | |
| 0,425 mm (Nº 40) | | |
| 0,075mm (Nº 200) | | |
| Límite Líquido | AASHTO T-89 | - |
| Índice Plástico | AASHTO T-89 y T90 | No Plástico |
| Densidad máxima seca (kg/m ³) | AASHTO T-180 | 2217 |
| Humedad óptima (%) | AASHTO T-180 | 8,6 |

En la Figura 5, se muestra el material de la base estabilizada con cemento hidráulico en el momento que es colocada en el sitio donde se realizarán los ensayos.



Figura 5. Material de la base estabilizada en proceso de colocación.

La mezcla asfáltica utilizada, se caracterizaba por tener un agregado proveniente del quebrador Javillos, de tamaño máximo nominal de 19,1 mm, y asfalto AC 30. La gravedad específica es de 2,388; una gravedad máxima teórica de 2,490 y el contenido de asfalto por peso de 4,88%.



Para el diseño de mezcla asfáltica, el agregado que se utilizó corresponde a un mezclado de tres fracciones de diferentes tamaños en la siguiente proporción: 39% grueso, 32% intermedio y 29% fino, y una granulometría de diseño como se muestra en la Tabla 6.

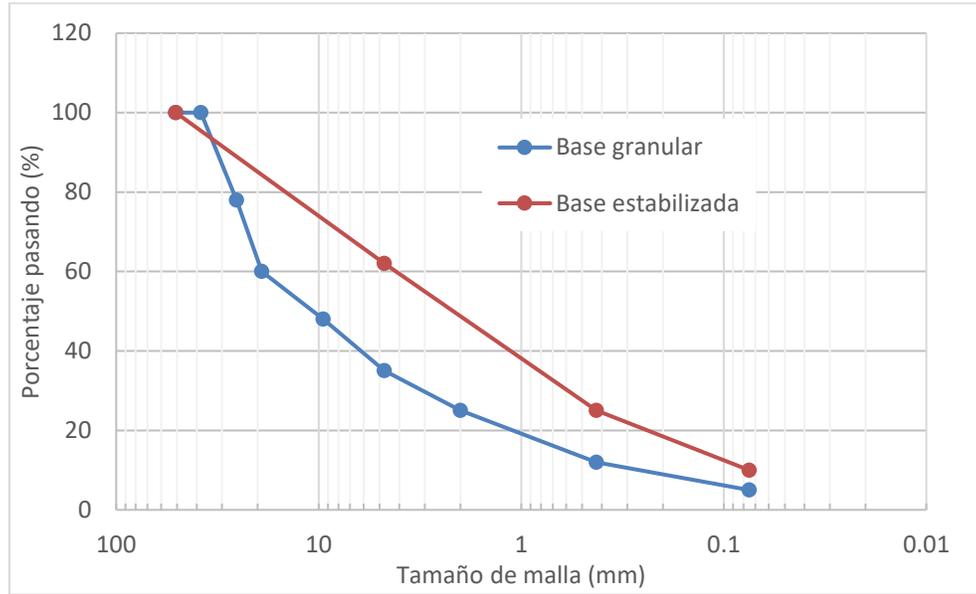


Figura 6. Granulometría del material utilizado como base granular, comparado con especificaciones.

Tabla 6. Distribución granulométrica de diseño de la mezcla asfáltica.

| Tamiz | % pasando Graduación TMN 19,1 mm | Especificación |
|---------|--|----------------|
| 25,4 mm | 100 | 100 |
| 19,1mm | 100 | 90-100 |
| 12,5mm | 75 | 70-80 |
| 9,5mm | 60 | 55-65 |
| N° 4 | 39 | 35-43 |
| N° 8 | 26 | 22-30 |
| N° 16 | 20 | 16-22 |
| N° 30 | 15 | 11-17 |
| N° 50 | 11 | 7-14 |
| N° 200 | 3,8 | 2-5,8 |



Respecto al contenido óptimo de asfalto, con base a criterios de diseño establecidos en el país, se define un valor de 4,99 % (4,60 % sobre la mezcla). Con este porcentaje óptimo se tienen las siguientes características de la mezcla.

Tabla 7. Parámetros de la mezcla con el óptimo porcentaje de asfalto.

| Parámetro | Valor |
|------------------------------------|--------------------------|
| Vacíos de aire | 4,0% |
| VMA | 14,6 |
| Gravedad específica | 2,416 ton/m ³ |
| Gravedad específica máxima teórica | 2,517 ton/m ³ |
| Estabilidad | 1.675,0 Kg |
| Flujo | 31 cm/100 |
| VFA | 73% |
| Razón polvo/asfalto | 0,9% |

En cuanto a la mezcla asfáltica colocada, en el siguiente cuadro se resumen los resultados de la granulometría y otros ensayos realizados a dicha mezcla obtenida de la descarga de la vagoneta en la colocación, y en la Figura 7 se muestra la mezcla de asfalto siendo colocada.



Tabla 8. Resumen de los resultados realizados a la mezcla asfáltica.

| | Especificación | Producción muestreo Vagoneta 3 |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| | Fecha | 2013-05-18 |
| Gravedad Específica | - | 2,388ton/m ³ |
| Gravedad Máxima Teórica | - | 2,490 ton/m ³ |
| Contenido Asfalto / Agregado | - | 5,13 |
| Contenido Asfalto / Mezcla | 4,60% ± 0,50% | 4,88 |
| Vacios de Aire Mezcla | 4,00% ± 1,00% | 4,1 |
| VMA | 14% mínimo | 14,9% |
| VFA | 65-75 % | 72% |
| Estabilidad | 800 Kg mínimo | 1482 kg |
| Flujo | 20 – 35 cm/100 | 30 cm/100 |
| Relación polvo asfalto | 0,8 – 1,30 | 1,04 |
| Granulometría de la mezcla | | % pasando |
| Malla 25,4 mm | 100 | 100 |
| Malla 19,1 mm | 90-100 | 99 |
| Malla 12,7 mm | 70-80 | 77 |
| Malla 9,5 mm | 55-65 | 65 |
| Malla N° 4 | 35-43 | 41 |
| Malla N° 8 | 22-30 | 28 |
| Malla N° 16 | 16-22 | 20 |
| Malla N° 30 | 11-17 | 14 |
| Malla N° 50 | 7-14 | 10 |
| Malla N° 200 | 2-5,8 | 4,9 |



Figura 7. Colocación de la mezcla asfáltica caliente

2.4. Características de espesores colocados

Se colocaron 8 pistas de ensayo, 4 correspondientes a bases granulares y 4 con bases estabilizadas. Los espesores de las 8 pistas son iguales para la base estabilizada o granular siendo de 25 cm, 30 cm de espesor para la subbase y la diferencia es en la capa de mezcla asfáltica; donde 4 de estas pistas tienen un espesor de 12 cm y las otras 4 con un espesor de 7,5 cm. Para todas las pistas, la capa subrasante posee un grosor aproximado de 1,725 m. En total se consideran 4 tipos de estructuras de pavimento.

La Figura 8 ilustra el espesor de las diferentes estructuras, donde cada una tiene al menos un tramo ensayado en seco y un tramo ensayado en húmedo.

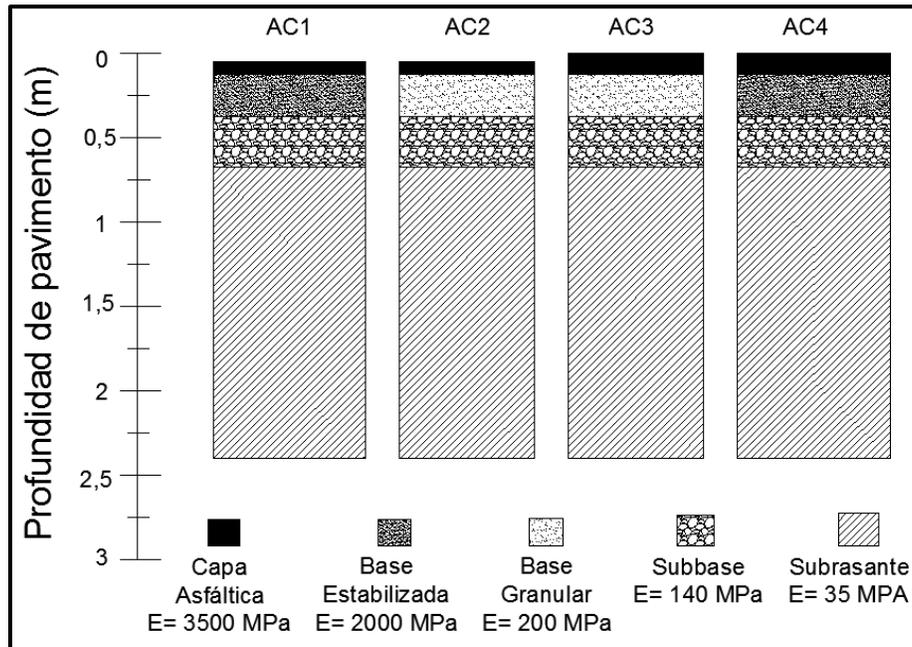


Figura 8. Perfil de espesores de las estructuras a ensayar.

Con base en esta configuración se tienen 2 tramos de prueba en cada una de las estructuras, a todos los tramos se le asigna un número consecutivo al inicio del nombre, según el orden en que fueron ensayados; siendo el primero en ser ensayado (001AC1) el que posee un espesor de mezcla asfáltica de 7,5 cm y construido sobre base estabilizada con cemento. Otros 2 tramos, en los cuales se incluye el 003AC2, fueron construidos sobre base granular simple y carpeta asfáltica de también 7,5 cm.

Para los tramos 003AC2 y 004AC3, se presenta de igual forma una base granular, pero con la diferencia de que el espesor de la capa asfáltica es de cerca de 12 cm. Por último, para el tramo 002AC4, se tiene base estabilizada con cemento y un espesor de carpeta asfáltica de 12 cm.

Los tramos construidos se planearon para ser probados con 100.000 pasadas bidireccionales semanales (20.000 por día para completar 5 días). Para los tramos de base granular se quiere hacer un ensayo en condición seca y uno en condición húmeda basado en registros climáticos de lluvia para el valle central. En el siguiente cuadro se incluye las estimaciones de ejes equivalentes de diseño obtenidos mediante la aplicación de la guía de diseño AASHTO 93, la cual es la metodología vigente en Costa Rica; además de otra información pertinente.



Tabla 9. Estructuras de los tramos experimentales

| Propiedades\Tramo | AC1 | AC2 | AC3 | AC4 |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| H1, cm - (MA) | 7,0 | 7,0 | 12 | 12 |
| H2, cm - (Base) | 24 | 24 | 24 | 24 |
| H3, cm - (SB) | 30 | 30 | 30 | 30 |
| E1 @ 25 °C, MPa | 3500 | 3500 | 3500 | 3500 |
| E2, MPa | 2000 | 200 | 200 | 2000 |
| E3, MPa | 140 | 140 | 140 | 140 |
| E4, MPa | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Carga, kN | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Presion, kPa | 700 | 700 | 700 | 700 |
| Asfalto | PG 64-22 | PG 64-22 | PG 64-22 | PG 64-22 |
| $\epsilon_{hAC} \times 10^{-6}$ | 108 | 349 | 229 | 89 |
| $\epsilon_{vSR} \times 10^{-6}$ | 246 | 455 | 379 | 196 |
| N° Cargas Permitidas* | $2,60 \times 10^6$ | $8,40 \times 10^5$ | $2,90 \times 10^6$ | $8,00 \times 10^6$ |
| Fatiga ** | $1,21 \times 10^7$ | $2,55 \times 10^5$ | $1,02 \times 10^6$ | $2,29 \times 10^7$ |
| Def. Per. ** | $1,96 \times 10^7$ | $1,25 \times 10^6$ | $2,84 \times 10^6$ | $5,43 \times 10^7$ |
| Fatiga ** | $2,77 \times 10^6$ | $9,51 \times 10^4$ | $4,57 \times 10^5$ | $3,72 \times 10^6$ |
| Def. Per. SA*** | $6,20 \times 10^9$ | $8,15 \times 10^6$ | $9,64 \times 10^7$ | $4,51 \times 10^{10}$ |
| PDMAP 10% | $8,84 \times 10^6$ | $1,86 \times 10^5$ | $7,46 \times 10^5$ | $1,67 \times 10^7$ |
| PDMAP 45% | $1,22 \times 10^7$ | $2,57 \times 10^5$ | $1,03 \times 10^6$ | $2,30 \times 10^7$ |

PDMAP: Probabilistic Distress Models for Asphalt Pavements

* Guía AASHTO 93: R=90%, S=0.5, ΔPSI=2.

** Instituto del Asfalto (ref).

***CSIR-South Africa (7)

Los tramos que corresponden a base estabilizada fueron basados en el diseño de pavimento de la carretera a San Carlos, tramo Sifón - La Abundancia, realizado por la empresa Sánchez Carvajal. Para el resto de tramos se dispuso el variar diversas condiciones de grosor y material.

Se decidió entonces el tener 4 tramos con base granular y otros 4 con base estabilizada para una vez obtenidos los resultados de los ensayos, ver la forma en cómo se comporta cada una y poder realizar diversas comparaciones. Lo mismo ocurre para el caso de la diferencia de grosor en la capa asfáltica.



2.5. Diseño y construcción del espacio para los ensayos

Este apartado describe el proceso de diseño y construcción del espacio en donde fue colocado el equipo HVS; desde la conceptualización, diseño, y la construcción hasta la colocación del material de capa asfáltica, pasando por la colocación de instrumentación de los diversos tramos de estudio.

El LanammeUCR es una entidad académica, que forma parte de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, fundada en la década de 1950, que realiza grandes esfuerzos en la investigación aplicada y desarrollo de profesionales. En el 2002 a través de la ley 8114, el LanammeUCR recibe recursos económicos para la fiscalización, capacitación, creación de especificaciones e investigación. Unos de los temas de investigación que tomó mucha inercia desde el año 2005 fue el uso de instalaciones para ensayos acelerados con el propósito de evaluar el desempeño de materiales a escala natural. Desde el año 2009 se inició con la reserva presupuestaria con el propósito de que en los próximos años fuera adquirido, en la Figura 9 se puede observar la cronología asociada a la creación del PaveLab y adquisición del HVS (Aguiar-Moya et al, 2012). Cabe mencionar que la construcción de las pistas se desarrolló con el apoyo de uno de los principales constructores de carreteras del país.

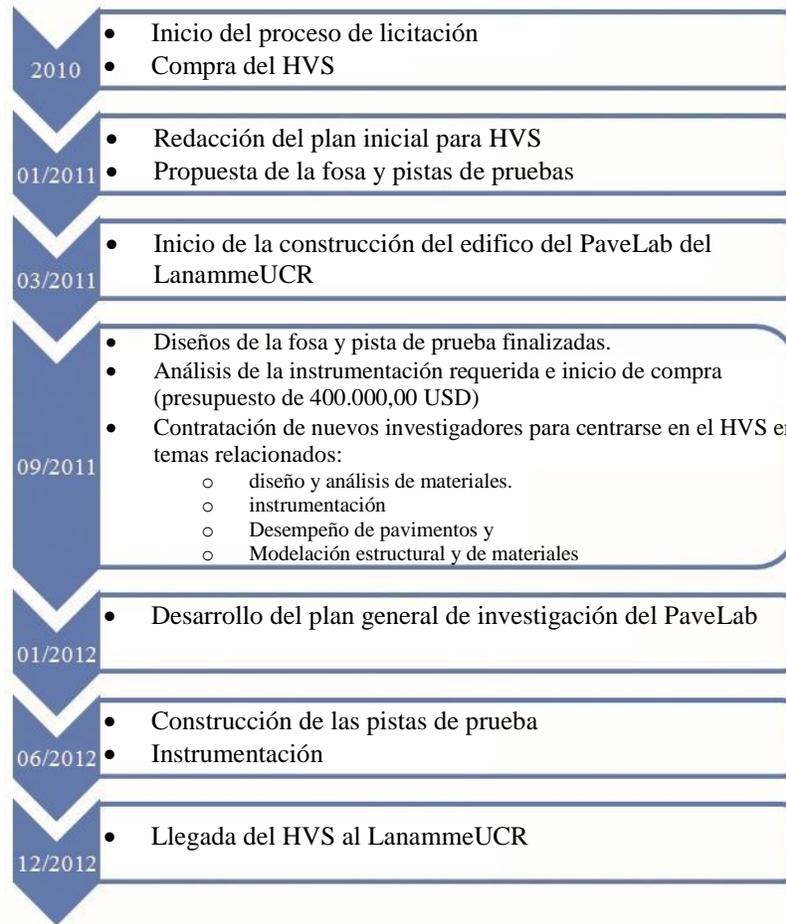


Figura 9. Programa proyecto del PaveLab.

Fuente: Aguiar-Moya et al, 2012.

2.6. Estructura perimetral de la fosa

Para la construcción de los tramos fue necesario inicialmente excavar y extraer material del suelo en el hangar del PaveLab; dicha excavación fue realizada a una profundidad de aproximadamente 3,3 metros y sobre un área rectangular de 23 metros por 11 metros. La Figura 10 muestra ese proceso de excavación realizado.



Figura 10. Excavación del espacio para los ensayos.

Adicional a esto se realizó la construcción de una estructura en concreto reforzado (ver Figura 11) que delimitó la fosa perimetralmente y estableció el volumen físico en el cual se construyeron los tramos para el experimento. La siguiente figura muestra el proceso constructivo de dicha estructura.



Figura 11. Construcción de paredes perimetrales de la fosa

Esta estructura fue construida utilizando concreto reforzado con acero, definiendo una losa en el fondo y muros perimetrales de 20 cm de espesor. Toda la estructura fue diseñada y construida de manera que la condición de humedad que la rodea no afecte la condición que se defina para la



realización del ensayo. Para la definición de la condición de humedad durante los ensayos se diseñó y construyó un sistema de saturación, filtro y drenaje, el cual se detalla en la sección 2.7 de este informe.

Se buscó construir una fosa impermeable debido a que las condiciones de agua sub-superficial en Costa Rica dificultan controlar exactamente el nivel freático de cada experimento. Así el nivel freático también puede acoplarse a las necesidades de cada experimento.

Posterior a la construcción de las paredes de la fosa, se construyó a nivel de la superficie una estructura tipo losa de concreto de 280 kg/cm^2 de f'_c en todo el perímetro de la fosa. Esta losa reforzada con estructura de varilla de acero se construyó con el fin de soportar el equipo HVS. La construcción de esta estructura es mostrada en la Figura 12.

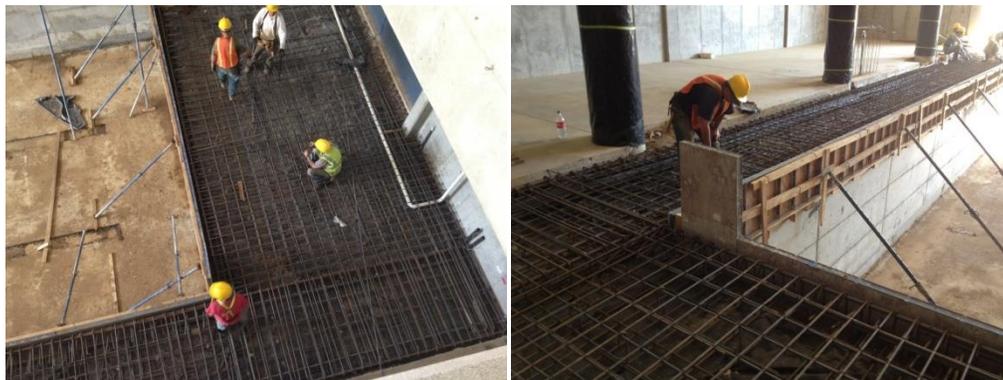


Figura 12. Proceso de construcción del soporte lateral

La Figura 13 ilustra la estructura de losa terminada y el uso que se le da una vez el equipo HVS entró en funcionamiento. Como se puede observar, la losa de concreto soporta uno de los apoyos de la máquina; además de contener perimetralmente los tramos. Adicionalmente, facilita el apoyo o circulación de maquinaria pesada utilizada en el movimiento del HVS o la construcción de tramos experimentales.



Figura 13. Estructura de soporte terminada y soportando el equipo.

2.7. Sistema de saturación, filtro y drenaje

Se realizó la construcción de un medio de filtración y drenaje para los tramos con el objetivo de controlar el nivel freático. En la Figura 14 se puede observar también el inicio de la construcción de este sistema. Fueron colocados en primer lugar 30 cm de lastre compactado al 95%, luego fue colocada una losa de concreto reforzada en el fondo de la fosa de espesor variable de 35 a 40 cm.

Dicha losa incluyó caños recolectores, parte de sistema de drenaje, de forma rectangular de 30 cm de ancho y con profundidades variables de 5 a 15 cm. Los caños tienen parrillas de acero dentro. Es importante resaltar que la construcción de la estructura muro perimetral a la fosa se dio al mismo tiempo en que se iban realizando los trabajos en el sistema de filtrado.



Figura 14. Losa de concreto y parte del sistema de filtrado durante la construcción.

| | | |
|--------------------------|---------------|------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 32 de 125 |
|--------------------------|---------------|------------------|



Una vez finalizada la construcción de la estructura perimetral fue colocado el sistema que permite el drenaje y saturación de la estructura. Este sistema inició con la colocación de un geotextil, luego se colocaron los materiales filtrantes indicados en la Tabla 10, siendo colocado el material más grueso (Material Filtrante 2) en el fondo de la fosa sobre el primer geotextil, posteriormente se coloca una segunda capa de geotextil, luego el Material Filtrante 1; para finalmente colocar una tercera capa de geotextil. Cada una de las capas de material filtrante fue de 10 cm de espesor.

La siguiente figura ilustra las capas de materiales filtrantes colocadas y su proceso de colocación. Por su parte el



Tabla 10 muestra los requerimientos que debían cumplir estos 2 materiales.



Figura 15. Colocación de capa de material de filtrado colocada.



Tabla 10. Especificaciones para materiales filtrantes colocados.

| Granulometría | | | |
|-------------------------------------|----------------------|--|---|
| Tamiz No. | Diámetro (mm) | Material Filtrante 1 (% mas fino) | Material Filtrante 2 (% másfino) |
| 4" | 100 | - | 100 |
| 2 1/2" | 63 | - | 60-100 |
| 1" | 25 | - | 50-80 |
| 3/4" | 19 | 100 | 45-75 |
| 3/8" | 9.5 | 80-100 | 35-65 |
| No 4 | 4.75 | 65-90 | 20-55 |
| No 10 | 2 | 45-75 | 0-35 |
| No 20 | 0.85 | 25-60 | 0-20 |
| No 30 | 0.6 | - | 0-15 |
| No 40 | 0.425 | 20-40 | - |
| No 80 | 0.18 | 10-25 | 0-8 |
| No 200 | 0.075 | 0-5 | 0-5 |
| Requisitos de Calidad | | | |
| Límite Líquido Máximo | | | 25 |
| Índice Plástico máximo | | | 6 |
| Equivalente de arena mínimo | | | 30 |
| Abrasión máquina los Ángeles máximo | | | 40 |

Por último, fue instalado otro geotextil con abertura máxima de 0,18 mm; con el objetivo de evitar el paso de las partículas de suelo de sub-rasante a la capa de material de filtrado. La Figura 16 permite observar este proceso de colocación y además muestra también otras secciones del proceso, tanto las paredes perimetrales de fosa como la losa de soporte, terminadas.



Figura 16. Geotextil 3 parte del sistema de drenaje.

2.8. Colocación del material sub-rasante

Como primer paso para la construcción de los tramos como tales (es decir por sus diferentes capas), fue colocada la capa de sub-rasante a lo largo de la fosa con ayuda de vagonetas y retroexcavadora. Después se procedió a colocar el material con ayuda de una retroexcavadora, seguidamente los trabajadores lo terminan de acomodar manualmente y para posteriormente realizar el proceso de compactación, el cual se realizó en capas de 20cm.

El material utilizado es el mismo extraído inicialmente del sitio, teniendo precauciones para protegerlo de la degradación por condiciones de humedad, intemperie u otros. Para la compactación fue utilizado un tractor compactador pequeño debido a las dimensiones del área de trabajo, pero con un tambor especial para compactar suelo y con la capacidad de aplicar vibración; de la misma forma se utilizaron equipos de compactación tipo apisonador de eje vertical para detallar los bordes. El equipo utilizado y el proceso de compactación son ilustrados en la siguiente figura.

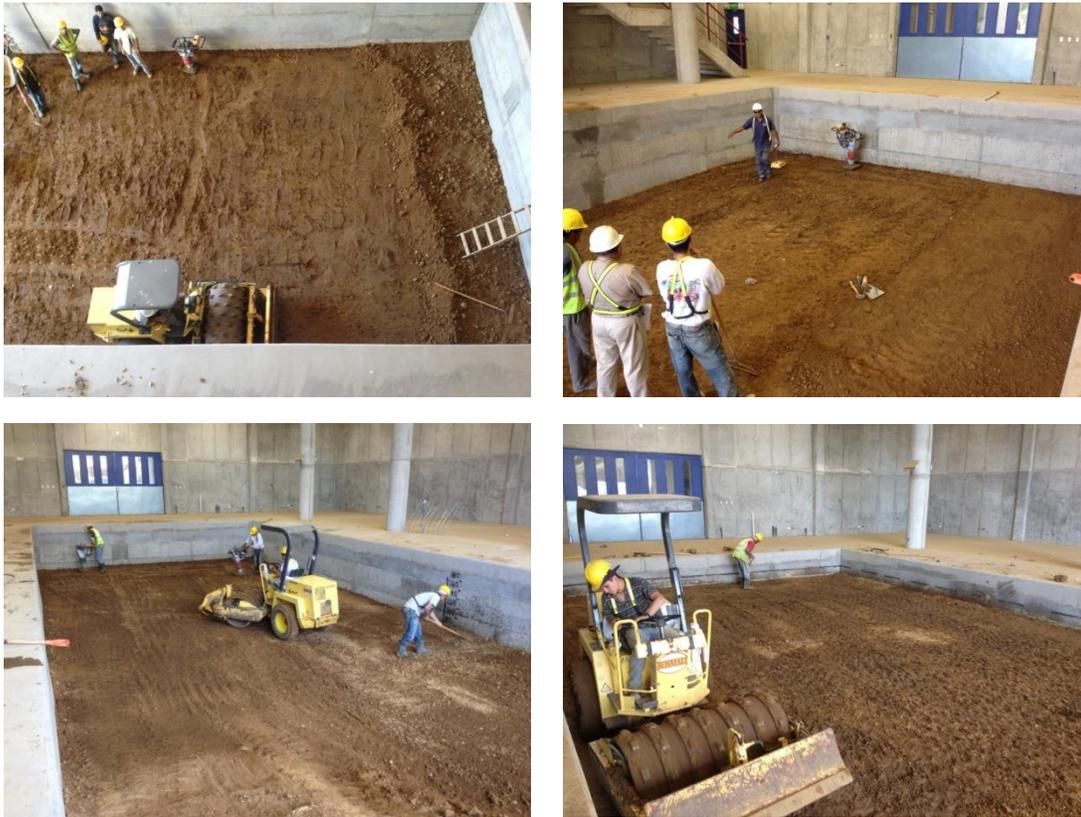


Figura 17. Proceso de colocación y compactación del material sub-rasante.

Si bien es cierto para algunos geotecnistas la idea de recompactar el suelo no es la mejor forma de proceder desde el punto de vista geotécnico, esta fue la forma de realizar la construcción de los elementos necesarios y controlar la saturación del suelo.

Durante el proceso de conformación y compactación de la sub-rasante se realizaron ensayos de deflectometría (ver Figura 18) para determinar deflexiones verticales, densidades y módulos en la capa sub-rasante para obtener información inicial de esta capa previo a proceder con la realización de los ensayos con el equipo HVS.



Figura 18. Puntos para realizar pruebas con el deflectómetro.

2.9. Proceso constructivo del pavimento de las pistas de ensayo

El proceso constructivo de las pistas de ensayo como tal, tomando en cuenta las capas de sub-base, base y mezcla asfáltica, se debió realizar con mucha precisión por las limitaciones de espacio y para que los resultados que se registren con el desarrollo de los ensayos se van a deber al comportamiento de cada una de estas capas. En este sentido es importante destacar la participación de la empresa Sánchez Carvajal, ya que gracias al personal, maquinaria y materiales donados por ellos fue posible la construcción de este primer grupo de tramos.

Dentro de este proceso constructivo se encuentran dos fases, la distribución de los diferentes sensores y la colocación y compactación del material para formar las diversas capas de las pistas de ensayo.

Este proceso inició cuando ya se tuvo debidamente colocado y compactado el material sub-rasante, y justamente terminado ese proceso, se procedió a colocar 4 sensores de presión que se sitúan entre la capa de material sub-rasante y el material de la sub-base (ver Figura 19). Primero se excavó canales de 6 ± 1 cm de profundidad por donde se colocaron los cables de los sensores de presión. Posteriormente, los canales fueron cubiertos con el mismo material para asegurar su posición, y se prosiguió con el proceso de construcción de las pistas de ensayo.



Figura 19. Ubicación de los sensores de presión.

Respecto a la colocación del material de la sub-base, por medio de retroexcavadora, se transportó el material desde el apilamiento/vagoneta al lugar donde se construyeron las pistas de ensayo. Posterior a esto los trabajadores de la empresa Sánchez Carvajal acomodaron manualmente el material y lo distribuyeron a lo largo de todo el espacio y seguidamente se procedió al proceso de compactación en donde una compactadora con sistema vibratorio fue compactando todo este material granular en dos capas de 15cm de espesor cada una hasta alcanzar los 30 cm de espesor esperados. La Figura 20 muestra este proceso de acomodo y colocación.

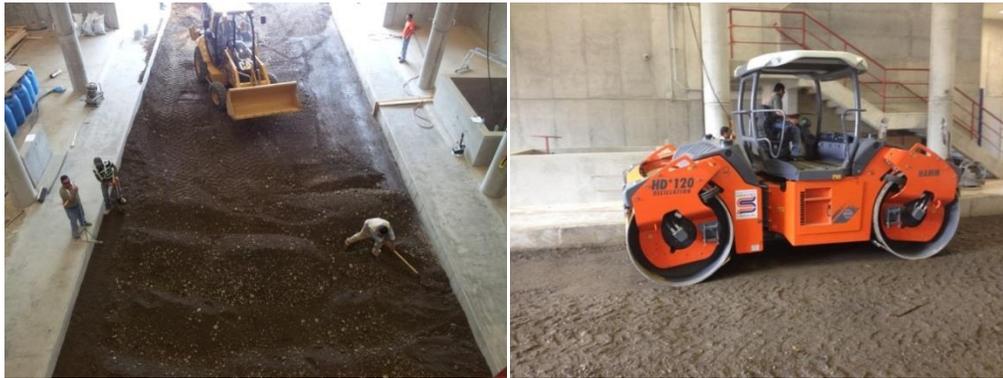


Figura 20. Distribución y compactación del material sub-base.

Posteriormente fue colocado el material de base, en dos partes, primero la colocación de la base estabilizada en la parte Oeste de las pistas y después la base granular en la parte Este de las pistas de ensayo. Este proceso se realizó por medio de la pavimentadora. A través de una mezcladora se colocó el material de base en la pavimentadora y seguidamente este distribuía el material en todo el espacio con el espesor deseado.

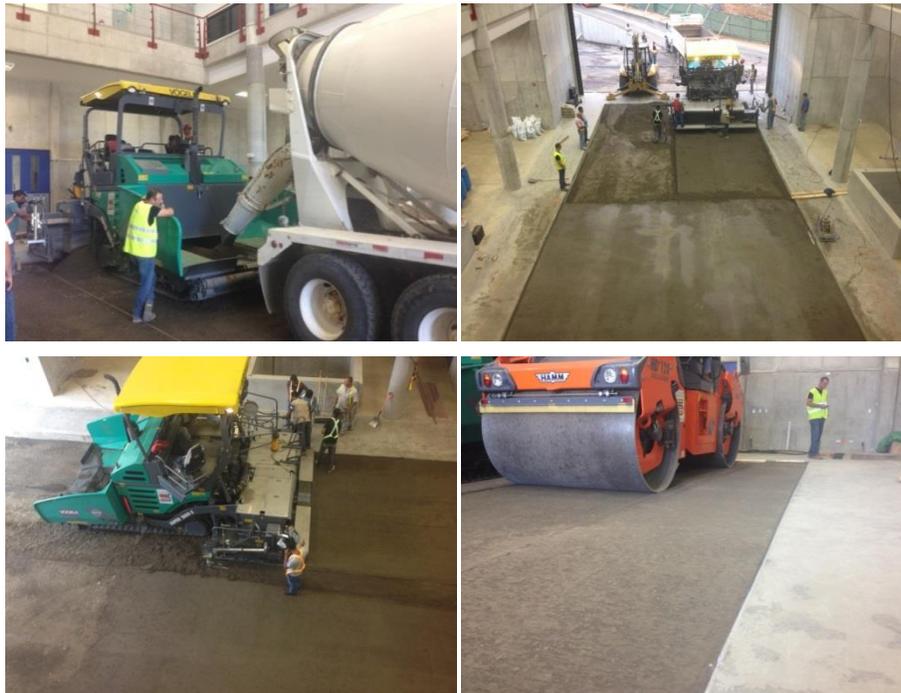


Figura 21. Proceso de colocación y compactación de la base granular y base estabilizada.



Después se procedió a compactar el material mediante un compactador HammHD+120, el cual tiene un peso de 13,2 toneladas, utilizando primero el equipo con vibración para acomodar el material, y luego compactando con la vibración para alcanzar la densidad deseada. Este proceso fue realizado en dos capas de 12cm de espesor, con un espesor total de 24cm. Para ilustrar este proceso se tiene la Figura 21.

Antes de colocar la mezcla asfáltica, entre las capas de base granular y mezcla asfáltica se colocaron los sensores de deformación, para colocarlos se excava a una profundidad aproximada de 6 ± 1 cm para que los cables queden dentro del material de la base, y se separan los sensores a una distancia aproximada de 60 cm (ver Figura 22). Estos sensores se colocaron solamente en el lugar donde corresponde a base granular, es decir al lado Este (portón de acceso) de las pistas de ensayo, no se colocan donde la base fue estabilizada con cemento hidráulico. Al tener posicionados los sensores y los cables en su respectivo lugar, se les colocó un poco de emulsión y mezcla asfáltica para asegurar su posición y protegerlos del proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.



Figura 22. Proceso de instalación de los sensores de deformación.

Seguidamente, se colocó una capa de emulsión asfáltica por medio de un distribuidor de asfalto, para proveer adherencia entre la mezcla asfáltica y la base. Estos riegos de imprimación sirven para ayudar a prevenir un plano de deslizamiento entre la capa de base y la capa superficial, evita que el material se desplace bajo las cargas de tránsito y durante el proceso de construcción, antes de la primera capa colocada y además protege las capas de base de la intemperie (Asphalt Institute, 2001). La Figura 23 ilustra el vertido del ligante y la capa del ligante de carpeta ya terminada. El tipo de ligante utilizado fue PG 64-22 (correspondiendo a un asfalto AC-30).



Figura 23. Colocación y acabado de la capa de ligante.

Se colocó un material de secado para que la maquinaria pudiera pasar sin levantar la capa de emulsión. No obstante, en la Figura 24 se puede observar como en el sector Norte de las pistas la desprendió una parte del material asfáltico colocado; esto fue debido a una limitación de disponibilidad con los accesorios de la máquina pavimentadora, específicamente la extensión derecha no estaba disponible al momento de ejecutar la construcción y se debió modificar la ruta por la que pasaría la pavimentadora.



Figura 24. Material de secado y desprendimiento de emulsión

Luego por medio de la máquina pavimentadora (*finisher*) VögeleSuper 1800-2 se colocó la mezcla asfáltica en caliente en los tramos según cada grosor de capa especificado anteriormente. Se siguió



un procedimiento de control por medio de cámara térmica para visualizar los gradientes de temperatura a la cual se encontraba la mezcla.

La siguiente figura muestra por medio de una fotografía tomada con cámara térmica como, justo después de colocar la mezcla, se cumplía con ese rango establecido aun cuando la restricción de temperatura es para el proceso de compactación. La cámara utilizada para tomar las imágenes es de marca FLIR SYSTEMS AB y de modelo ThermaCAM E320. El valor de temperatura de compactación se considera como baja, aunque es típico de los procesos de compactación en Costa Rica considerando largas distancias de acarreo.

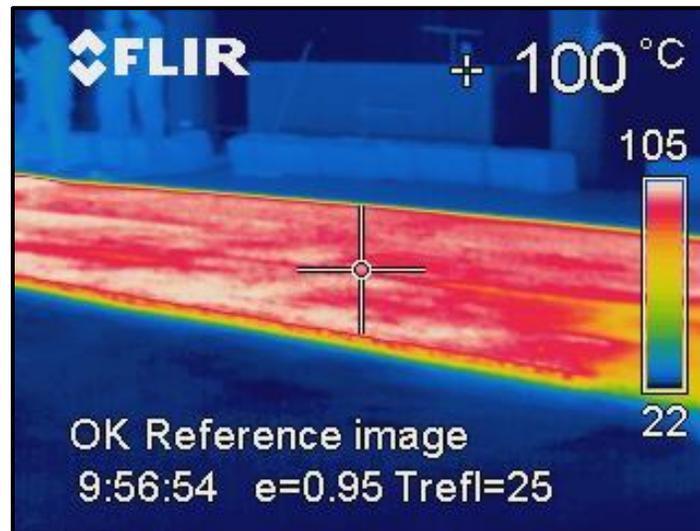


Figura 25. Fotografía de cámara térmica de colocación de mezcla asfáltica.

Posterior a esto se realizó el proceso de compactación con dos tipos de compactadoras, primero con la compactadora HD+120 de 13,2 toneladas, con rodillos oscilatorios y vibratorios, y después con la compactadora CP 221 Dynapac. La compactadora HD+120 HAMM, se utilizó para la primera fase de acomodo con vibración y la compactación intermedia sin vibración, mientras que la CP 221 Dynapac de 10 toneladas se utilizó para el acondicionamiento final de la superficie.

Al momento de colocar la mezcla, ésta poseía una temperatura cercana a 100 °C, mientras que la base tenía una temperatura ambiente de 22 °C aproximadamente.



En la Figura 26 es ilustrado el proceso de colocación de la mezcla asfáltica, mientras que la Figura 27 muestra el uso de las compactadoras para finalizar el proceso constructivo. A lo largo del proceso de colocación de los instrumentos, se tuvo el cuidado de evitar utilizar el equipo pesado (compactadora, pavimentadora y demás) directamente sobre los sensores. Esto con el objetivo de no ocasionar daños en ellos que, o bien alteraran los datos que se querían medir o inutilizaran por completo el equipo.



Figura 26. Colocación de la mezcla asfáltica

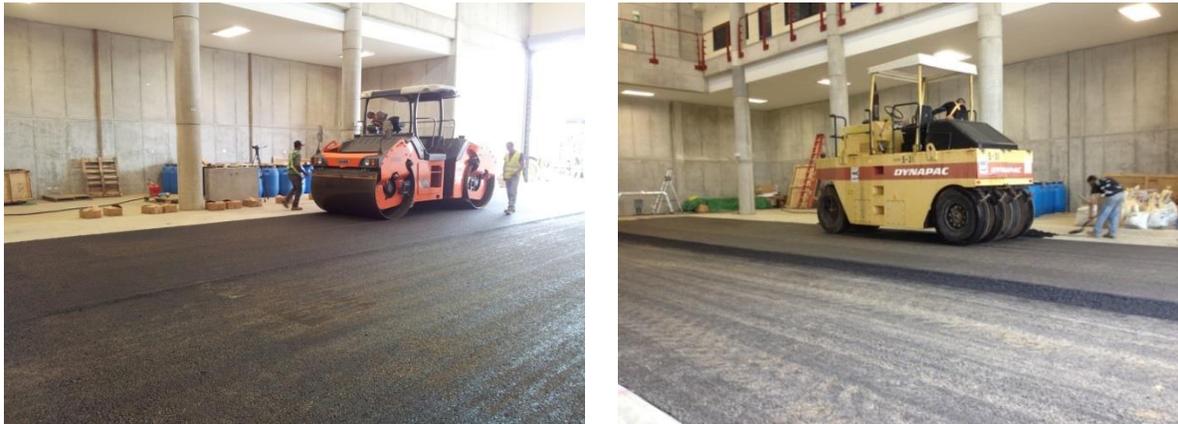


Figura 27. Acabado final de la capa asfáltica con los dos tipos de compactadoras.

La colocación de los sensores de deformación vertical se realizó posteriormente. Se requirió de diversos equipos para su instalación: taladro percutor, máquina extractora de núcleos, guías y moldes especialmente fabricados. También se utilizaron materiales cementantes para la preparación de la instalación de un ancla en el fondo, se coloca un material flexible en la boca del ducto (silicón) y se coloca un forro de caucho para el ducto; finalmente se instalan los sensores y se coloca la tapa (ver Figura 28 y Figura 29). Otros aspectos de la instrumentación instalada serán detallados en la sección 3.5.



Figura 28. Instalación de los sensores de deformación vertical (MDD).



Figura 29. Instalación de los sensores de deformación vertical (MDD).

En relación con cada pareja de estos sensores (dos por pista de ensayo), uno de ellos fue colocado de tal forma que los transductores quedaran a la mitad del grosor de cada una de las capas y para el caso de la capa de sub-rasante, el transductor se incrustó de 15 a 20 cm en ella. El otro sensor MDD fue acomodado de manera que los transductores se ubicaran en el interfaz entre capas, es decir; entre capa asfáltica y base, base y sub-base, y sub-base y sub-rasante.

2.10. Limitaciones constructivas

2.10.1. Limitaciones de materiales disponibles

Como se ha mostrado en la sección anterior, el proceso constructivo estuvo limitado por algunos elementos, como por ejemplo los materiales disponibles en el mercado costarricense.

Particularmente el material asfáltico utilizado para la capa de imprimación. Este material estaba planeado para funcionar como unión entre el material de base y la capa asfáltica. Sin embargo, la adherencia con la capa de base no fue la mejor y provocó que al utilizarse la pavimentadora, ésta desprendiera el material de ligante. Este aspecto del proceso constructivo puede ser observado en la figura presentada a continuación.



Figura 30. Desprendimiento de la capa de emulsión por el paso de la maquinaria.

Una limitante del proceso de construcción fue el origen de la mezcla asfáltica, a una distancia de 3 horas de viaje, siendo procedente de una planta de producción de mezcla asfáltica en San Carlos. De esta forma, al ser un tiempo tan largo de espera, esto provoca un enfriamiento del asfalto, ocasionando que la temperatura de compactación pueda llegar a ser menor a 85 C (185 F). Lo anterior genera que el asfalto empiece a rigidizar y volverse menos trabajable, provocando que el proceso de compactación sea más difícil (Asphalt Institute, 2001).

La Figura 31Figura 30 muestra el perfil térmico de la capa asfáltica justo al de ser compactada. Se evidencia como no se cumplió con la temperatura mínima de compactación recomendable, lo cual correlaciona con mayor tiempo del recomendado entre la producción, colocación y compactación. Se observa como en la sección de 7,5 cm de espesor la temperatura no es cumplida, mientras que en el sector de 12 cm la temperatura no es cumplida en ciertas partes y en otras se encuentra muy cercana al valor mínimo del rango.

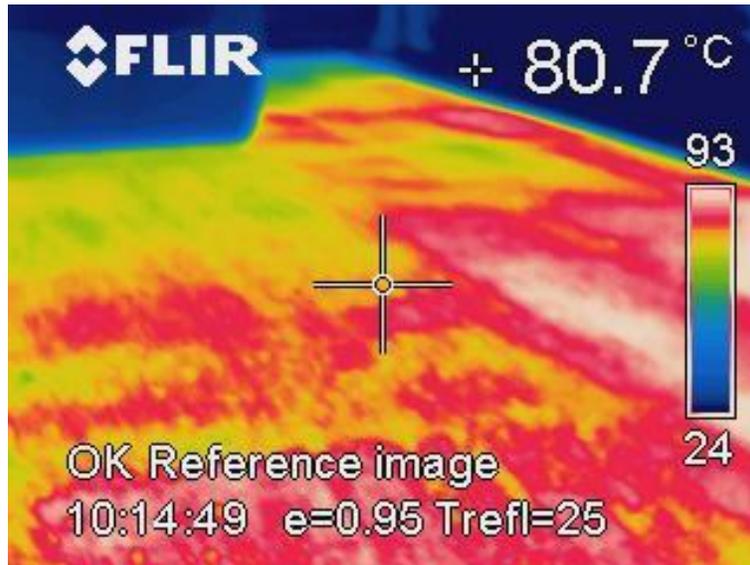


Figura 31. Perfil térmico de capa asfáltica al momento de compactar.

De igual forma, la siguiente figura ilustra cómo en algunos momentos no se cumplió con la temperatura recomendada y que se plantea como una limitación constructiva.



Figura 32. Temperatura de mezcla asfáltica al compactar.

2.10.2. Limitaciones de espacio y acomodo de los equipos

Aunque hubo espacios donde la maquinaria no pudo compactar como se debía, esto se tenía previsto pues pese a que es parte de toda la pista de ensayo, no se contempla como un espacio efectivo donde



se realizan los ensayos, por lo que la falta de compactación en ese sitio no va a perjudicar los futuros resultados obtenidos. Lo anterior es ilustrado en la siguiente figura.



Figura 33. Espacio donde la maquinaria no pudo compactar.

2.10.3. Limitaciones en la colocación y utilización de los instrumentos

Se plantea como ideal la medida de monitorear los diversos sensores mientras se realiza la colocación tanto de éstos como de las diversas capas que conformaron el pavimento. Lo anterior porque permite determinar si alguno de los sensores excedió su rango de medición y así, en un posible caso de generación de datos atípicos ya sea en ese sensor o en el tramo en el cual se encuentra, explicar de cierta manera esa generación de datos no esperados.

Aun cuando, lo anterior es lo más deseable durante el proceso, esto no fue realizado en este caso. Esto porque al momento de colocar los sensores y construir los tramos, no se contaba con el sistema de adquisición de datos; de esta forma no fue posible seguir ese planteamiento ideal y se define entonces como una limitante presente en el proceso. Se recomienda para ensayos a ser realizados en el futuro, contar antes de iniciar con la construcción de las pistas de ensayo, con el sistema que permita funcionar apropiadamente todo el arreglo de sensores.



3. Instrumentación colocada

Para poder realizar los ensayos a escala real se necesitan instrumentos complementarios al HVS que permitan obtener las mediciones necesarias, en particular de las respuestas del pavimento, los cuales en su mayoría fueron (como se detallará más adelante) instalados junto con la construcción de los tramos. Seguidamente se nombrarán y explicarán cada uno de los instrumentos.

3.1. Distribución de los sensores

La distribución de los sensores varía dependiendo de las instalaciones y del tipo de experimento. Estos sensores se instalan para medir respuestas que están relacionadas con deterioros típicos del pavimento.

Fueron colocados 4 sensores de presión a nivel de sub-rasante. Deformaciones unitarias y presiones medidas a este nivel están relacionadas con la resistencia a la deformación permanente de una estructura de pavimento flexible.

Adicionalmente se colocaron 8 sensores de deflexión vertical instantánea a profundidad variable (MDD) con el propósito de obtener módulos de las diferentes capas y deformaciones permanentes en cada capa.

Finalmente, el arreglo instrumental incluye 12 sensores de deformación Dynatest PAST II (tensión y deformación en capa asfáltica), 8 de estos últimos en sentido longitudinal a las pistas y 4 en forma transversal. Deformaciones unitarias medidas a este nivel están relacionadas con la resistencia a la agrietamiento por fatiga de una estructura de pavimento flexible y se colocan en 2 sentidos ya que dependiendo del tipo y magnitud de la carga así se generan las grietas (en sentido longitudinal o transversal).

En la Figura 34 se muestra la colocación de los diversos sensores en las pistas de ensayo. El espaciamiento entre sensores se seleccionó basado en la experiencia de otros investigadores que buscan minimizar la posible interferencia de unos sensores con otros (Timm, D.H., 2004). Adicionalmente, se espera que ciertos sensores fallen durante el proceso constructivo o durante el experimento al llegar a un nivel de deterioro avanzado por lo que se instalan replicas para obtener la redundancia deseada (Brown, S.F., 1977).

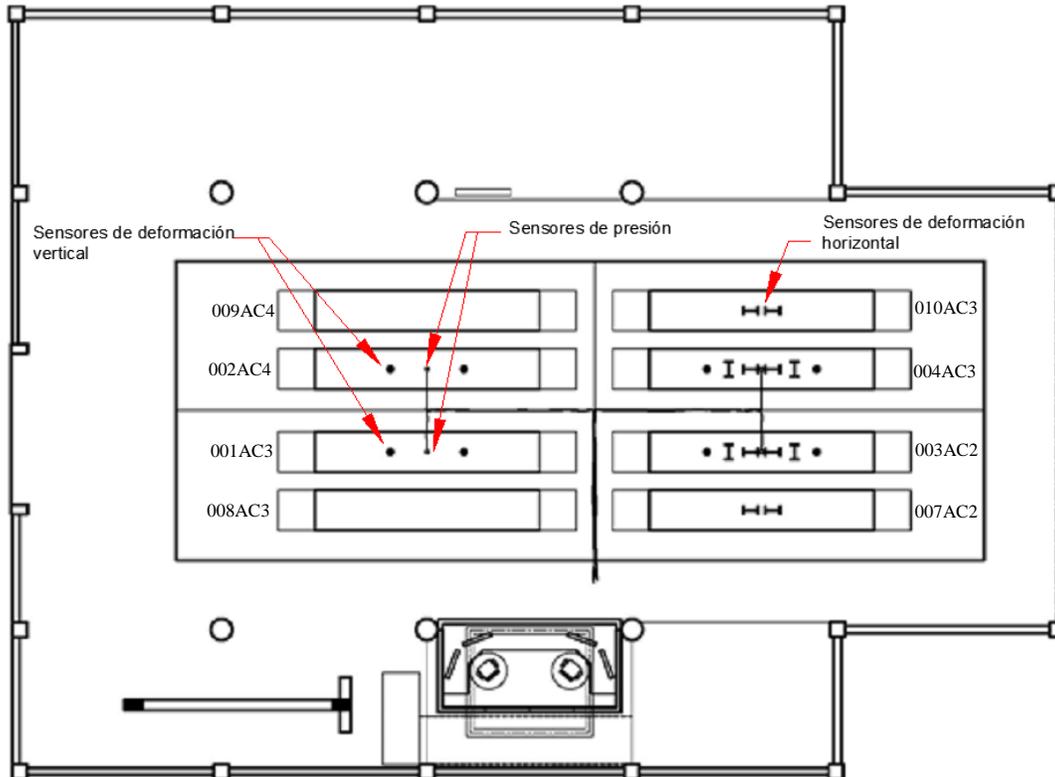


Figura 34. Localización de los sensores en los tramos.

3.2. Perfilómetro laser 3D (RSP)

El perfilómetro permite realizar mediciones longitudinales y transversales de la superficie de ensayo, generando así un perfil tridimensional del tramo ensayado. Este sistema consiste en un equipo de medición de marca LMI Selcom, modelo SLS 5000, con dos dispositivos láser de 16 Hz (ver Figura 35).

Dependiendo de la distancia entre el sensor SLS y el punto de luz, la imagen del haz de luz se enfocará en un punto en el detector. Este detector es de alta resolución y sensible a la posición.

Este detector convierte el punto de luz en señales eléctricas y así se puede calcular la distancia real al objeto. Las medidas reportadas son muy rápidas, este sensor repite las medidas en una secuencia de 16.000 veces por segundo. Esto hace posible que se mida en objetos en movimiento y en vibración. La precisión es alta y el error es menor al 0,2% del rango de medición.



La frecuencia de muestreo indica la frecuencia con el sensor evalúa la señal analógica en bruto mediante la realización de una conversión A/D. El valor del ancho de banda indica cómo se condiciona la señal analógica antes de la conversión A/D. Con el fin de evitar ciertos problemas de procesamiento de señal, el ancho de banda tiene que ser inferior a la frecuencia de muestreo, (no puede superar el 50% de la frecuencia de muestreo), y por esa razón se pone la señal a través de una etapa de filtro analógico antes de la conversión A/D.

Entre las ventajas, se encuentra que es rápido, un tiempo de subida entre 10-90 % que equivale a 0,2 microsegundos, tiene un alto rechazo de luz ambiental y una alta resolución, limitado sólo por el conversor análogo-digital.

La técnica también permite la rápida regulación de la potencia del láser de salida. Esta rápida regulación hace que la medición de casi cualquier material o superficie sea posible y permite variaciones rápidas y grandes en medidas de superficies, color y reflectividad.

La función entre la salida bruta del detector y la distancia actual entre el sensor SLS y el objeto medido es no lineal. Esta no linealidad se debe mayormente a la geometría de este tipo de mediciones y a la parte analógica del procesamiento de datos. Por lo tanto, cada sensor es calibrado para compensar cualquier no linealidad incorporada o error de fábrica.



Figura 35. Perfilómetro láser (RSP).



3.3. Dynatest PAST II

Los transductores para medición de pavimentos (PAST por sus siglas en inglés) son usados para la medición de esfuerzos y deformaciones en pavimentos de concreto asfáltico o concreto Portland. Este tipo de medidor consiste en una celda de carga de resistencia eléctrica cubierto por una tira de fibra de vidrio reforzada con epóxico que lo recubre en varias capas. Este sensor puede medir hasta 1.500 micras de deformación unitaria basada en una escala de excitación de 10 voltios. El transductor es de un cuarto de puente con una resistencia de 120 ohm. Este sensor tiene una longitud efectiva de 102 mm con anclajes de 75 mm (ver Figura 36).



Figura 36. Transductor para medición de deformaciones unitarias.

Durante la construcción de las pistas, este tipo de sensores se colocaron en las estructuras con base granular, ubicándolos sobre la capa de base, de manera que la capa de mezcla asfáltica se coloca directamente sobre la base y los sensores.

De esta forma los sensores quedan instalados de forma horizontal para medir los esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa de mezcla asfáltica; esto de forma transversal y horizontal.

La importancia de estos sensores radica en la posibilidad de conocer los esfuerzos a los que está sometida esta capa. La falla en las estructuras de pavimento flexibles se da por repeticiones de carga, esto debido a los esfuerzos y deformaciones que causan; los sensores están ubicados para medir los valores representativos utilizados para diseño.



3.4. Dynatest SOPT

Los transductores para presión en suelos (SOPT por sus siglas en inglés) son usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas. El transductor entero está hecho de titanio, con el fin de proveer máxima resistencia al deterioro mecánico y galvánico.

Cada unidad SOPT está cubierta de epóxico y arena para asegurar un buen desempeño en todos los tipos materiales de construcción de pavimentos sin ligante (ver Figura 37). Estos sensores tienen un diámetro de 68 mm y un espesor de 13 mm, trabajan en un rango de temperatura amplio de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y tienen una vida útil promedio de 36 meses. El transductor internamente está compuesto de un puente completo con una excitación máxima de 12 voltios con lo que permite medir presiones hasta 200 kPa.



Figura 37. Transductor para medición de presión

Los sensores de presión son colocados para determinar en qué medida el pavimento distribuye y reduce los esfuerzos actuando sobre la capa de sub-rasante. Es necesario determinar el comportamiento y funcionamiento de la estructura de pavimento ante la aplicación de cargas tanto estáticas como dinámicas. Estos sensores miden la presión ejercida sobre la capa de sub-rasante, y como esta presión aumenta conforme la estructura se degrada con el paso de las cargas.



3.5. Deflectómetro de Profundidad Múltiple (MDD)

El deflectómetro de profundidad múltiple (MDD por sus siglas en inglés) es usado para medir en sitio las deflexiones elásticas y las deformaciones permanentes en las distintas capas de un tramo de prueba. Realiza mediciones de deformación en la dirección vertical.

Consiste en una serie de módulos de transductores diferenciales lineales variables (LVDTs) que se montan sobre una pieza metálica larga anclada al fondo de un agujero de 39 mm de diámetro en el tramo de prueba.



Figura 38. Elementos que componen el montaje del Deflectómetro de Profundidad Múltiple.

Al momento de instalar estos módulos, los mismos se fijan a las paredes del ducto mediante el mecanismo de pequeños balines de acero que posee el módulo.

El módulo LVDT mide el desplazamiento de las diferentes capas en relación con la pieza metálica con una precisión de 10 micrones. La parte superior del orificio está sellado con una tapa que contiene un conector al sistema de adquisición de datos.

En la Figura 39 se puede apreciar el aspecto superficial que tiene la instalación una vez concluida, con el detalle adicional de que para una instalación (002AC4) se realizó un corte transversal de poca profundidad, y se colocó un sello, para llevar los conectores hasta el sistema de adquisición de datos.



De esta manera se puede medir la reacción de la estructura durante el desarrollo normal de la prueba y/o en diferentes posiciones de la rueda de ensayo.



Figura 39. Aspecto superficial de la instalación concluida.

Con estos sensores se obtienen datos de deflexión elástica instantánea y deformación permanente para las diferentes capas a lo largo del ensayo, ejemplos del tipo de salidas que se obtienen se muestran en las Figura 40 y Figura 41. Estos valores son obtenidos luego de un proceso de depuración y tratamiento muy extenso. Además, se observó que el sensor MDD colocado a nivel superficial presentó las deformaciones más altas, mientras que el resto de los sensores reportaron deformaciones similares entre ellos. Esto indica que la mezcla asfáltica es responsable por la mayoría de la deformación plástica observada y que por debajo de esta la estructura se deformó uniformemente gracias a la presencia de la capa estabilizada con cemento.

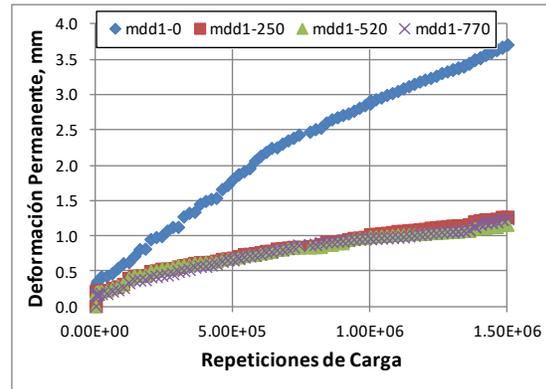
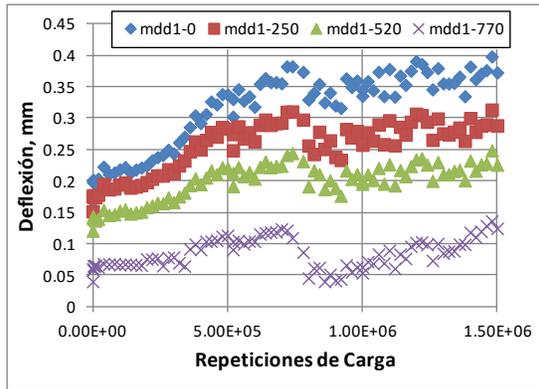


Figura 40. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor MDD1 tramo 002.

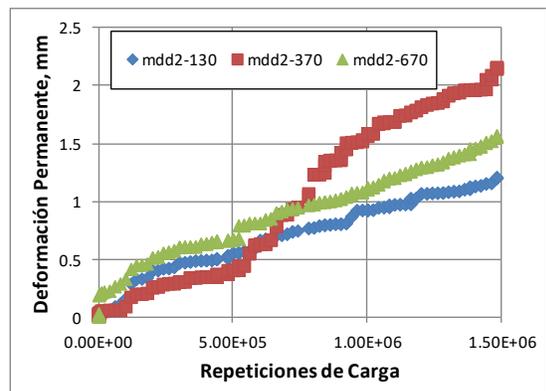
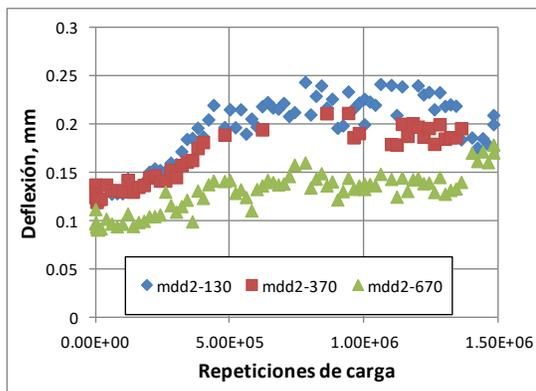
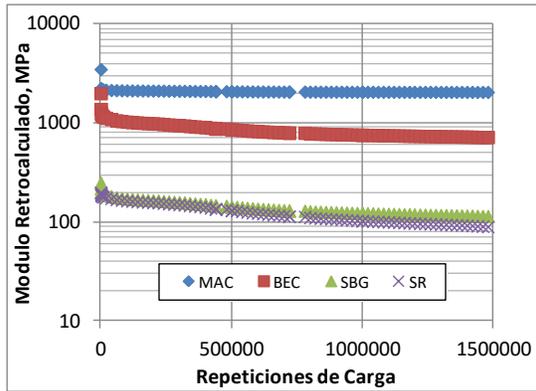
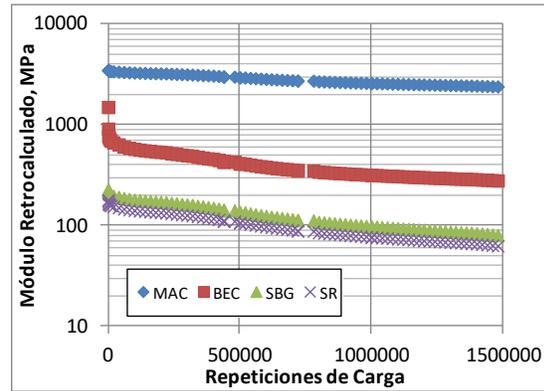


Figura 41. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor MDD2 tramo 002.

En la Figura 42 como el módulo de la capa asfáltica es la que sufrió menor daño con el paso de las cargas del ensayo. Por otro lado, las capas granular y suelo presentar el mayor daño progresivo seguido de la capa de base estabilizada. En general, la caída en la capacidad de soporte de la estructura fue leve y esto coincide con el bajo nivel de deterioro observado y las bajas respuestas (deflexiones) medidas ante la aplicación de carga.



Posición se sensor MDD1



Posición se sensor MDD2

Figura 42. Módulos de capa retro-calculados tramo 002.

3.6. Medidor de Actividad de Grietas

El medidor de actividad de grietas (CAM por sus siglas en inglés) es un instrumento que mide el movimiento relativo de la grieta, tanto movimientos verticales como movimientos horizontales (ver Figura 43). Para la instalación del medidor es necesario fijar el soporte del mismo de un lado de la grieta mediante pegamento, y fijar una placa de referencia al otro lado de la grieta.

Los datos recopilados por la CAM son utilizados para la simulación de grietas de los materiales en el análisis de laboratorio con el objetivo de ir evaluando la capacidad de los materiales para retardar la reflexión de grietas.

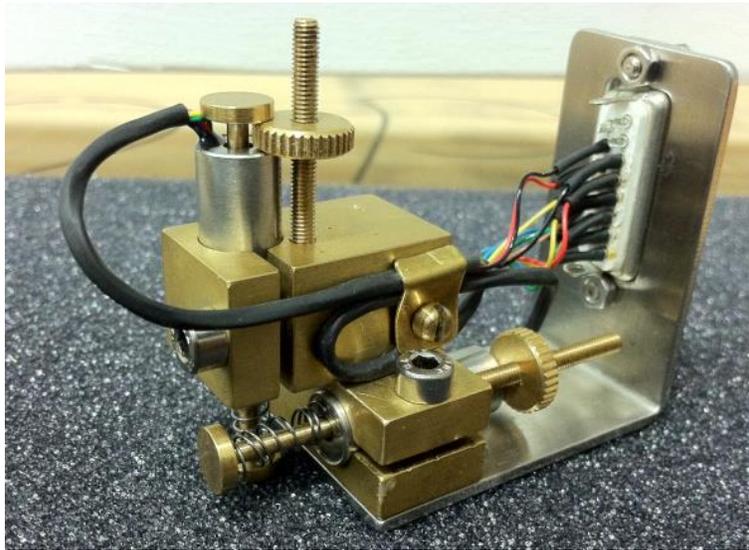


Figura 43. Medidor de actividad de grietas.

3.7. Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)

La deflexión de la superficie del pavimento es un importante parámetro de respuesta estructural, mediante el uso del RSD se puede medir la deflexión de la superficie en el pavimento conforme la rueda del equipo se aproxima al sensor ubicado en el extremo delgado del equipo que se muestra en la Figura 44.

Al igual que otros componentes de la instrumentación que se viene utilizando, permite documentar el deterioro progresivo que sufre la estructura conforme avanza el número de repeticiones de carga.

La carga utilizada para la prueba equivale a un eje de 80 kN, para el equipo equivale a 40 kN por utilizarse la mitad de un eje de doble rueda. Adicionalmente es importante señalar que esta prueba se realiza a una velocidad lenta, con lo que se cuenta con una exactitud de medición de 10 micras, y una recolección de datos automática, con aproximadamente 256 puntos de datos.



Figura 44. Deflectómetro de superficie del pavimento.

3.8. Termocuplas

Son sensores de temperatura, instalados en su gran mayoría en la superficie de los tramos y que permiten relacionar el papel de la temperatura en la deformación de la superficie. Están hechos con 2 alambres, uno de níquel y el otro de cromo y registran temperaturas entre -180 y 1300 °C. Funcionan por medio de voltajes generados por el aumento de temperatura. La Figura 45 ilustra estos sensores instalados.



Figura 45. Termocuplas instaladas en los tramos



3.9. Medidor de humedad relativa en suelos y bases granulares

Miden el contenido de agua, conductividad térmica y temperatura de material granular y suelos. Son de marca DECAGON 5TE. Este sensor se muestra en la siguiente figura. El sensor utiliza una frecuencia de 70 MHz, lo que minimiza la salinidad y efectos de textura, haciendo que la precisa 5TE en la mayoría de los suelos. El 5TE mide la temperatura con un termistor a bordo, y la conductividad eléctrica mediante un sistema de electrodos de acero inoxidable. La temperatura y la conductividad eléctrica deben ser calibradas para los diferentes materiales. El sistema de recolección de datos Em50, trabajo con 5 baterías AA y puede guardar hasta 36 mil datos obtenidos de forma continua de 5 puertos diferentes.



Figura 46. Sensor de humedad relativa instalado.

3.10. Sistema de Adquisición de Datos (DAS)

Corresponde al sistema de hardware y software necesario para poder controlar, monitorear y guardar información generada y procesada por la instrumentación asociada a los ensayos. Los dispositivos para la adquisición de datos son de marca *National Instruments*. Consiste en un centro de recepción y almacenaje de datos que puede ser observado en la Figura 47.



El sistema toma los datos medidos por el RSD, MDD, CAM y los sensores SOPT y PAST, se recolectan los datos brutos y se procesan utilizando el software y se almacenan en la base de datos. Para el caso del perfilómetro laser, los datos son adquiridos directamente por el sistema del HVS, por lo que se procesan aparte del sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos tiene 4 entradas para el deflectómetro de profundidad múltiple (MDD) y entradas de corriente alterna para módulos de transductores diferencial lineal variable LVDTs, 16 entradas para sensores de deformación, 32 conexiones para termopar y 12 entradas de corriente directa para LVDTs y una conexión con el HVS para sincronizar el registro de las repeticiones de carga con la recopilación de información.



Figura 47. Sistema de Adquisición de Datos (DAS).

Si bien el sistema tiene la capacidad para recolectar información durante todo el tiempo de ensayo, actualmente el sistema se está utilizando para recopilar datos cada 20.000 repeticiones de carga, lo cual es aproximadamente una vez al día. Esta forma de recopilar la información ha permitido un excelente desempeño en el procesamiento de la información y el seguimiento de la prueba en desarrollo.



4. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos acelerados de pavimentos se clasifican por el nivel de procesamiento de la información, pues los datos recolectados en primera instancia se entienden como datos que pueden ser estudiados en el futuro, comparándolos con ensayos bajo otras condiciones y que permitan hacer un análisis de mayor complejidad.

Considerando lo anterior se pueden clasificar los informes de resultados en tres grandes grupos: de primer orden los resultados reportados con interpretaciones básicas y orientados a la divulgación elemental, de segundo orden los resultados donde la correlación comparativa permite conclusiones derivadas del análisis de las condiciones, y un tercer orden de manejo de los resultados donde se extrapolan los resultados a partir de los análisis, de manera que la información obtenida pueda ser aplicable a una amplia gama de condiciones.

Es importante mencionar que, debido a la naturaleza de los ensayos desarrollados, la información debe ser procesada y resguardada en los diferentes niveles, partiendo de la recopilación básica con un procesamiento de verificación de la misma; hasta los análisis más elaborados de la información.

Por la naturaleza de este informe, los resultados presentados serán orientados al denominado primer orden, de manera que los análisis más elaborados serán motivo de informes futuros.

Al momento de la realización de este informe está en proceso de ensayo el tramo 009AC4H, quedando pendiente el tramo 010AC3H y el análisis forense de las estructuras. El análisis forense consiste en la revisión de las estructuras falladas, realizando cortes en las estructuras para analizar los patrones de falla.



4.1. Resultados generales de primer orden

4.1.1. Deformación de las superficies de ensayo

Como parte fundamental del proceso de ensayos desarrollado se realiza un seguimiento detallado de la deformación que sufre la superficie producto de la aplicación de cargas. El perfilómetro indicado en la sección 3.2 permite realizar dichas mediciones a la superficie, generando así un perfil tridimensional de cada tramo ensayado.

La Figura 48 muestra un ejemplo de sección transversal promedio de un tramo en proceso de ensayo, este parámetro tiene una alta importancia en el desarrollo de los ensayos, ya que permite identificar el avance del deterioro por deformación permanente; el cual es recurrentemente el criterio para detener el proceso de ensayo.

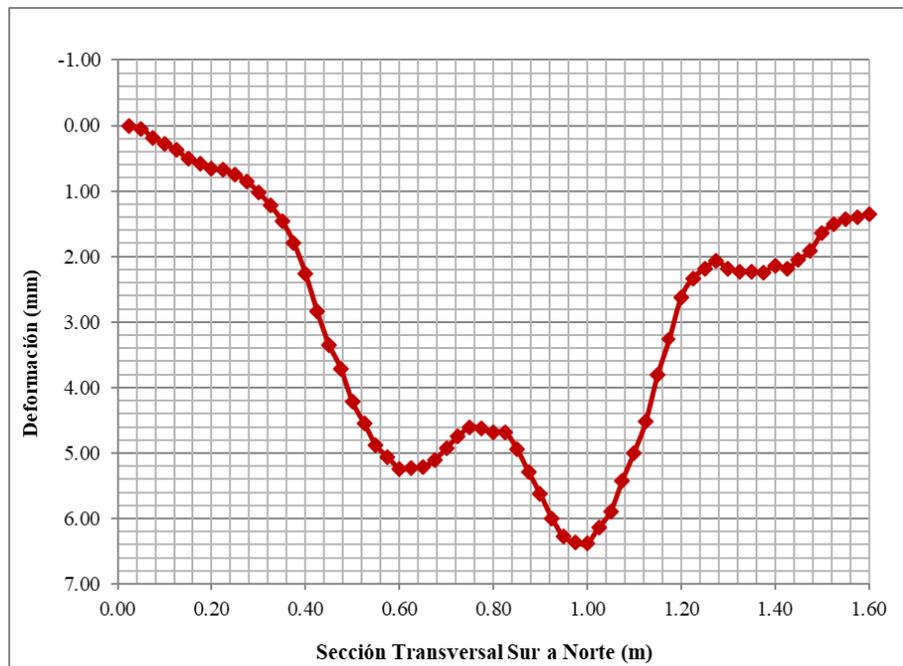


Figura 48. Muestra de sección transversal promedio de un tramo de ensayo.



Tramo 001AC1

El tramo 001AC1 presenta una capacidad estructural intermedia, caracterizada por la base estabilizada con cemento y una capa delgada de mezcla asfáltica colocada en caliente. La Figura 49 resume la evolución de la deformación transversal promedio del tramo, donde se observa claramente un fallo de la mezcla asfáltica.

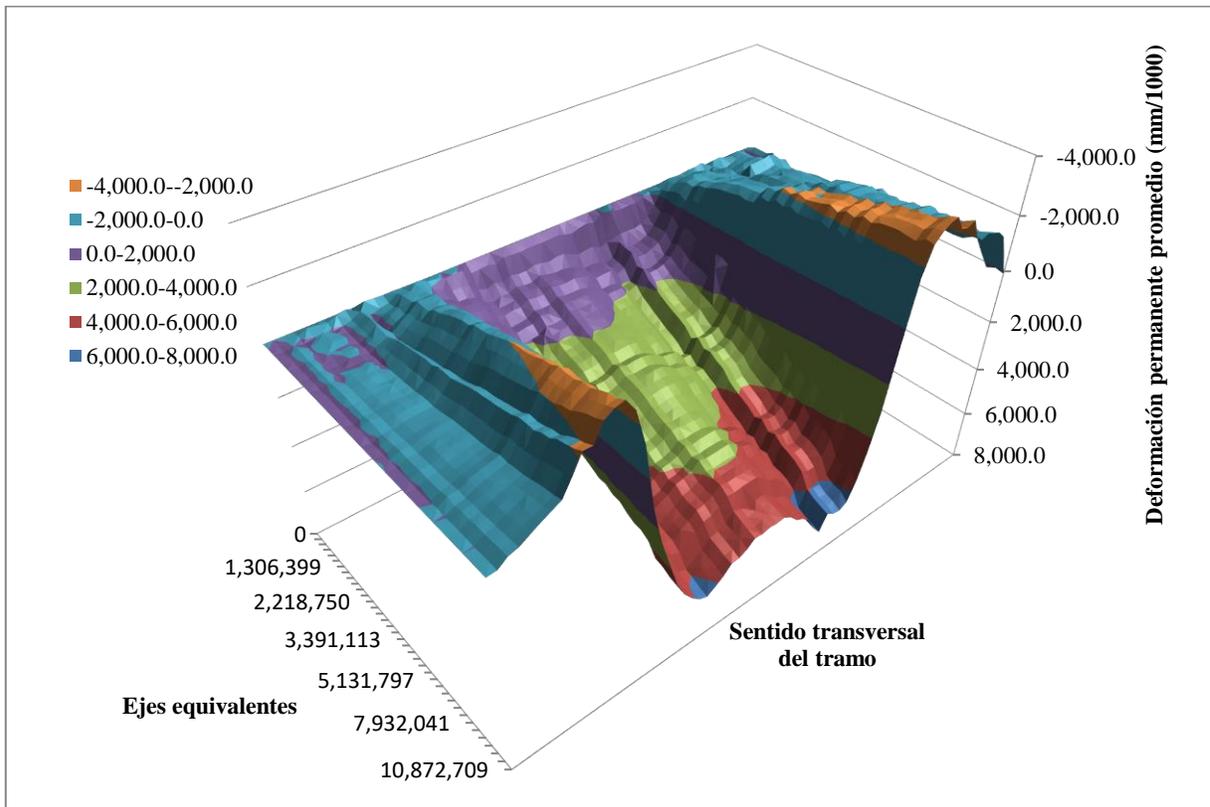


Figura 49. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio según el avance de la aplicación de carga en tramo 001AC1.

Este tipo de fallo es conocido como “fallo por cortante” y donde se presenta un desplazamiento lateral del material, presumiblemente por la presión entre las ruedas de ensayo y la capa de base estabilizada.

La Figura 50 muestra la deformación del tramo 001AC1 a todo lo largo de la sección de ensayo. De esta forma podemos apreciar como algunos puntos del tramo se deforman en mayor medida durante el desarrollo del ensayo.

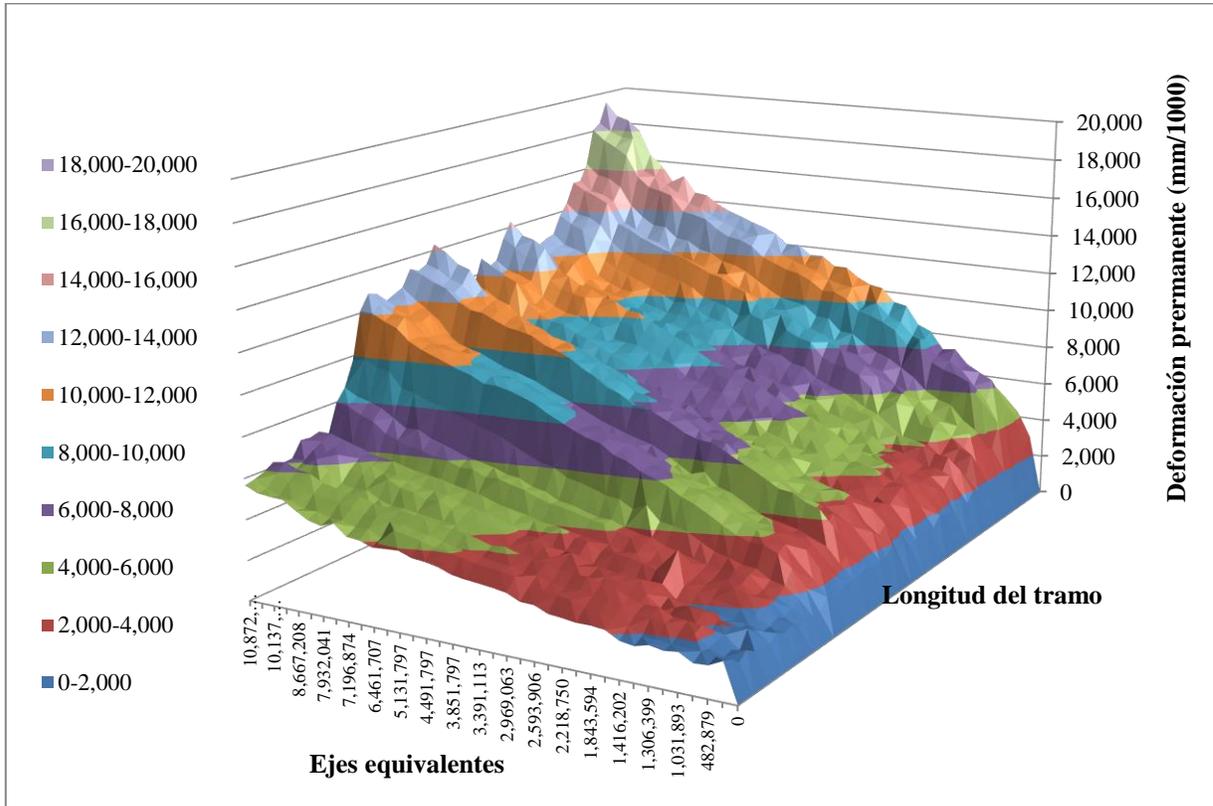


Figura 50. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de la aplicación de carga en tramo 001AC1.

Esta variabilidad se debe a diversos factores, entre los que podemos citar la variabilidad constructiva, la variación de la velocidad de la llanta de ensayo a lo largo del tramo y los ajustes de carga que pueda realizar el equipo producto de las mismas deformaciones.



Tramo 002AC4

Del conjunto de tramos estudiados, el tramo 002AC4 presenta la mayor capacidad estructural de todos. Esto puede reafirmarse si se analizan los resultados asociados a la deformación permanente del tramo, dichos resultados se muestran en la Figura 51, donde la deformación total máxima es cercana a los 4mm (incluyendo la deformación por cortante), este es un valor muy bajo y se presentó pese a la aplicación de más de 21,5 millones de ejes equivalentes de 80kN.

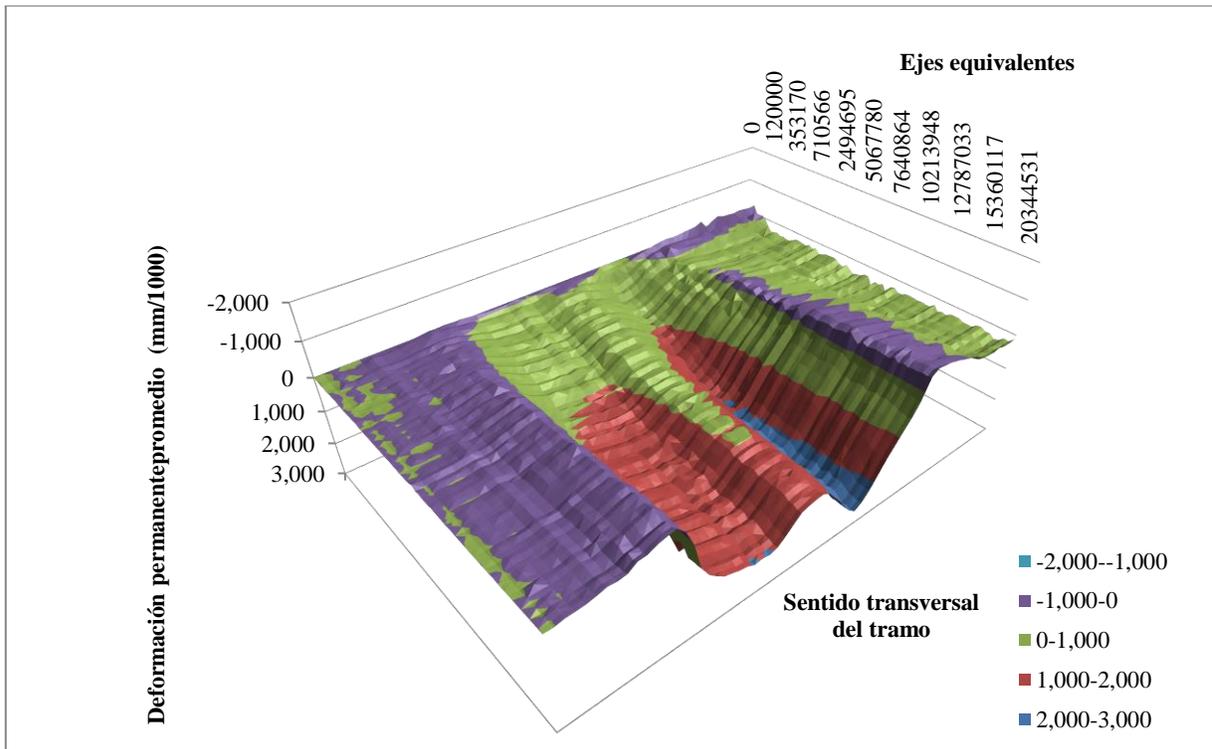


Figura 51. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio según el avance de la aplicación de carga tramo 002AC4.

La alta capacidad de la estructura se ve potenciada por la condición drenada de la estructura, donde la humedad de las capas inferiores es baja, cercana a las condiciones de compactación óptima. Se aprecia una ligera deformación por cortante en los datos.

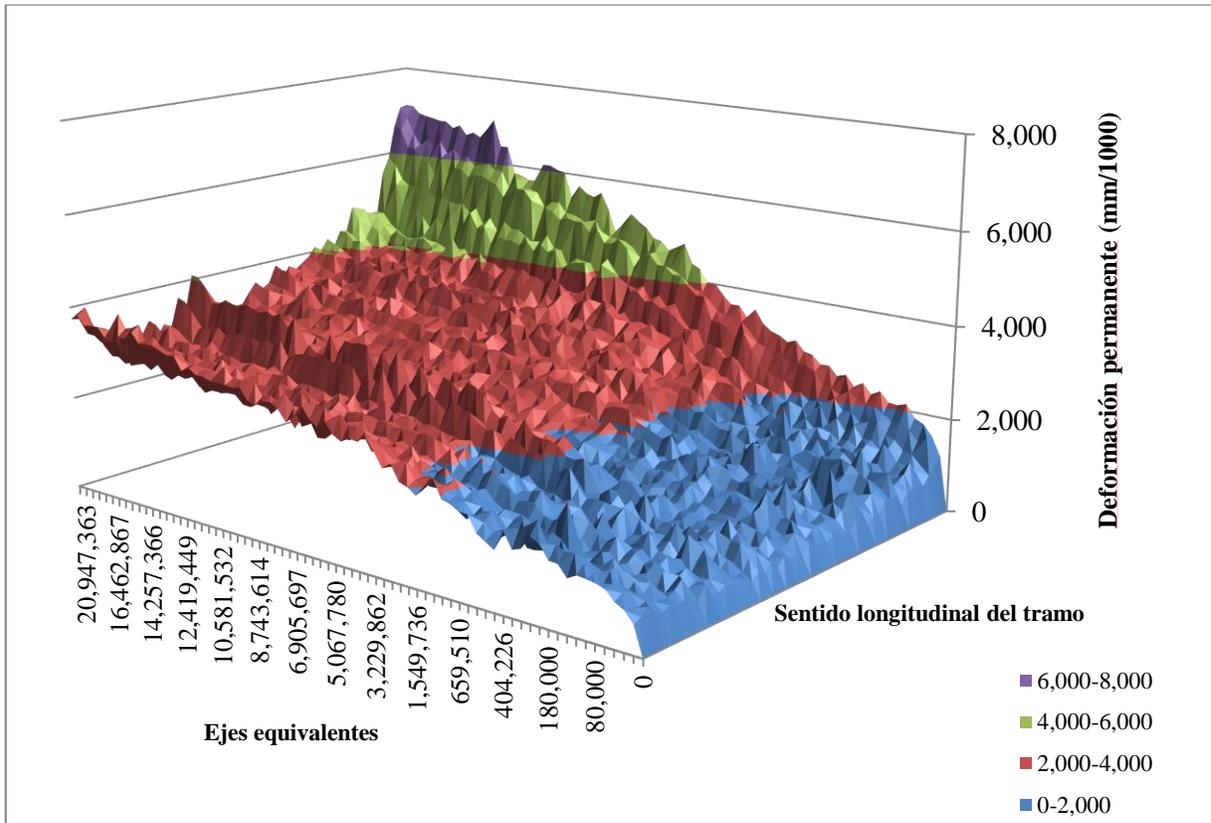


Figura 52. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de la aplicación de carga en tramo 002AC4.

En la Figura 52 se puede apreciar la deformación que presentó el tramo 002AC4 durante el proceso de ensayo. Es muy importante destacar que este tramo en particular representa las mejores condiciones estructurales de todo el conjunto de tramos de la presente construcción; esto pues está compuesto por dos capas de mezcla asfáltica, base estabilizada, y subbase granular, en condiciones de baja humedad. Es importante mencionar que el ensayo fue detenido sin alcanzar el criterio de falla por deformación.



Tramo 003AC2

El tramo 003AC2 es el equivalente a una estructura típica utilizada en Costa Rica, donde las capas de base y sub-base están conformadas por materiales granulares. Este tramo aún en condición de baja humedad se presenta una deformación constante ante la aplicación de las cargas (ver Figura 53).

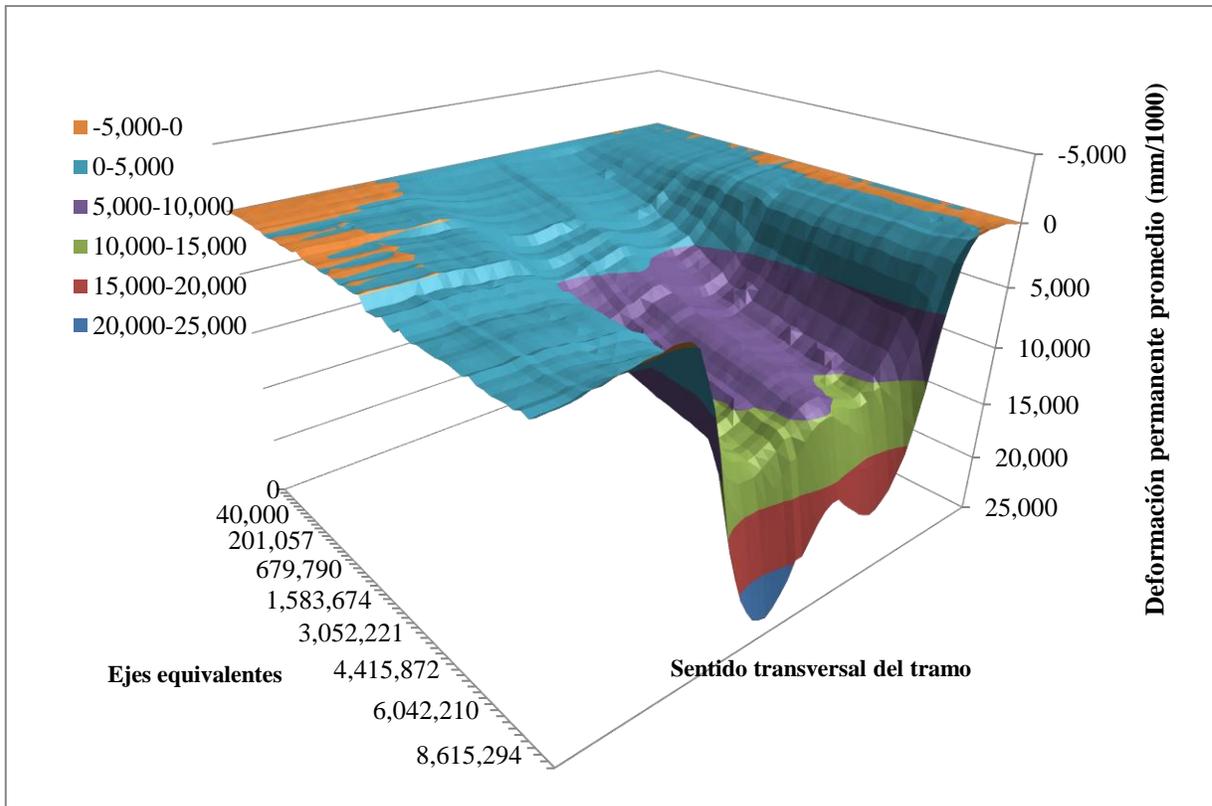


Figura 53. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio según el avance de la aplicación de carga tramo 003AC2.

El criterio de falla definido, al igual que otros tramos, fue que al alcanzar los 12,5 mm de deformación el ensayo concluirá. Como un elemento adicional, luego de alcanzado este valor en la deformación permanente, se agregó agua superficial; con lo que se evidenció la alta susceptibilidad de la estructura a la humedad, fenómeno común observado durante la época lluviosa en Costa Rica. Esto se puede apreciar en la Figura 53 y Figura 54, ya que cuando se aumenta la humedad la deformación aumenta considerablemente.

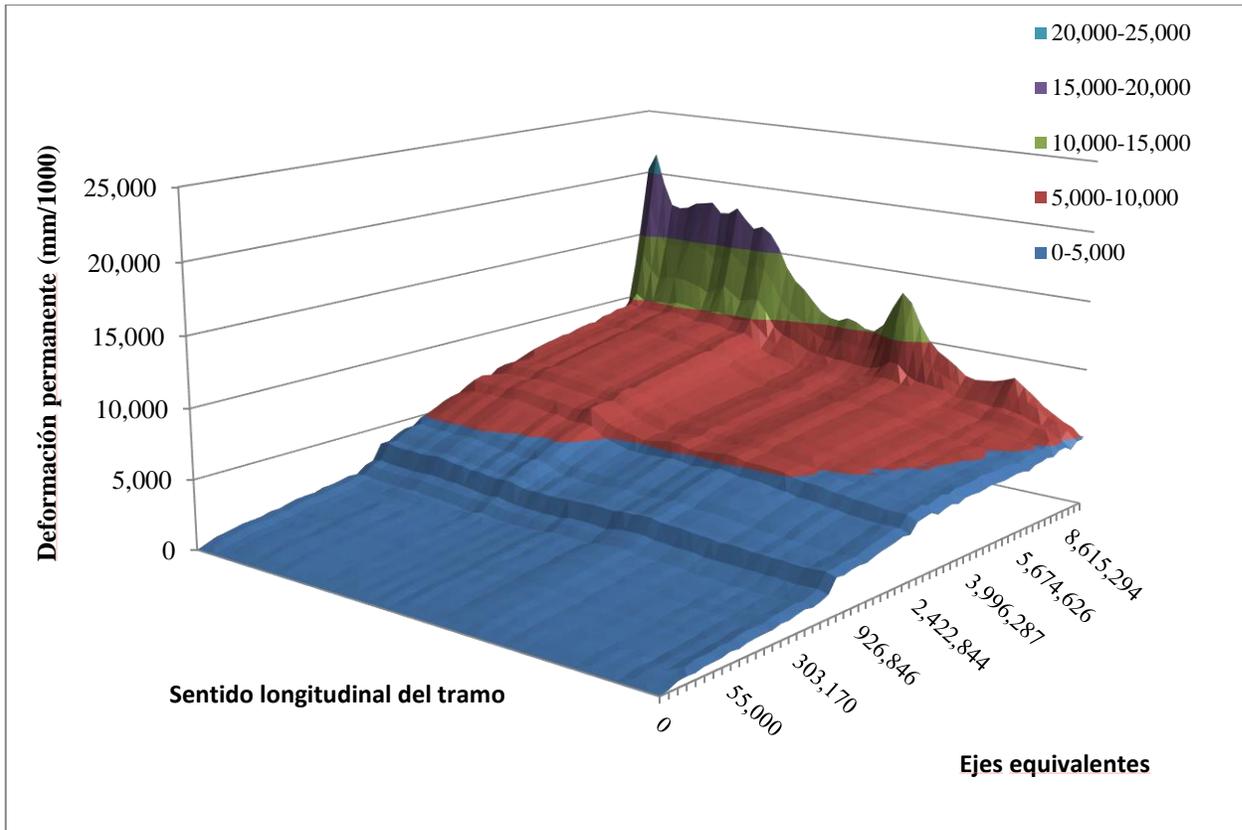


Figura 54. Evolución de la deformación de la sección longitudinal según el avance de la aplicación de carga tramo 003AC2.



Tramo 004AC3

Se puede apreciar en la Figura 55 cómo evolucionó la deformación transversal del tramo 004AC3, en la condición de baja humedad. Esta condición propició un buen desempeño de las capas granulares. Sin embargo, se aprecia que la deformación se presentó sin presencia de “deformación por cortante” en la mezcla asfáltica; lo que hace pensar que las capas granulares deben presentar algún nivel de deformación (esto será confirmado en el análisis forense de las estructuras).

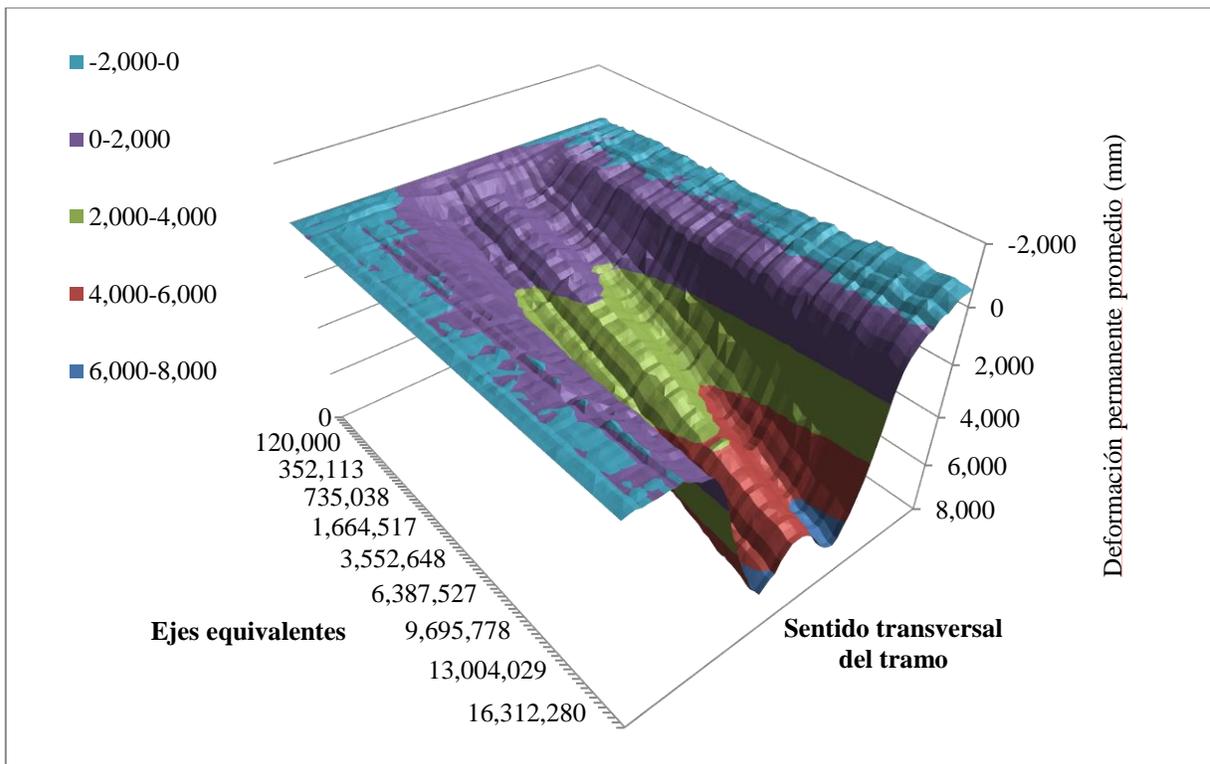


Figura 55. Evolución de la deformación de la sección transversal promedio según el avance de la aplicación de carga tramo 004AC3.



Tramo 007AC2H

En la Figura 56 se muestra la deformación para el tramo 007AC2H, este tramo representa la condición estructural más débil de todo el conjunto de tramos de la primera construcción, pues está constituida por una capa delgada de mezcla asfáltica, base granular y subbase granular; además que se incluyó humedad en las capas inferiores, simulando condiciones severas de humedad durante el proceso de ensayo.

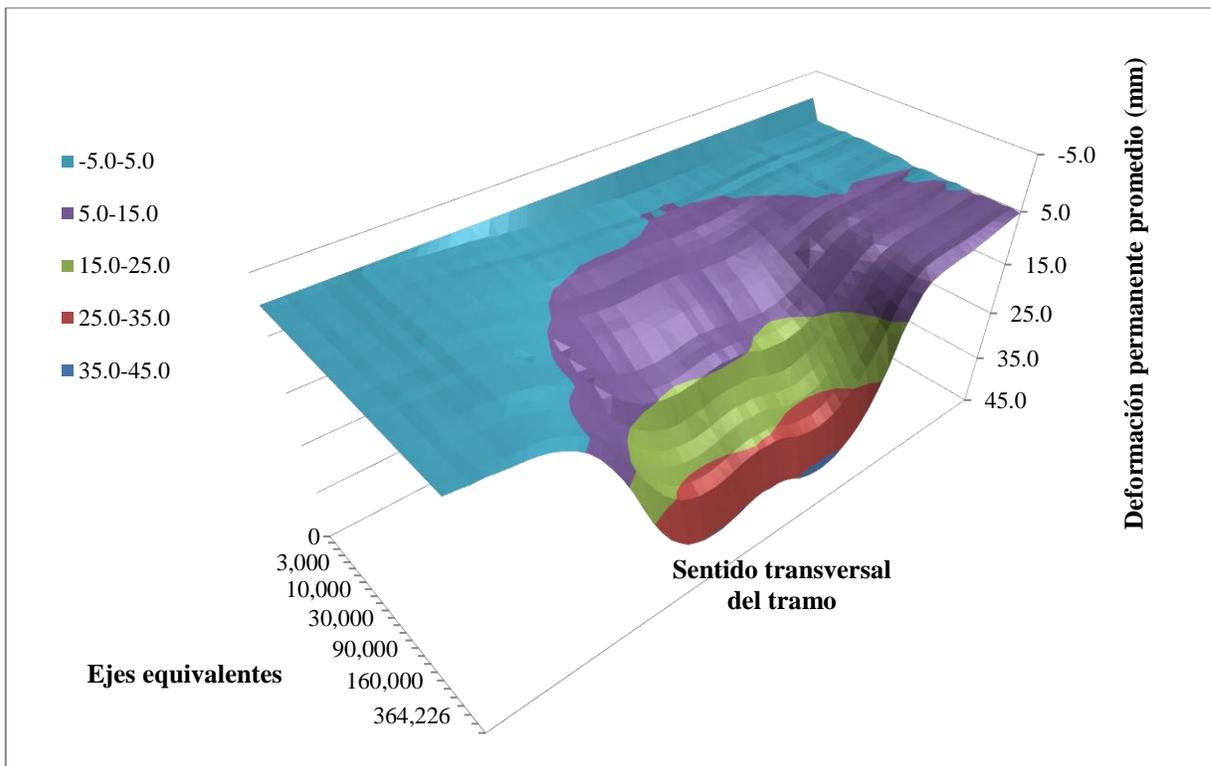


Figura 56. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio según el avance de la aplicación de carga tramo 007AC2H.

Considerando lo anterior no es de extrañar que la deformación mostrada se haya dado en gran magnitud para muy pocas repeticiones de carga (en comparación con otros tramos). Adicionalmente, dicho tramo mostró una tasa bastante regular de deformación, la misma se puede apreciar en la Figura 57.

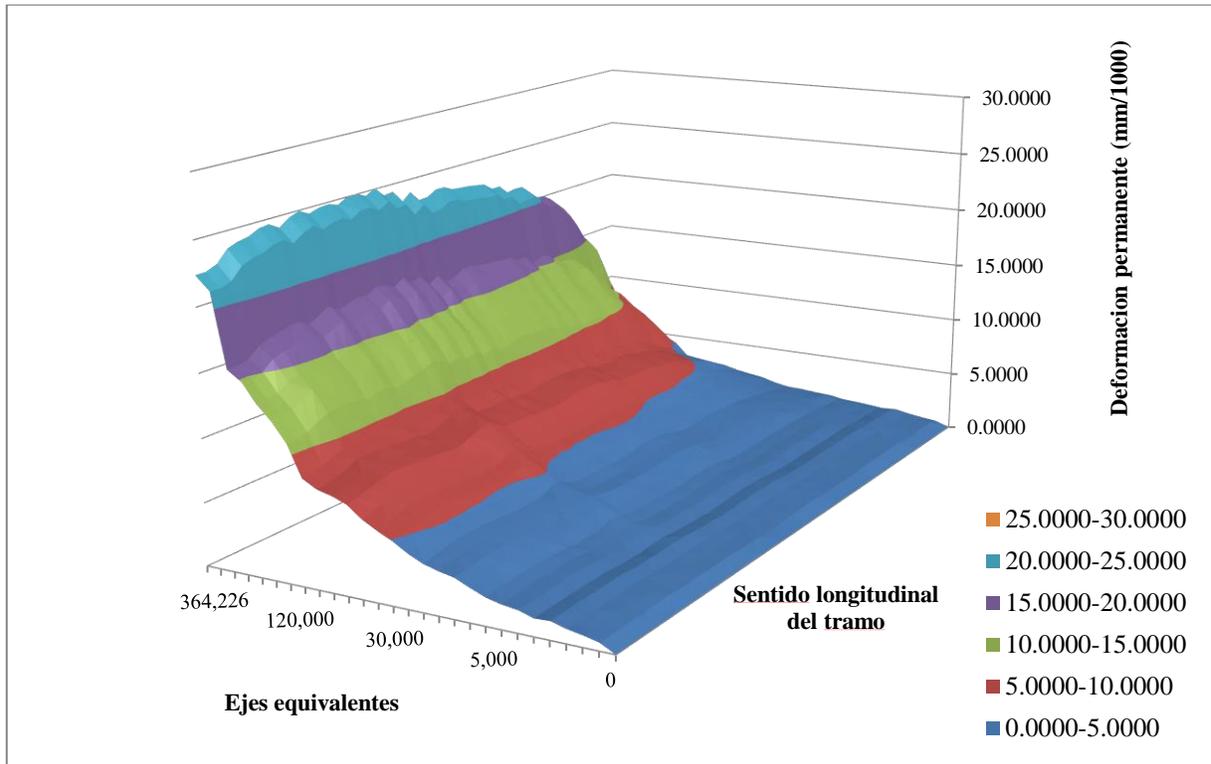


Figura 57. Evolución de la deformación en sentido longitudinal según el avance de la aplicación de carga tramo 007AC2H.

Observando el patrón que se presenta en la Figura 57, se puede evidenciar que las condiciones de capa delgada y materiales granulares sin estabilizar propician un deterioro muy acelerado de las condiciones del tramo. Generando deformaciones elevadas (sentido transversal) y constantes en todo el tramo. Además, estas altas deformaciones podrían estar asociadas a patrones de agrietamientos que se mostraron en toda la extensión de ensayo.



Tramo 008AC1H

Para el tramo 008AC1H, la deformación transversal mostró la particularidad de que si bien el valor máximo que se alcanzó es cercano a 8mm y el comportamiento general a lo largo del ensayo fue estable, al momento de iniciar el proceso de falla se presentó una deformación puntual que desencadenó en el aumento de presiones, la migración de finos, el aumento de las deformaciones y aumento en la irregularidad superficial, condición crítica para la operación del equipo (reflejado en la Figura 58).

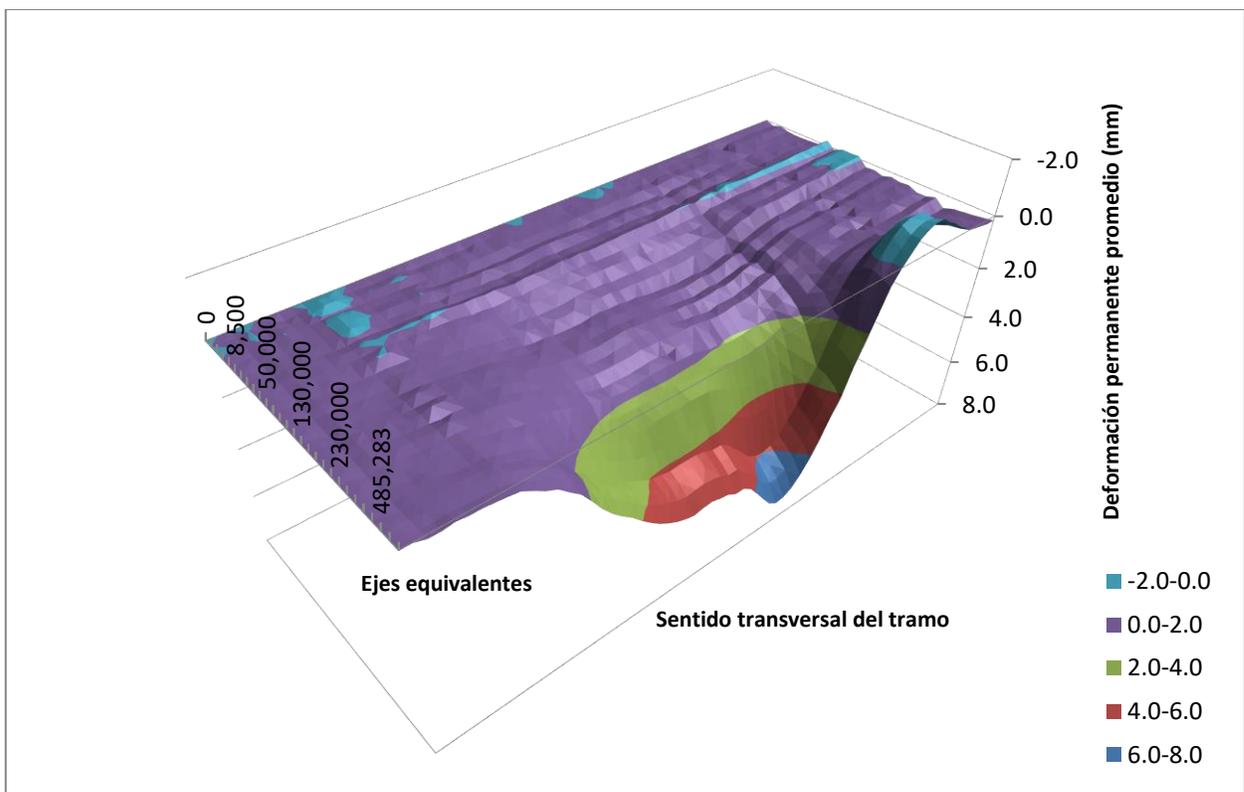


Figura 58. Evolución de la deformación de las diferentes secciones transversales promedio según el avance de la aplicación de carga tramo 008AC1H.

Esta condición favoreció la finalización del ensayo, a fin de no dañar el equipo, pues las elevadas irregularidades en la superficie generan alteraciones en el sistema de aplicación de carga.



Al momento de apreciar este tipo de condiciones para un pavimento en campo, es esperable que la estructura aún se encuentre en una condición de servicio apropiada, pero requiriendo algunas intervenciones puntuales en las zonas dañadas.

En la Figura 59 se puede apreciar la evolución de la deformación en el sentido longitudinal y las buenas condiciones que brindó el tramo en general. Sin embargo, el mecanismo de falla (puntual) que se presentó en dicha sección estuvo asociado a la falla de la base estabilizada en la zona que se observa con mayores deformaciones. Esta deformación favoreció el agrietamiento de la base, el bombeo de finos y un aumento en la irregularidad de la superficie, lo cual propició que el ensayo fuera detenido.

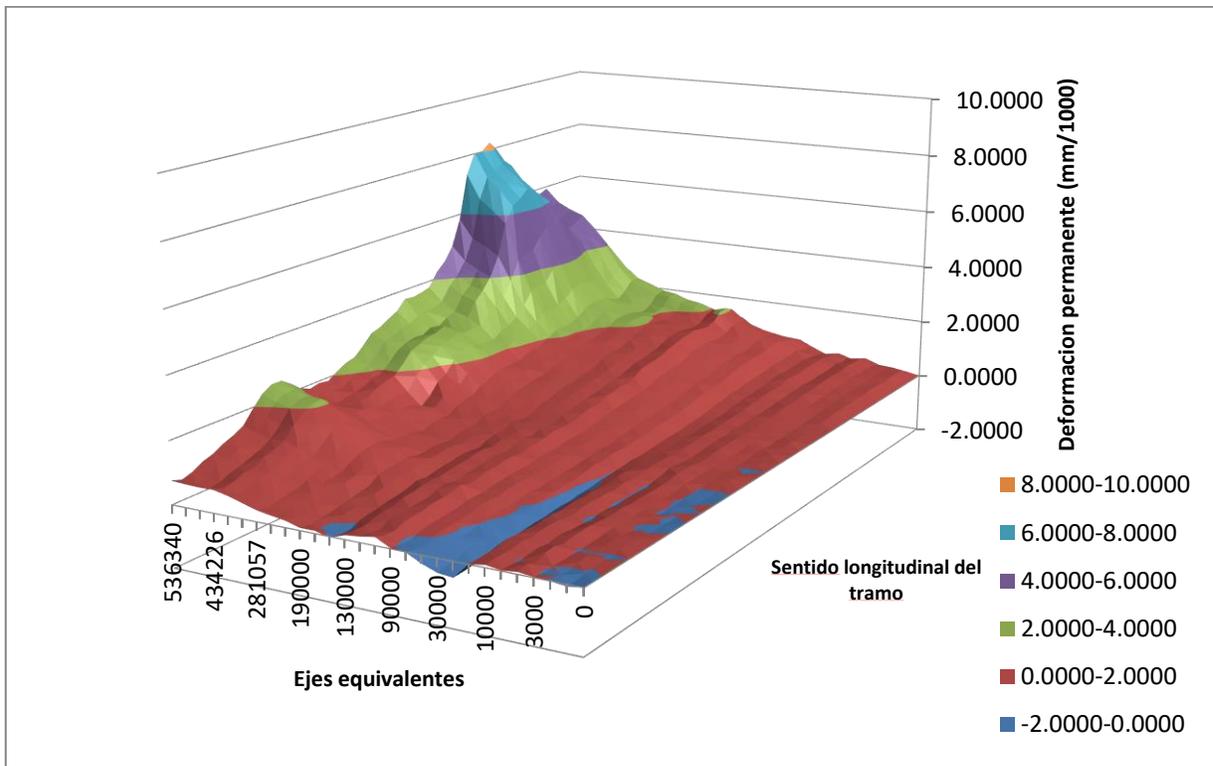


Figura 59. Evolución de la deformación de la sección longitudinal según el avance de la aplicación de carga tramo 008AC1H.



4.1.2. Regularidad superficial (IRI)

La regularidad superficial es un parámetro utilizado para valorar las condiciones funcionales de los pavimentos, es ampliamente utilizado para evaluar las condiciones de comodidad que se brindan a los usuarios. Adicionalmente correlaciona de buena forma con las condiciones estructurales.

Mediante el desarrollo de herramientas de cálculo y análisis de los datos, se ha podido incorporar el modelo de cuarto de coche para el cálculo del IRI a partir de los datos recolectados con el sistema RSP del equipo HVS. Es importante señalar que la mayor limitación para poder relacionar los datos de campo con los datos de los tramos de ensayo es la corta distancia de los tramos de estudio con el HVS; pues los modelos de IRI requieren realizar promedios en la distancia evaluada y entre mayor sea la distancia evaluada se reduce el efecto de las irregularidades en el valor obtenido. En razón de lo anterior los valores obtenidos en laboratorio podrían ser un poco más sensibles a las irregularidades.

La regularidad superficial del tramo 001AC1 se muestra en la Figura 60, donde se puede apreciar una primera etapa donde se presenta una leve mejoría producto del acomodo de partículas, posterior cerca de las 250.000 repeticiones de carga se puede apreciar un aumento de los valores; fenómeno que se mantiene hasta el final del ensayo y que es propio del deterioro que sufren los componentes.

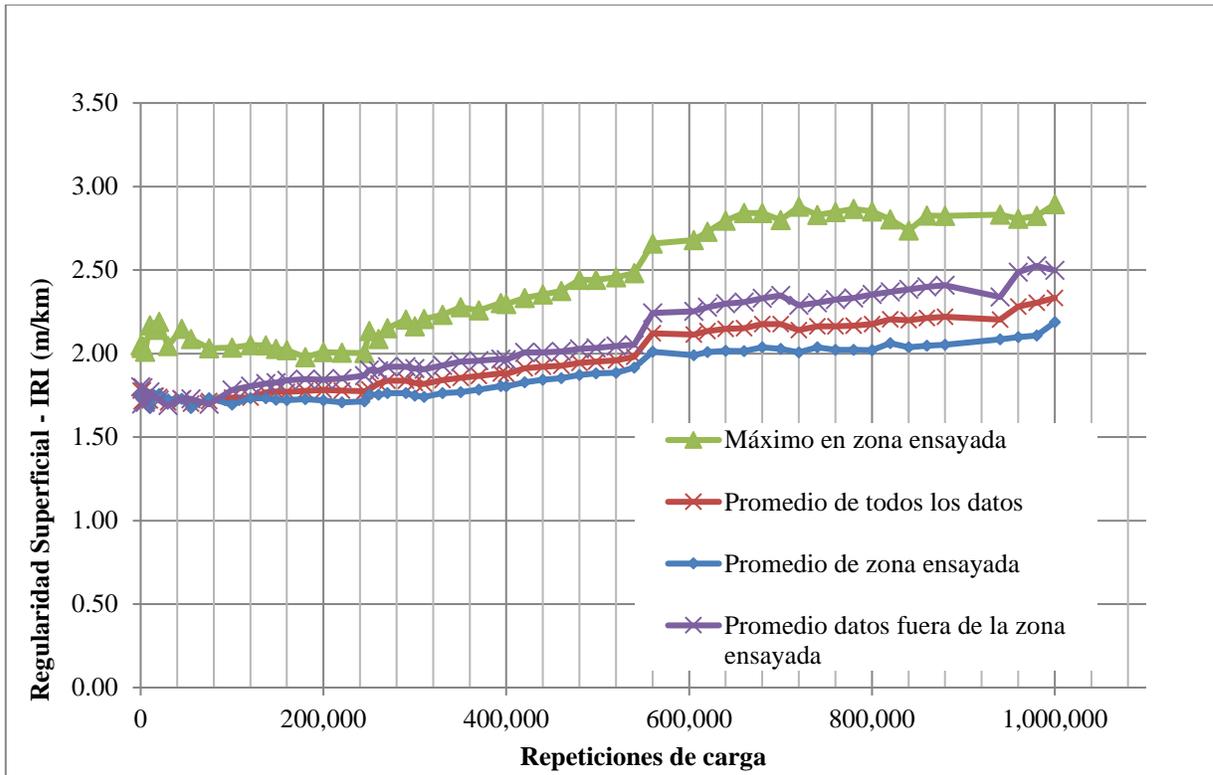


Figura 60. Evolución de la regularidad superficial (IRI) según la cantidad de repeticiones de carga en tramo 001AC1.

La regularidad superficial del tramo 002AC4 se vio beneficiada por diversos factores, entre los que resaltan la alta capacidad estructural, la colocación de una capa base estabilizada con cemento y que la misma colocada con extendidora y la colocación de una capa de ruedo con un espesor de 12cm en dos capas (ver Figura 61).

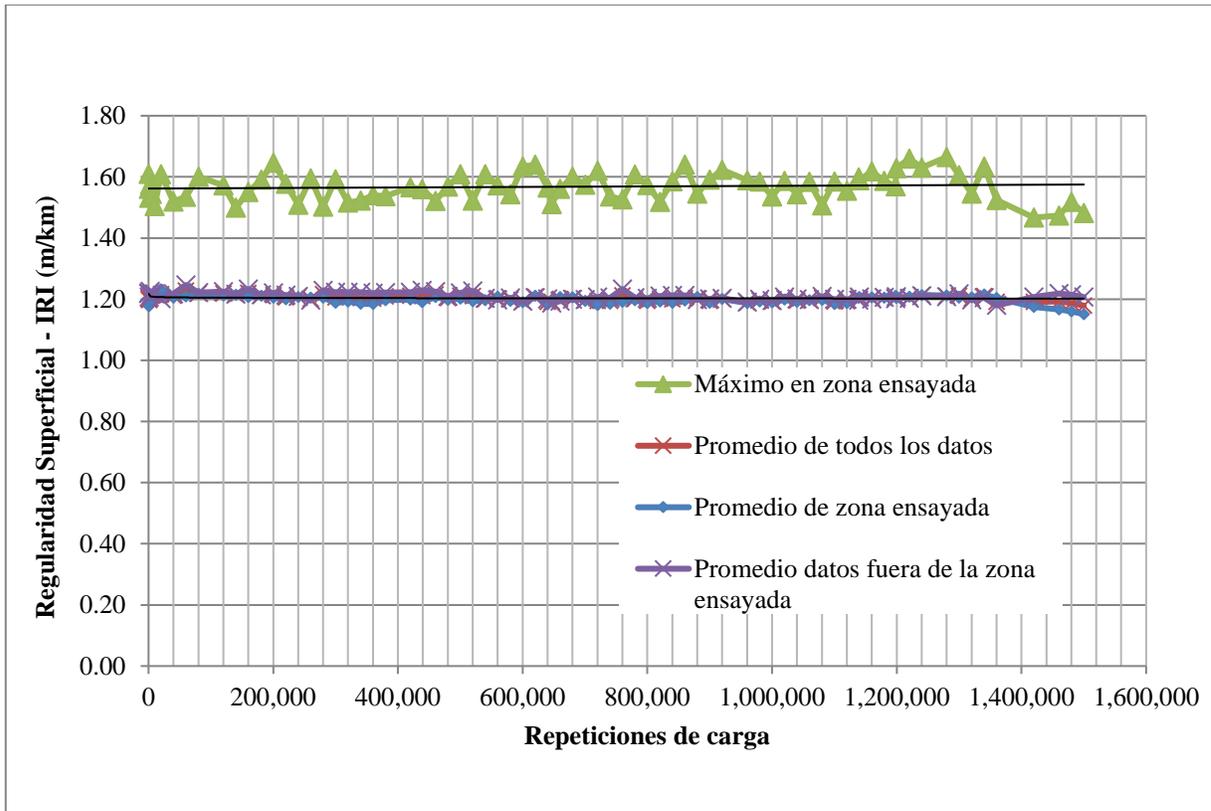


Figura 61. Evolución de la regularidad superficial según el avance de la aplicación de carga tramo 002AC4.

Los anteriores elementos unidos a la condición seca (drenada) del ensayo, contribuyeron a que la regularidad superficial mantuviera durante el desarrollo del ensayo niveles excepcionalmente buenos. Adicionalmente la segunda capa de mezcla asfáltica tuvo la condición de ser colocada a una temperatura por debajo de la temperatura normalmente aceptada de 80°C.

En la Figura 62 se observa la evolución del deterioro en el tramo 003AC2, dicho tramo está compuesto por subbase, base granular y una capa de mezcla asfáltica delgada; estas condiciones producen una combinación de factores, donde pese a la deformación observada en las Figuras 53 y 54, se aprecia que no se presentó un aumento significativo de las irregularidades debido al reacomodo de las partículas de los materiales granulares.

Como se mencionó anteriormente, posterior a cumplirse el criterio de falla por deformación, se agregó agua a la estructura ensayada. Esta condición disparó las deformaciones y la irregularidad del tramo.

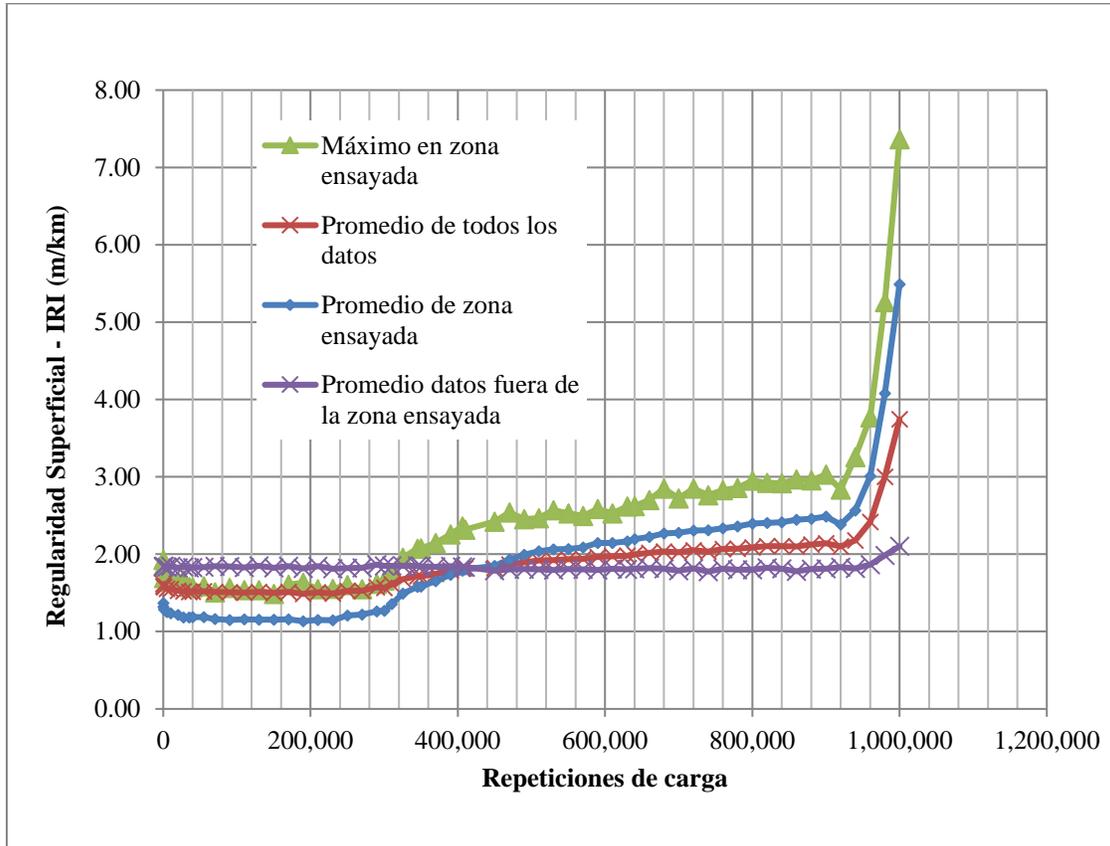


Figura 62. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 003AC2.

La Figura 63 muestra los datos de regularidad superficial para el tramo 004 AC3, en dicho grafico se pueden apreciar etapas muy marcadas en la evolución del IRI. La primera fase es de consolidación de los materiales, reacomodo de partículas y una estabilidad en los valores medidos. Existe una segunda etapa a partir de las 800.000 repeticiones, donde la evolución del daño se acelera y esto se refleja en el crecimiento que experimenta dicho indicador.

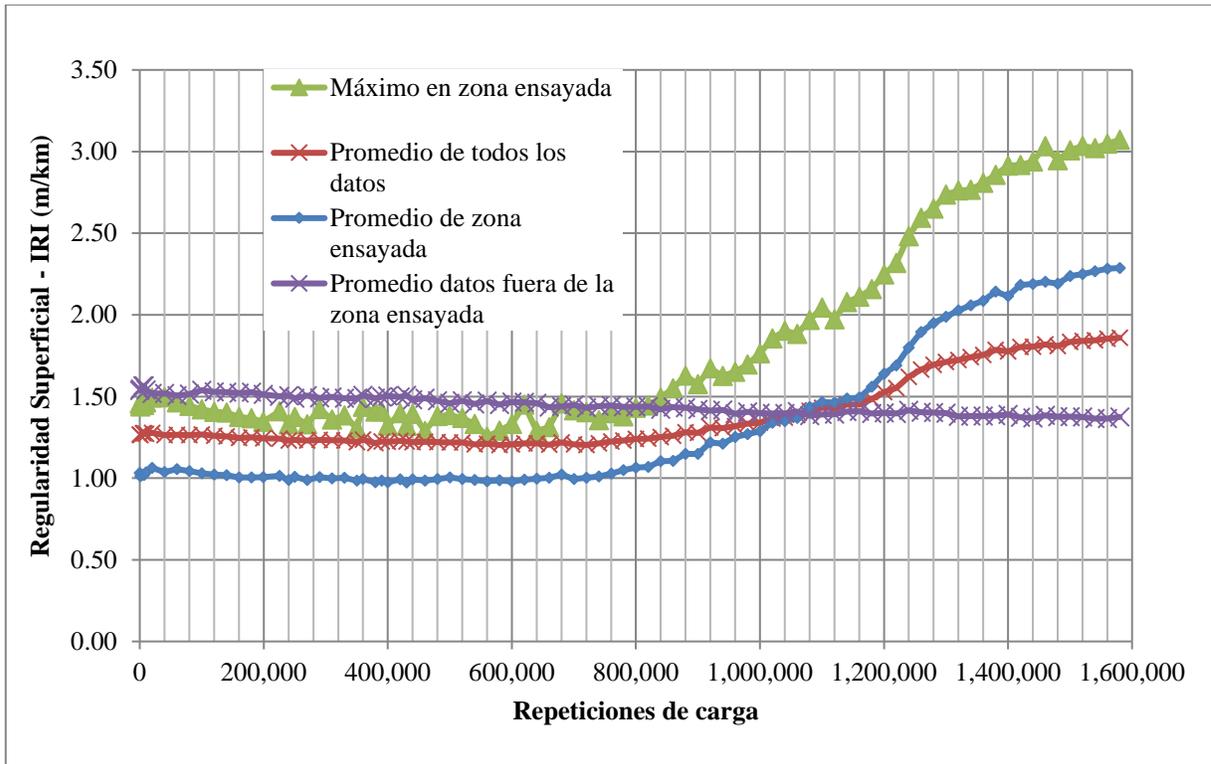


Figura 63. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 004.

A partir del tramo 007AC2H se incorporó humedad a las capas que componen los pavimentos ensayados, en términos de regularidad, cuando los ensayos incorporan humedad se pueden apreciar mecanismos de falla definidos por el movimiento de partículas, falla de algunas zonas de los tramos y en general un aumento de las irregularidades de la superficie.

El tramo 007AC2H está compuesto por base granular y una capa delgada de mezcla asfáltica, por lo que al incorporar agua a las capas inferiores se da un aumento en la magnitud de las deflexiones instantáneas, se aceleraron los procesos de falla, agrietamientos y bombeo de partículas finas. Esto produce que el índice de regularidad superficial (IRI) del tramo aumente rápidamente con pocas repeticiones de carga, como se puede apreciar en la Figura 64.

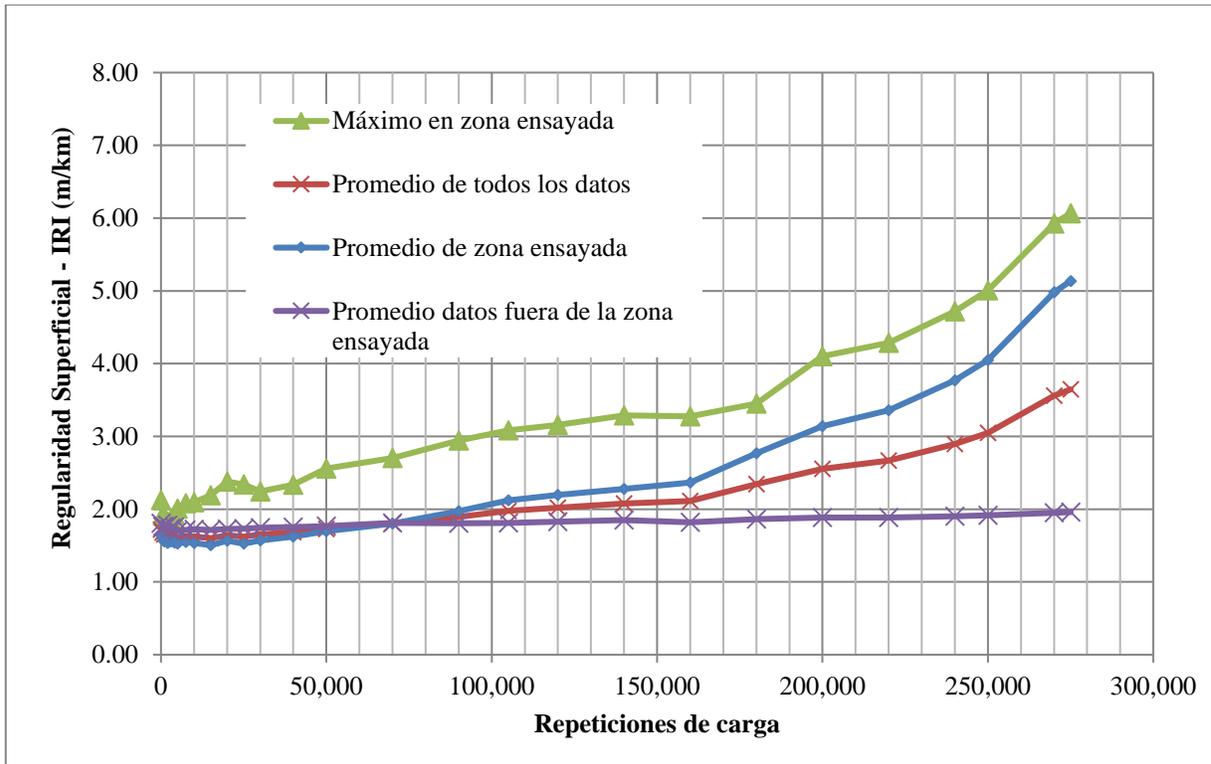


Figura 64. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 007AC2H.

Es muy importante destacar que la diferencia entre los tramos 007AC2H y el tramo 008AC1H es que el segundo tiene la base estabilizada con cemento. El tramo 008AC1H como se puede apreciar en la Figura 65 parte de una condición de regularidad de menor calidad, con valores entre 3 y 4; sin embargo, es capaz de mantener la condición ofrecida de forma estable, con una menor susceptibilidad al efecto del agua y las cargas.

Al momento de iniciarse el proceso de aceleración de la falla, cerca de las 250.000 repeticiones de carga, se puede determinar en la superficie que el agrietamiento se presenta en bloques, separados por grietas de menor tamaño y mediante las cuales las partículas finas de la subbase suben a la superficie como un proceso de alivio de presiones.

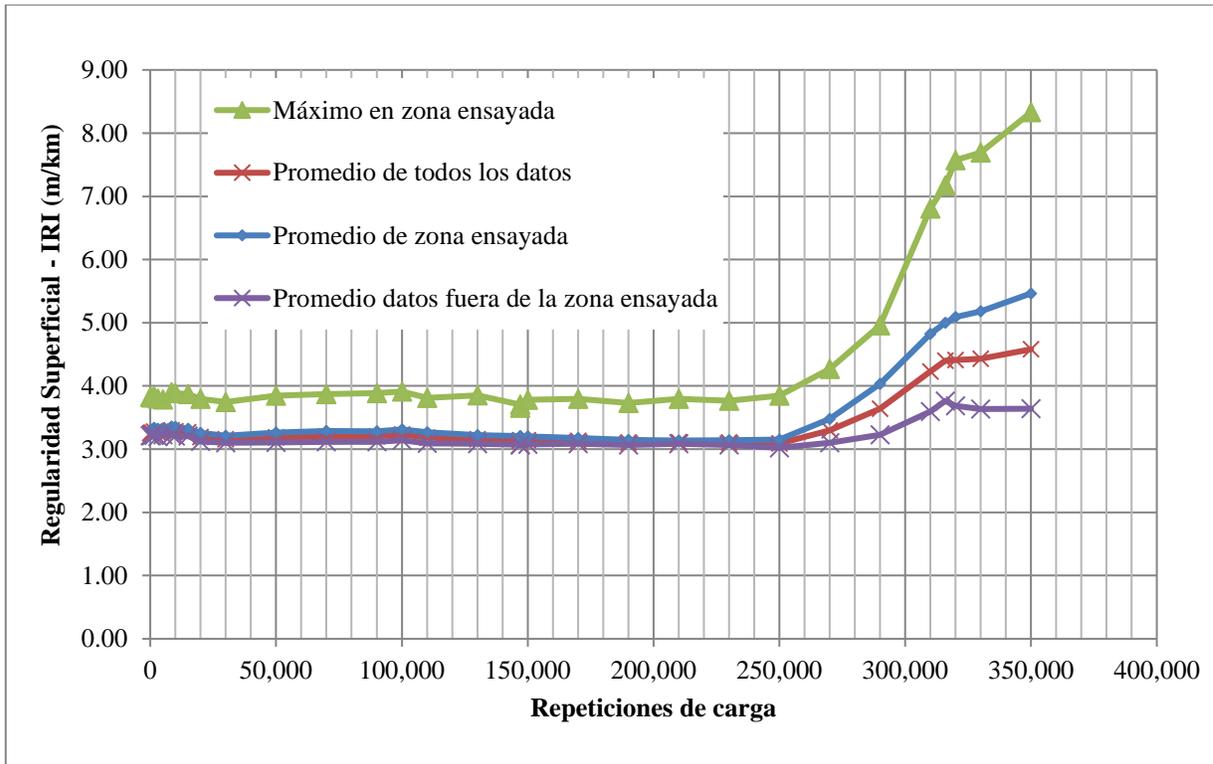


Figura 65. Evolución de la regularidad superficial según la cantidad de repeticiones de carga tramo 008.

La regularidad superficial en los diferentes tramos estuvo marcada por los procesos constructivos, materiales y otras condiciones que afectan la regularidad. Y donde los valores obtenidos de un tramo a otro varían dependiendo de la rigidez de las estructuras, de las condiciones de esfuerzo y falla de las diferentes capas que los componen, así como de las condiciones adicionales a las que fueron expuestas, siendo la principal condición el aumento de la humedad.



4.1.3. Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)

Este instrumento, descrito en la sección 3.7, permite medir con mucha precisión la reacción estructural ante el paso de la rueda mediante las deflexiones instantáneas que se producen. Es importante destacar que durante el proceso de ensayo de los diferentes tramos el procedimiento de medición ha variado, modificando la posición utilizada a fin de documentar la condición estructural a lo largo del tramo de ensayo, y no únicamente en los extremos.

Se han variado la cantidad de puntos medidos, así como la ubicación del instrumento respecto a las ruedas de ensayo, siempre se registra el cuenco con las deflexiones con gran detalle; así como la evolución de este conforme avanza el proceso de ensayo y el daño.

En esta etapa el análisis debe orientarse a las mediciones realizadas, por lo que los parámetros calculados directamente sobre los datos recolectados son más representativos de la evolución estructural de los tramos.

En los anexos D, F y E se presenta se presentan algunos gráficos que se encuentran pendientes de análisis, pues se han generado de forma reciente. Esto resumen la evolución estructural de los tramos, basados directamente en las mediciones de cuenco de deflexión y el cálculo de algunos parámetros clásicos de para analizar deflexión. Cada uno de los parámetros será explicado posteriormente, junto con la interpretación de los gráficos.

Se han podido apreciar discontinuidades en los cuencos, producto de grietas, deformaciones, variaciones en las cargas y otros factores. Estos factores alteran de forma sensible los resultados que se pueden obtener por medio del retro-cálculo, por lo que se realiza una revisión continua de los valores obtenidos.

Aún el reporte de la deflexión máxima debe ser analizada con la consideración de que la ubicación del instrumento de medición llega a estar en puntos del cuenco de deflexión diferentes, particularmente cuando la medición es máxima medio de las llantas, y cuando se ubica a un lado la deflexión es una fracción (aún por determinar) de esta condición máxima.



4.1.4. Termocuplas

Son sensores de temperatura, instalados a diferentes profundidades en los tramos y que permiten relacionar la relación de la temperatura en la deformación de la superficie. Están fabricados con 2 filamentos, uno de níquel y el otro de cromo y registran temperaturas entre -180 y 1300 °C. Funcionan por medio de voltajes generados por el aumento de temperatura.

En la Figura 66 se muestran los valores de temperatura recolectados al momento de la toma de datos de los sensores para el tramo 001. La temperatura ambiente (TC0) varió entre 20.3 a 25.3. °C. Por otro lado la temperatura medida a nivel de superficie del pavimento (TC1) se mantuvo en el rango de 21.2a 24.8 °C, mientras que la temperatura a la profundidad media de la carpeta asfáltica (TC2) se registró entre 21.7 a 24.9 °C. Adicionalmente, la temperatura medida a nivel de interface CA/Base (TC3) se encontró entre 21.5 y 24.7 °C; y a 5 cm dentro de la base (TC4) entre 21.8 a 25.1 °C.

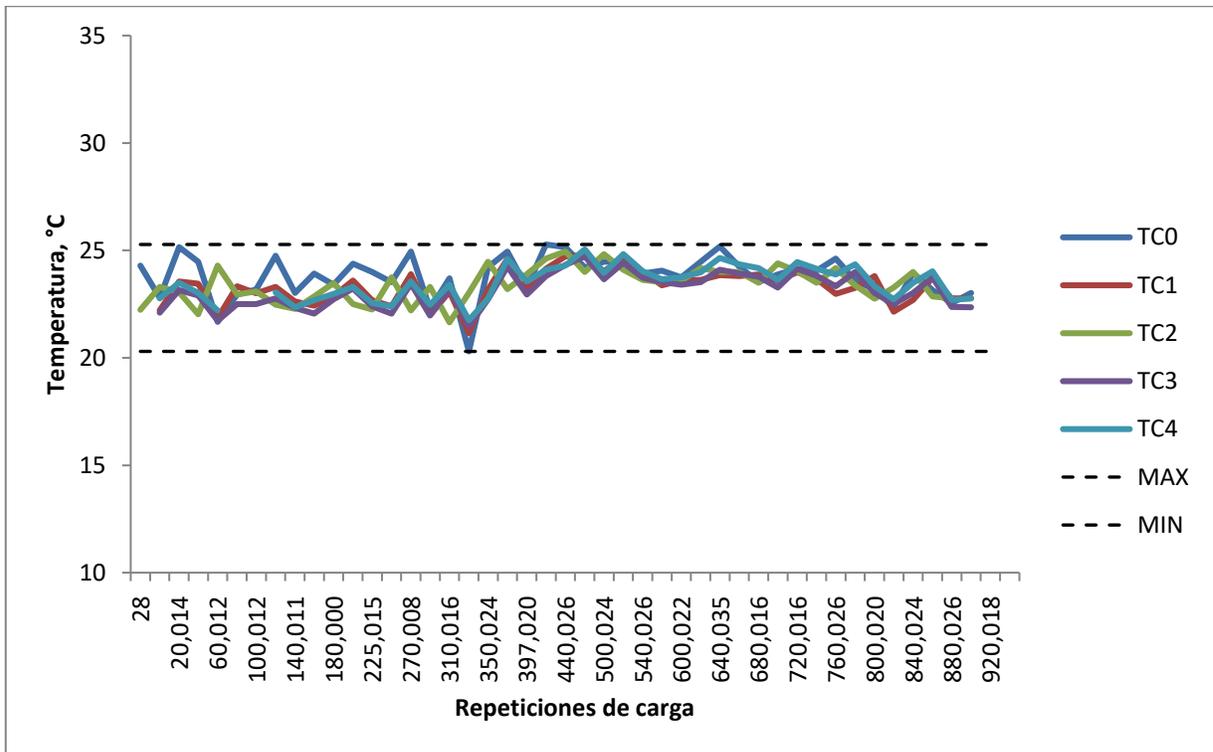


Figura 66. Temperatura de la estructura de pavimento en tramo 001.

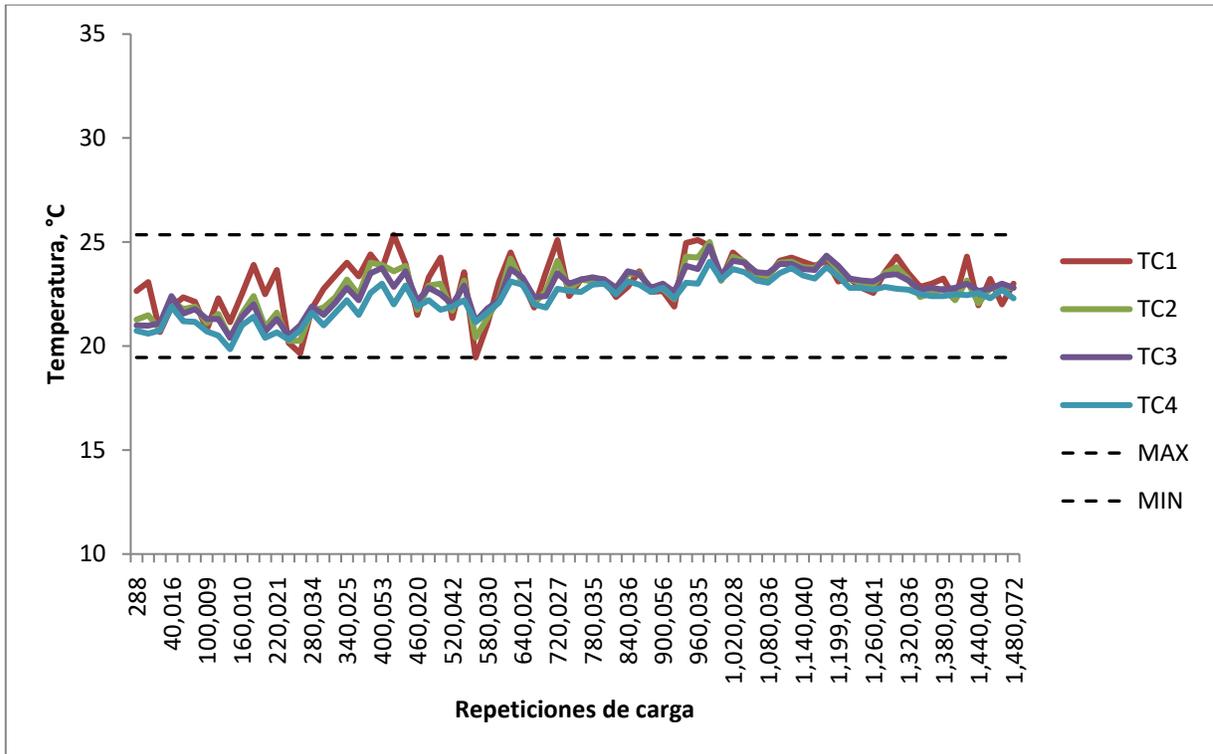


Figura 67. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 002.

En la Figura 67 se muestran los valores de temperatura recolectados al momento de la toma de datos de los sensores. La temperatura ambiente (TC0) varió entre 19.9 a 26.5 °C. Por otro lado la temperatura medida a nivel de superficie del pavimento (TC1) se mantuvo en el rango de 19.5 a 25.3 °C, mientras que la temperatura a la profundidad media de la carpeta asfáltica (TC2) se registró entre 20.0 a 24.6 °C. Adicionalmente, la temperatura medida a nivel de interface CA/Base (TC3) se encontró entre 19.7 y 23.9 °C; y a 5 cm dentro de la base (TC4) entre 20.2 a 24.0 °C.

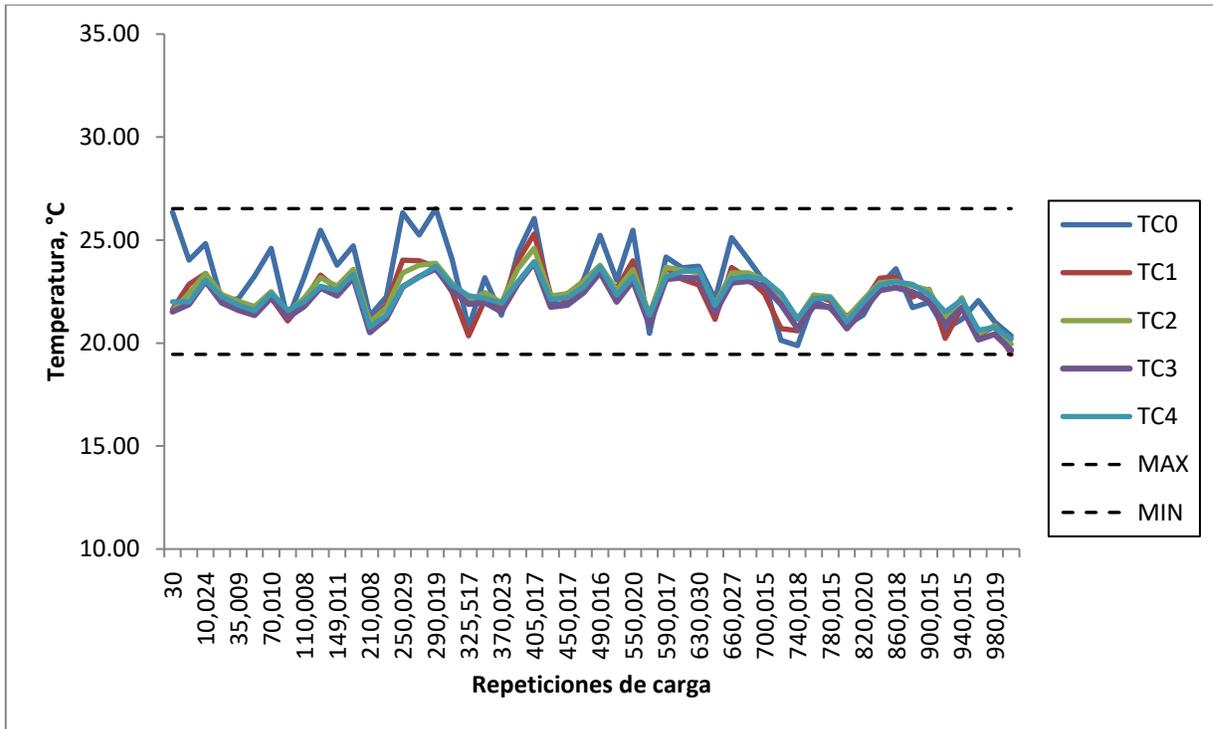


Figura 68. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 003.

En la Figura 68 se muestran los valores de temperatura recolectados para el tramo 003 al momento de la toma de datos de los sensores. La temperatura ambiente (TC0) varió entre 19.5 a 26.4 °C. Por otro lado la temperatura medida a nivel de superficie del pavimento (TC1) se mantuvo en el rango de 20.2 a 25.4 °C, mientras que la temperatura a la profundidad media de la carpeta asfáltica (TC2) se registró entre 20.7 a 25.1 °C. Adicionalmente, la temperatura medida a nivel de interface CA/Base (TC3) se encontró entre 17.9 y 24.6 °C; y a 5 cm dentro de la base (TC4) no se tomaron datos de temperatura.

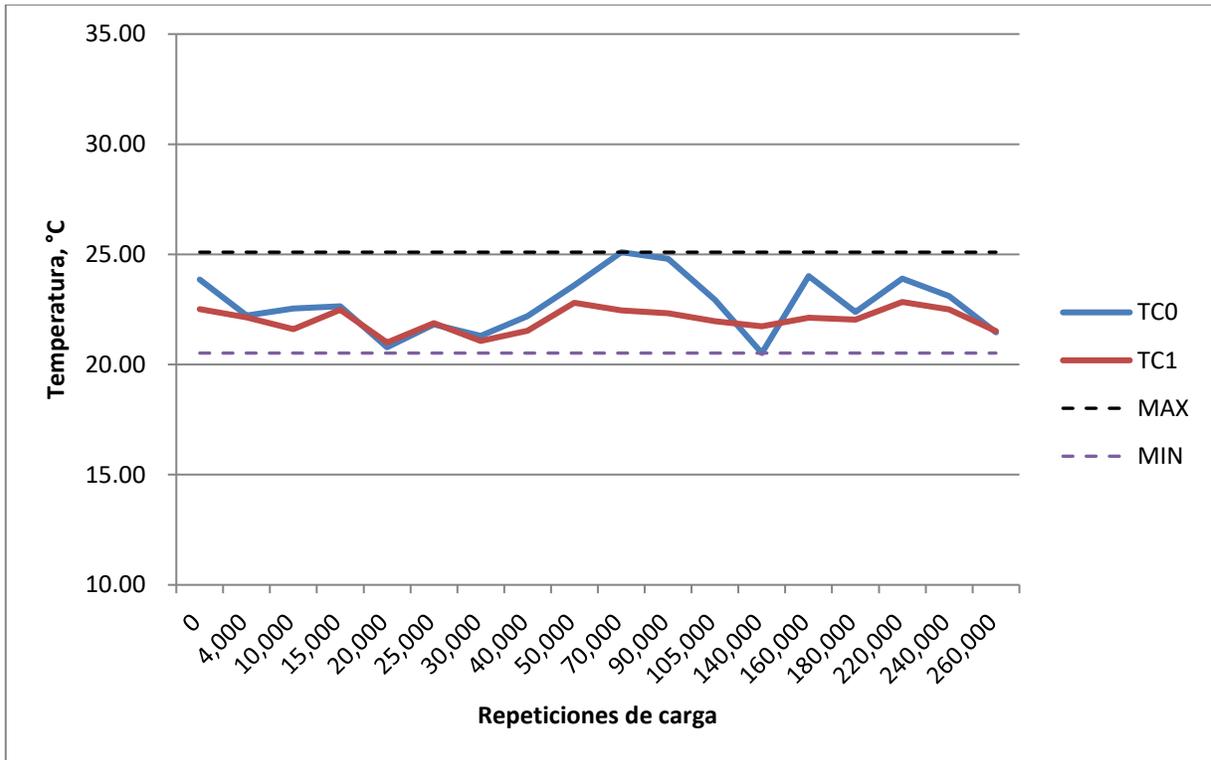


Figura 69. Temperatura de la estructura de pavimento tramo 007.

En la Figura 69 se muestran los valores de temperatura recolectados para el tramo 007 al momento de la toma de datos de los sensores. La temperatura ambiente (TC0) varió entre 21.1 a 24.8 °C. Por otro lado, la temperatura medida a nivel de superficie del pavimento (TC1) se mantuvo en el rango de 20.9 a 25.4 °C, mientras que la temperatura para las otras posiciones no fue tomada.



4.1.5. Dynatest SOPT

Los transductores para presión en suelos (SOPT por sus siglas en inglés) son usados para la medición de presión (esfuerzos) en materiales no ligados como gravas, arenas o arcillas. Los sensores de presión son colocados para determinar en qué medida el pavimento distribuye y reduce los esfuerzos actuando sobre la capa de sub-rasante.

La Figura 70 muestra el incremento de carga realizado en función del número de repeticiones aplicadas y muestra el efecto de este incremento sobre el esfuerzo a compresión medido a nivel de sub-rasante. Cada punto de presión mostrado corresponde al esfuerzo máximo obtenido luego de procesar los datos como se mencionó anteriormente. Se procedió a realizar los incrementos de carga basados en este esfuerzo medido, esencialmente cuando alcanzaba un estado de mínimo daño o estabilización con el aumento en las repeticiones de carga.

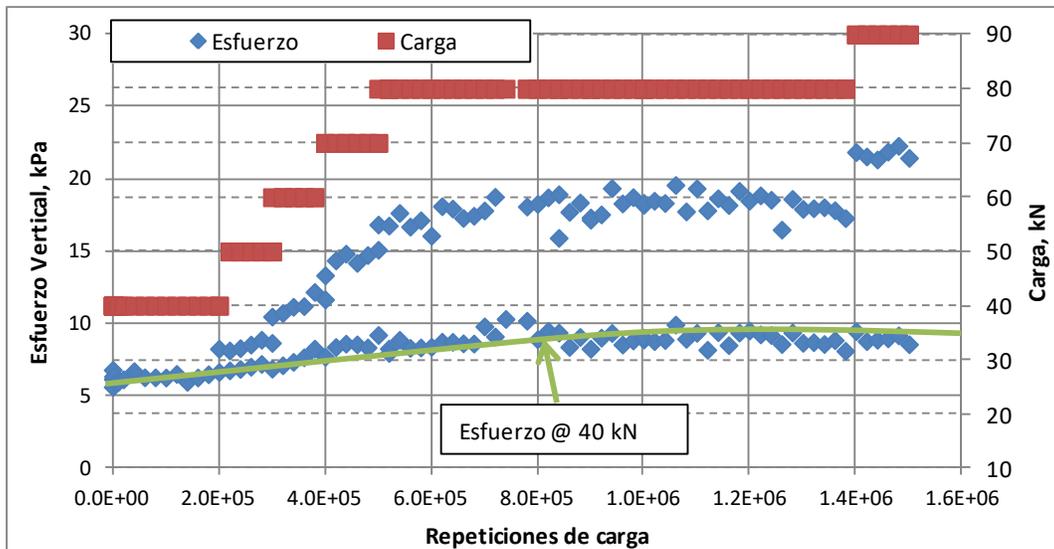


Figura 70. Carga Aplicada y Presión vertical medido a nivel de subrasante tramo 002.



4.1.6. Dynatest PAST

Son sensores tipo LVDT unidos a una estructura tipo H, permiten registrar la deformación a tensión que sufren las capas de mezcla asfáltica, pues el cuerpo en forma de H genera que los extremos queden atrapados en el material mientras el sensor en el centro de la estructura registra la deformación unitaria.

La estructura debe tener un módulo de rigidez similar al de la mezcla asfáltica, a fin de que las deformaciones entre el sensor y el material estudiado sean similares. En la Figura 71 se muestra el pulso completo que se genera cuando pasa una carga de 40kN sobre el sensor en el tramo 010AC3H al inicio del ensayo (repetición 1)



Figura 71. Pulso generado durante la captura de deformaciones unitarias en el tramo 010AC3H.

En dicha medición se alcanzó un valor de 250 microstrain, es de esperar que el valor aumente conforme avanza el ensayo, dicho registro será presentado en futuros informes y análisis.



4.2. Limitaciones

Algunas limitaciones que se han experimentado durante el proyecto han sido.

- Cambios en el personal del PaveLab ha causado un importante atraso al proyecto en términos generales, particularmente en cuanto al procesamiento de los datos.
- Las herramientas para procesar parte de la información generada se encuentran en desarrollo, y requieren tiempo para llegar a la mejor versión. Debido a esto existen al día de hoy datos que se han registrado, pero no han podido ser procesados.
- El equipo HVS es un equipo confiable en cuanto a su comportamiento y desempeño general, sin embargo, la naturaleza de los ensayos de funcionamiento continuó lo expone a diversas fallas de componentes, las cuales alteran el cronograma de los ensayos.
- Los horarios de trabajo están planteados de lunes a viernes, con lo cual se pierde la continuidad de los ensayos, con el fin de mejorar esta condición se realiza la programación de manera que los días sábado el ensayo continúa y se atiende de forma remota. Sin embargo, es recomendable que los ensayos se desarrollen de forma continua durante todos los días de la semana, y únicamente interrumpiendo para mantenimiento y toma de datos. Así como personal que brinde soporte directo durante las noches.



5. Calibración de modelos con datos de campo

Los modelos de desempeño deben pasar por un largo proceso de calibración, partiendo de datos de laboratorio que son fuente vital para analizar el comportamiento de los materiales. Los resultados que se obtienen en el PaveLab permitirán calibrar modelos de fatiga y deformación permanente para materiales de la región, sometidos a condiciones de carga y clima locales.

Estas condiciones permitirán mejorar la confiabilidad de las predicciones realizadas y es importante mencionar que los escenarios expuestos en este experimento son solo iniciales, para garantizar una adecuada evolución de los modelos generados se debe ampliar las condiciones del experimento a otros materiales, espesores y condiciones climáticas.

Sin embargo, a pesar de la gran validez de los resultados obtenidos en ensayos acelerados, no despreciarse que las condiciones en el PaveLab son muy agresivas en cuando al esquema de aplicación de carga, si se considera que se aplica en unos pocos meses el daño esperado en muchos años. Es por este motivo que de forma paralela se ha iniciado con el proyecto LTPP-CR, el cual a través de mediciones y mediante un monitoreo periódico de condiciones reales en campo se espera validar y complementar los resultados obtenidos en el PaveLab junto al HVS.



6. Actualización del cronograma

En la siguiente tabla se muestra el cronograma general del proyecto actualizado a la fecha. Algunas de las tareas se encuentran en ejecución continua y otras como el análisis forense de la primera pista del paveLab se espera inicie en el presente año.

Tabla 11. Cronograma del proyecto actualizado.

| | FECHA INICIAL | FECHA FINAL |
|--|---------------|-------------|
| Elaboración de la propuesta | 05/01/2015 | 28/02/2015 |
| Búsqueda y análisis de la literatura existente relacionada con ensayos a escala natural y monitoreo de tramos de pavimentos. | 05/01/2015 | 31/05/2018 |
| Construcción de tramos de prueba | 15/02/2015 | 28/02/2015 |
| Implementación de ensayos acelerados (Primer tramo experimental) | 15/03/2013 | 30/08/2013 |
| Ensayos de laboratorio de materiales | 15/03/2015 | 15/03/2016 |
| Ensayos a escala natural (tramos restantes) | 10/09/2013 | 10/12/2018 |
| Modelación y calibración de modelos de desempeño | 15/03/2016 | 10/12/2019 |
| Adaptabilidad y calibración de modelos con datos de campo | 15/03/2018 | 15/05/2021 |
| Informe forense de la primera pista del PaveLab | 01/06/2018 | 10/12/2019 |
| Trasferencia y evaluación de resultados | 10/01/2020 | 10/12/2022 |



7. Referencias bibliográficas

Aguiar-Moya, J.P., Torres-Linares, P., Camacho-Garita, E., Leiva-Villacorta, F., and Loría-Salazar, L.G. Development of IRI Models Based on APT Data. The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability, pp 799-813. 2016.

AsphaltInstitute, 2001. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente (MS-22). Kentucky, U.S.A.

Brown, S.F. "State-of-the-Art Report on Field Instrumentation for Pavement Experiments." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 640, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1977, pp. 13-28.

Caicedo, B., Coronado, O., Fleureau, J.M., Gomes, A. Resilient Behaviour of non Standard Unbound Granular Materials. Road Materials And Pavement Design, Vol. 10 , Issue 2, pp. 287-312. 2009.

Chandra, D., Chua, K.M., and Lytton, R.L. Effects of temperature and moisture on the load response of granular base course material in thin pavements. Transportation Research Record 1252, pp. 33–41. 1989.

Ekblad, J., and Isacson, U. Influence of water and mica content on resilient properties of coarse granular materials. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 9, pp. 215–27. 2008.

Heavy Vehicle Simulator. Monitoring of test sections and instrumentation. Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>

Hugo, F., Epps Martin, A.L. Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. NCHRP Synthesis 325. Washington, D.C. 2004.

Hussain, J., Wilson, D.J., Henning, T., and Alabaster, D. What happens when it rains? Performance of unbound flexible pavements in accelerated pavement testing. Road and Transport Research Vol. 20, Issue 4, pp. 3-15. 2011.

Huurman, R., and Molenaar, A.A.A. Permanent deformation in flexible pavements with unbound base courses. Transportation Research Record 1952, pp. 31–8. 2006.



Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J.P., Loría-Salazar, L.G. Accelerated Pavement Testing First Results at the LanammeUCR APT Facility. Transportation Research Board 94th Annual Meeting Proceedings. Washington, D.C. 2015.

Salour, F., Erlingsson, S., and Zapata, C.E. Modelling resilient modulus seasonal variation of silty sand subgrade soils with matric suction control. Canadian Geotechnical Journal 51, pp. 1413-1422. 2014.

Theyse, H.L., Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method, South African Transport Conference, July 2000.

Timm, D.H., A.L. Priest, and T.V. McEwen. "Design and Instrumentation of the Structural Pavement Experiment at the NCAT Test Track." NCAT Report 04-01. April 2004.

Toros, U., and Hiltunen, D. Effects of moisture and time on stiffness of unbound aggregate base coarse materials. Transportation Research Record 2059, pp. 41–51. 2008.

Ullidtz, P. Pavement Analysis, Development in Civil Engineering, Vol.19, Amsterdam, the Netherlands. 1987.

Zapata, C.E., Perera, Y.Y., and Houston, W.N. Matric suction prediction model in new AASHTO mechanistic-empirical pavement design guide. Transportation Research Record 2101, pp. 53–62. 2009.

Aguiar-Moya, J.P, Corrales, J.P, Elizondo, F, Loría-Salazar, L.G. PaveLab and heavy vehicle simulator implementation at the National Laboratory of Materials and Testing Models of the University of Costa Rica. Advances in Pavement Design through Full-scale Accelerated Pavement Testing, pp. 25-32. 2012



ANEXO A

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
Unidad de Gestión de Proyectos
INFORME PARCIAL

1. Información básica:

| | | | |
|--|--|-----------------|----|
| Código: | B5A43 | | |
| Nombre del proyecto, actividad o programa: | Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural | | |
| Programa de adscripción: | Ley 8114 Impuesto a combustibles | | |
| Unidad base | LanammeUCR | Unidad de apoyo | NA |
| Período vigencia: | Del 05 de enero de 2015 al 01 de diciembre de 2019 | | |
| Fecha de presentación: | Noviembre 2017 | | |

2. Descripción general:

Resumen ejecutivo (entre 200 y 500 palabras), incluya objetivo, metas, método y resultados esperados:

Este proyecto busca desarrollar modelos de transferencia para convertir la respuesta estructural del pavimento en medidas de daño o desempeño, para dicho propósito se ha elaborado un esquema experimental que combina ensayos de laboratorio, caracterización avanzada de materiales, un ensayo acelerado de pavimento (APT) con 8 secciones de prueba, donde se utiliza el simulador de vehículos pesado HVS y monitoreo de secciones reales de carretera (LTPP).

El programa APT de Costa Rica busca reproducir el modelo desarrollado exitosamente por países como los Estados Unidos y Canadá. El proyecto pretende profundizar en el análisis y conocimiento del comportamiento de los pavimentos construidos en Costa Rica, mediante ensayos a escala real y complementado con un seguimiento en campo de secciones reales. Para esto se busca abarcar los diferentes tipos de pavimentos, espesores y materiales.

Dentro de los parámetros a analizar se incluyen: Cantidad de repeticiones de carga, deformación, cuenco de deflexiones, temperatura, humedad en capas no ligadas e IRI.

Actualmente se cuenta con 9 secciones finalizadas dentro del PaveLab, con información analizada preliminarmente en 8 tramos, el noveno está bajo análisis y el 10 se encuentra en ejecución con 480 000 repeticiones de carga.

Finalmente, con la información obtenida, tanto de los parámetros de diseño de los tramos como de los indicadores de desempeño, se realizarán modelos matemáticos, que a la larga servirán de insumo para poder realizar una mejor gestión y un mejor diseño de nuestras carreteras.

3. Desarrollo y ejecución (qué se hizo y cómo):

| | | |
|--------------------------|---------------|------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 96 de 125 |
|--------------------------|---------------|------------------|



| Objetivos específicos y metas | % de logro | Actividades desarrolladas | Dificultades y formas de resolverlas |
|---|------------|---|--------------------------------------|
| <p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 01</p> <p>Determinar la metodología de ensayo a seguir para futuras aplicaciones del HVS.</p> <p>METAS:</p> <p>1) Establecer los pasos y la metodología de ensayo acelerado de tramos a escala natural.</p> <p><i>Indicador:</i> Reproducibilidad de la metodología</p> | 100% | Búsqueda y análisis de la literatura existente relacionada con ensayos a escala natural y monitoreo de tramos de pavimentos | NA |
| <p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 02</p> <p>Comparar y verificar modelos mecánicos por medio de la recopilación y análisis de respuestas del pavimento.</p> <p>METAS:</p> <p>1) Verificar modelos previamente desarrollados para otras guías de diseño y valorar su aplicabilidad con los resultados obtenidos.</p> <p><i>Indicador:</i> Evaluación estadística de la correlación entre resultados de ensayos acelerados y estimaciones de los modelos.</p> | 80% | Modelación de las estructuras de pavimento se realizará con programas mecanicistas que permitan calcular respuestas críticas relacionadas directamente con deterioros típicos de pavimentos | |
| <p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 03</p> <p>Realizar la caracterización física mecánica de materiales y comparación con resultados de ensayos de laboratorio.</p> <p>METAS:</p> <p>1) Determinar propiedades de los materiales requeridas para diseño de pavimentos y realizar ensayos de desempeño de los materiales.</p> | 75% | <p>Muestreo de material de suelo, material granular, mezcla asfáltica y ligante asfáltico durante el proceso de construcción; para realizar ensayos de caracterización y desempeño.</p> <p>Para los tramos que se encuentran en servicio se</p> | |



| Objetivos específicos y metas | % de logro | Actividades desarrolladas | Dificultades y formas de resolverlas |
|---|------------|--|--------------------------------------|
| <p><i>Indicador:</i> Tabla de resumen con los resultados obtenidos y comparación con las especificaciones.</p> <p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 04 Desarrollar modelos de transferencia para convertir la respuesta estructural del pavimento en medidas de daño o desempeño.</p> <p>METAS: 1) Elaborar tramos de prueba y monitorear su desempeño.</p> <p>Indicador: Mejora del comportamiento físico y mecánico inicial del tramo sostenido en el tiempo.</p> | 50% | <p>realizaron sondeos exploratorios, para recuperar material de cada uno de los tramos seleccionados.</p> <p>Instrumentación en tramo de prueba para poder realizar todas las mediciones de respuestas deseadas, así como la recolección de la información generada por el HVS.</p> <p>Medición con equipo externo: deformaciones permanentes, regularidad superficial y deflexiones instantáneas de los diferentes tramos experimentales.</p> <p>Recolección de datos provenientes de la instrumentación, la cual es realizada de forma escalonada en función de la cantidad de repeticiones.</p> | |

*Agregar las celdas que sean necesarias



4. Resultados globales (utilice la cantidad de palabras necesarias):

| |
|---|
| Resultados principales: Los resultados principales de esta investigación son: Desarrollar modelos de desempeño de los tramos de pavimento analizados |
| Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda: El impacto de este proyecto se espera que sea en el campo de la infraestructura vial del país para provocar que se mejore el diseño y gestión de los pavimentos. |
| Beneficios para la unidad académica y la Universidad de Costa Rica: Los beneficios son: Acción social y Transferencia de tecnología. |
| Interrogantes y nuevas investigaciones: Producto de los datos obtenidos con este proyecto existe mucha apertura para desarrollar investigaciones paralelas en el ámbito de la gestión de pavimentos. |
| Actividades pendientes: Finalizar en el ensayo en el tramo 010AC3H Realizar un análisis forense de los materiales constituyentes de cada tramo ensayado. Transmitir los hallazgos y resultados de los experimentos a la comunidad científica y al público en general a través de publicaciones, reportes técnicos, foros de investigación y conferencias relacionadas con el tema de transportes e infraestructura vial a nivel nacional como internacional. |

5. Producción académica (adjuntar anexos):

| |
|--|
| Referencias de los artículos u otros productos que se proyectan: NA |
| Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas: NA |
| Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje: NA |
| Otros productos: NA |

6. Trabajos de graduación y participación estudiantil:

| Asistentes | Labores ejecutadas |
|------------|--------------------|
| NA | NA |

*Agregar las celdas que sean necesarias

| Título de las tesis involucradas en el proyecto | Nombre de los/las estudiantes | Grado |
|---|-------------------------------|------------------|
| NA | NA | NA |
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 99 de 125 |



*Agregar las celdas que sean necesarias

7. Comentarios generales:

Ninguno

8. Informe financiero (adjuntar informe respectivo):

Comentarios:
Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria

9. Aspectos éticos (adjuntar la “Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio” del CEC):

Comentarios:
Ninguno

10. Autorización para incorporar el informe final ejecutivo en los repositorios de la UCR.

- (x) SI () NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales el anterior informe.
- (x) SI () NO Autorizo a la Vicerrectoría de Investigación para incluir en los repositorios institucionales los productos académicos adjuntos al informe.

20 de marzo de 2018

Fecha

Firma

Investigador(a) principal

20-03-2018

Ing. Edgar Camacho Garita

Ing. Eliécer Arias Barrantes



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

ANEXO B



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN

LanammeUCR

COMITÉ ÉTICO CIENTIFICO

Teléfonos:(506) 2511-5006 Telefax: (506) 224-9367

Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio*

Por favor complete TODAS las secciones ya sea en el caso de revisión continua o cierre del estudio

Proyecto #: B5A43

Fecha de expiración de la vigencia de la revisión inicial otorgada por el CEC: 01 de diciembre de 2019

Investigador(a) principal: Ing. Edgar Camacho Garita, Ing. Eliécer Arias Barrantes.

Título de la investigación: Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

1. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

Marque la opción que describe mejor el estado actual de esta investigación:

- A la fecha no se ha enrolado ningún participante.
- Continúa el reclutamiento de participantes nuevos / revisión de registros / recolección de muestras.
- Se acabó el reclutamiento, pero los participantes permanecen recibiendo intervenciones relacionadas con la investigación.
- Ya no se recluta más y los participantes completaron las intervenciones relacionadas con la investigación. El estudio permanece activo solamente para darles seguimiento a largo plazo.
- El reclutamiento se ha cerrado permanentemente, los participantes han completado todas las intervenciones relacionadas con el estudio y se ha completado el seguimiento a largo plazo. Las actividades de investigación remanentes se limitan a análisis de datos que puede requerir contacto con información



sobre la que usted normalmente no tiene acceso, tal como registros médicos, académicos, especímenes de laboratorio, patología, etc.

Estudio cerrado. El reclutamiento y el seguimiento se han completado y no se anticipa un contacto futuro con los participantes / registros / especímenes, para obtener información a la que usted normalmente no tiene acceso.

2. CANTIDAD DE PARTICIPANTES

Complete con la información correspondiente:

A. Máximo número de participantes, a quienes se les va a solicitar consentimiento para participar y que el CEC aprobó previamente, por toda la vigencia de este estudio:

Edgar Camacho Garita, investigadora principal, sin carga académica
Eliécer Arias Barrantes, investigadora principal, sin carga académica
José Pablo Aguiar Moya, investigador asociado, sin carga académica
Luis Guillermo Loría Salazar, investigador asociado, sin carga académica

B. Número total de participantes que han consentido a la fecha:

3

C. Número total de participantes que luego de firmar el consentimiento, se han retirado por cuenta propia o han sido retirados por no satisfacer criterios de inclusión, a la fecha:

1

D. Total que ha consentido desde la última revisión continua:

3

E. Total que ha consentido pero se ha retirado por cuenta propia o han sido retirados por no satisfacer criterios de inclusión, desde la última revisión continua:

Ninguna

3. RESUMEN DEL AVANCE DENTRO DEL ÚLTIMO PERIODO DE APROBACIÓN DEL CEC

Conteste todas las preguntas, para las que no aplican a su estudio indique NO.

A. SI NO ¿El estudio está en la fase de reclutamiento de participantes?

B. SI NO ¿El estudio ha estado reclutando participantes? *Si la respuesta es NO, pero la de A. fue SI, incluya un resumen describiendo las razones por las cuales no se ha producido.*

C. SI NO ¿Alguno de los participantes se ha retirado del estudio, ha sido sacado o se ha perdido? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo describiendo las razones para esto.*

| | | |
|--------------------------|---------------|-------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 102 de 125 |
|--------------------------|---------------|-------------------|



El Ingeniero Fabricio Leiva Villacorta dejó de laborar para la institución desde Agosto de 2016 debido a que el mismo presentó su renuncia y se retiró de la institución.

- D. SI NO ¿Algún participante se ha quejado de la investigación? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo de las quejas recibidas.*
- E. SI NO ¿Se ha publicado literatura científica relevante para esta investigación, durante este periodo, que pueda alterar las apreciaciones iniciales de riesgos o de beneficios asociados a este estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de esta publicación y un resumen narrativo.*
- F. SI NO ¿Ha habido hallazgos preliminares, incluyendo informes interinos, manuscritos, resúmenes, publicaciones y hallazgos clínicos, que puedan tener impacto sobre el estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de estos informes y un resumen narrativo. Anote cualquier evento o descubrimiento que pueda alterar la razón riesgo/beneficio del estudio, incluyendo informes favorables.*
- G. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio como los que se envían a la Vicerrectoría de Investigación, a las agencias financiadoras y otros? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*
- H. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio por parte de otros investigadores participantes, fuera de la UCR, para enviar a sus respectivas instituciones (estudios multicéntricos y otros)? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*
- I. SI NO ¿Se ha descubierto alguna otra información relevante a este estudio, sobre todo relacionada con los posibles riesgos y beneficios asociados al mismo? *En caso afirmativo, adjunte copias de esta información y un resumen narrativo.*
- J. SI NO ¿Se ha detectado algún problema no anticipado, relacionado con riesgos para los participantes u otras personas, en la UCR o algún otro sitio donde se desarrolle el estudio? *En caso afirmativo, enumere y describa estos problemas en un resumen narrativo.*
- K. SI NO ¿Se han reportado al CEC todos los problemas no anticipados que conllevan riesgo para los participantes u otras personas, que requieren ser informados con prontitud? *Si la respuesta es negativa, envíe al CEC la información requerida antes de que transcurran 5 días hábiles. Indique si estos eventos o problemas cambiaron la razón riesgo/beneficio o requirieron cambios en el documento de consentimiento informado.*
- L. SI NO ¿El perfil de reacciones adversas experimentado por los participantes difiere del esperado? (reacción adversa/evento adverso significa cualquier acontecimiento desfavorable e indeseado, tanto serio como no serio, esperado o inesperado, relacionado o no con el estudio). *Si la respuesta es afirmativa, adjunte un resumen narrativo describiendo las diferencias entre el perfil de reacciones adversas esperado y el encontrado.*



M. SI NO ¿Se ha asignado a un Comité Independiente de Monitorización de Datos la revisión periódica de los riesgos para los participantes? *Si la respuesta es afirmativa indique la frecuencia con que se realiza esta tarea y un resumen narrativo de sus informes.*

N. SI NO ¿Los participantes han experimentado algún beneficio derivado del estudio? *En caso afirmativo, adjunte un resumen narrativo describiendo estos beneficios.*

4. INFORMACIÓN SOBRE EL DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

SI NO ¿El CEC requiere el uso de un documento escrito de consentimiento informado para la ejecución de este estudio?

En caso afirmativo, adjunte una copia del documento aprobado y sellado que ha estado en uso Y otra copia idéntica y limpia para volver a sellar una vez aprobada la revisión continua, para ser usado durante el siguiente periodo de aprobación (excepto si ya concluyó el reclutamiento).

5. INFORMACIÓN SOBRE CONTACTOS

Investigador principal:

| | | | |
|-----------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| Nombre: | Apellido: | Cédula # | Unidad académica: |
| Edgar | Camacho Garita | 1-1172-0973 | LanammeUCR |
| Teléfono: | Celular: | Fax: | Email: |
| 25112793 | 88424930 | 25114440 | edgar.camachogarita@ucr.ac.cr |
| Nombre: | Apellido: | Cédula # | Unidad académica: |
| Eliécer | Arias Barrantes | 1-1308-0044 | LanammeUCR |
| Teléfono: | Celular: | Fax: | Email: |
| 25112524 | 87079199 | 25114440 | eliecer.arias@ucr.ac.cr |

Profesor(a) tutor(a) (complete si el investigador principal es estudiante):

| | | |
|--------------------------|---------------|-------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 104 de 125 |
|--------------------------|---------------|-------------------|



Persona encargada del contacto con el estudio (complete si el contacto primario no es alguno de los anteriores):

| | | | |
|-----------|-----------|----------|-------------------|
| Nombre: | Apellido: | Cédula # | Unidad académica: |
| NA | NA | NA | NA |
| Teléfono: | Celular: | Fax: | Email: |
| NA | NA | NA | NA |

6. DECLARACIÓN SOBRE CONFLICTOS DE INTERESES DEL INVESTIGADOR(A)

SI NO ¿Se ha desarrollado algún nuevo conflicto de intereses para el investigador(a) principal o para el personal clave del estudio? *En caso afirmativo adjunte una narración detallada de las características del conflicto cuando los investigadores, personal clave o cualquier otra persona responsable del diseño, ejecución o reporte del estudio tiene un interés financiero en, o actúa en representación de, una entidad externa cuyos intereses financieros, pareciera razonable pensar, que podrían afectarse por la investigación.*

7. DECLARACIÓN DEL INVESTIGADOR PRINCIPAL

Lea cuidadosamente esta declaración antes de firmar.

Adicionalmente a las respuestas anteriores, yo confirmo que el documento de consentimiento informado en uso, aprobado por el CEC, ha sido firmado, fechado y guardado en mis archivos para cada participante enrolado en este estudio y una copia del mismo fue entregada a la persona que lo firmó como participante (cuando el uso de documento de consentimiento informado fue requerido). Asimismo confirmo que no se han realizado cambios en los procedimientos del estudio o en el documento de consentimiento sin previa aprobación por parte del CEC.

Firma del investigador(a) principal

Fecha

20 de marzo de 2018

Ing. Edgar Camacho Garita

Ing. Eliécer Arias Barrantes

*Adaptado de las fórmulas #1101 y #1129 del IRB de la Universidad de Vanderbilt.

| | | |
|--------------------------|---------------|-------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 105 de 125 |
|--------------------------|---------------|-------------------|



ANEXO C

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN

Unidad de Gestión de Proyectos

Unidad de Gestión de Calidad

Tel.: 2511-5845

Formulario para la evaluación de informes parciales, finales y solicitud de ampliación de vigencia

Instrucciones

Los informes parciales, finales y las solicitudes de ampliación de vigencia se consideran parte de la evaluación de seguimiento; en ellos se revisan los resultados y productos alcanzados en un momento determinado, también las circunstancias y condiciones en que se produjeron. Las evaluaciones obtenidas son utilizadas como insumos para la asignación de recursos, tanto para la continuación de ejecución como para las propuestas nuevas por parte de los(as) investigadores(as) encargados(as).

Los informes y solicitudes contemplan cuatro componentes: (I) Información sustantiva de la propuesta, (II) una autoevaluación de parte del/los(as) investigadores(as), (III) una evaluación de los alcances y logros reportados y (IV) una evaluación del informe.

Los informes parciales y las solicitudes de ampliación de vigencia deben ser evaluados por las Comisiones de Investigación y/o los Consejos Científicos y aprobados por la Dirección de la Unidad Académica. En el caso de los informes finales de los proyectos de investigación, éstos deben ser evaluados adicionalmente por pares académicos, internos y/o externos a criterio de la Comisión de Investigación o del Consejo Científico. Por su parte, la Vicerrectoría de Investigación evalúa tanto los informes parciales como los finales, siendo la entidad que en última instancia aprueba éstos y las solicitudes de ampliación de vigencia.

| | | |
|--------------------------|---------------|-------------------|
| Informe LM-PI-UMP-074-R1 | Marzo de 2018 | Página 106 de 125 |
|--------------------------|---------------|-------------------|



Las dimensiones a evaluar son las siguientes:

Autoevaluación: Evaluación de las condiciones, Evaluación de los colaboradores, Evaluación del apoyo institucional recibido.

Evaluación de alcances y logros: Solidez de las evidencias y resultados reportados, Productividad, Impacto y Visibilidad potencial.

Evaluación del informe: Exhaustividad, Claridad, Rigurosidad.

A continuación encontrará cuatro apartados con los ítems correspondientes a cada una de las dimensiones a evaluar. Para cada ítem considere el informe y califíquelo luego en una escala de 1 a 100. En donde 0 indica una muy mala calificación y 100 una excelente calificación. En caso de que al evaluar considere que el componente evaluado en el ítem no debería ser aplicado a la propuesta, marque con una X en el espacio "No aplica".



TITULO DE LA PROPUESTA:

Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

I. Autoevaluación

Este apartado debe ser llenado por el/la/las investigador(a)(as).

| Criterio | Calificación | No aplica |
|--|--------------|-----------|
| 1. Evaluación de la ejecución de la propuesta en general. | 100 | |
| 2. Valoración del aporte de los colaboradores no académicos. | 100 | |
| 3. Evaluación del nivel de integración de los colaboradores académicos. | | X |
| 4. Evaluación del trabajo de los/las asistentes. | 100 | |
| 5. Valoración del apoyo administrativo de la unidad académica para esta propuesta. | 100 | |
| 6. Valoración del apoyo de la Vicerrectoría de Investigación para esta propuesta. | | X |
| 7. Valoración del aporte de otras instancias universitarias para esta propuesta. | | X |
| 8. Valoración el apoyo de FUNDEVI para esta propuesta. | | X |
| 9. Grado de satisfacción con los resultados y logros alcanzados. | 100 | |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica) | 100 | |



TITULO DE LA PROPUESTA:

Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

II. Evaluación de alcances y logros

| Criterio | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 10. Los logros y alcances académicos del trabajo realizado. | | |
| 11. Los productos académicos aportados. | | |
| 12. La visibilidad potencial de los resultados y productos. | | |
| 13. El impacto potencial de los resultados y productos en los procesos de enseñanza aprendizaje. | | |
| 14. El impacto potencial de los resultados y productos en la unidad académica de adscripción. | | |
| 15. El impacto potencial de los resultados y productos en el área disciplinar de adscripción del trabajo. | | |
| 16. El impacto potencial de los resultados y productos en el ámbito extraacadémico. | | |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica) | | |

III. Evaluación del informe

| Criterio | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 17. Grado de exhaustividad en la presentación de resultados y logros. | | |
| 18. Grado de claridad en la presentación de los resultados y logros. | | |
| 19. Grado de rigurosidad argumentativa en la presentación de resultados y logros. | | |
| 20. Evidencias aportadas para sustentar conclusiones y argumentos. | | |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica) | | |



IV. Evaluación de Vicerrectoría de Investigación

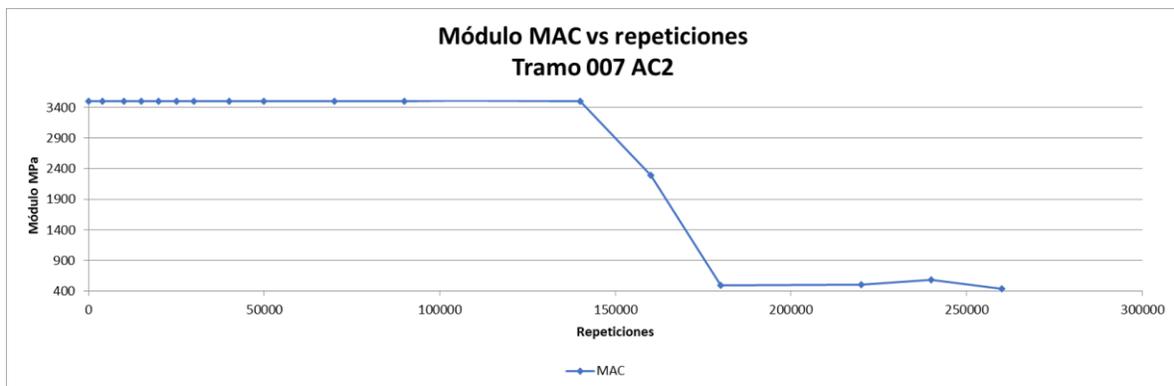
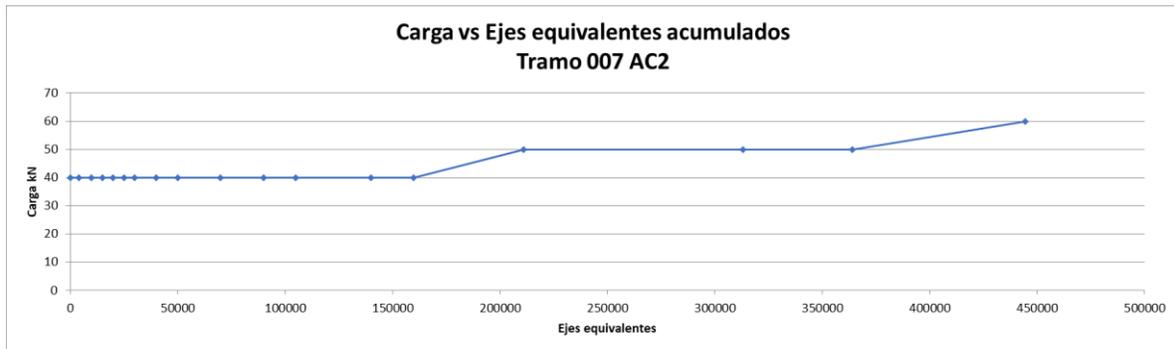
| Criterio | Calificación | No aplica |
|---|--------------|-----------|
| 21. Puntualidad en la presentación de informes. | | |
| 22. Ejecución y uso de los recursos financieros. | | |
| 23. Productos académicos logrados versus proyectados. | | |
| 24. Visibilidad de resultados y logros. | | |
| 25. Impacto alcanzado versus proyectado. | | |
| Calificación promedio (sin considerar los no aplica) | | |
| Calificación global | | |

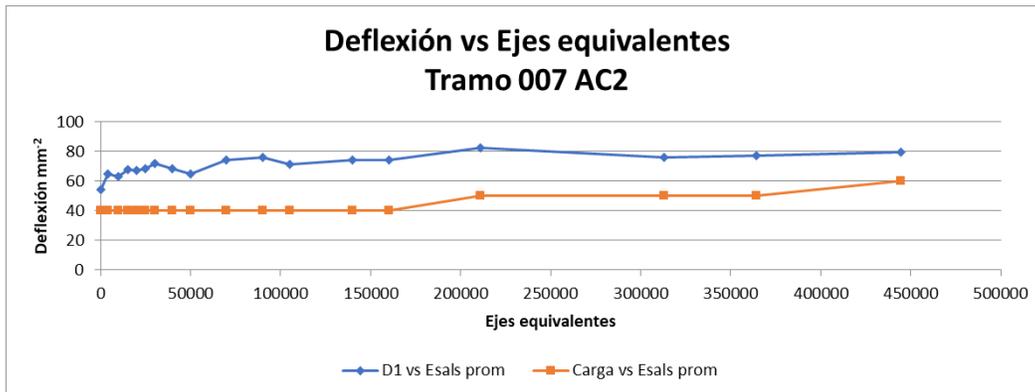
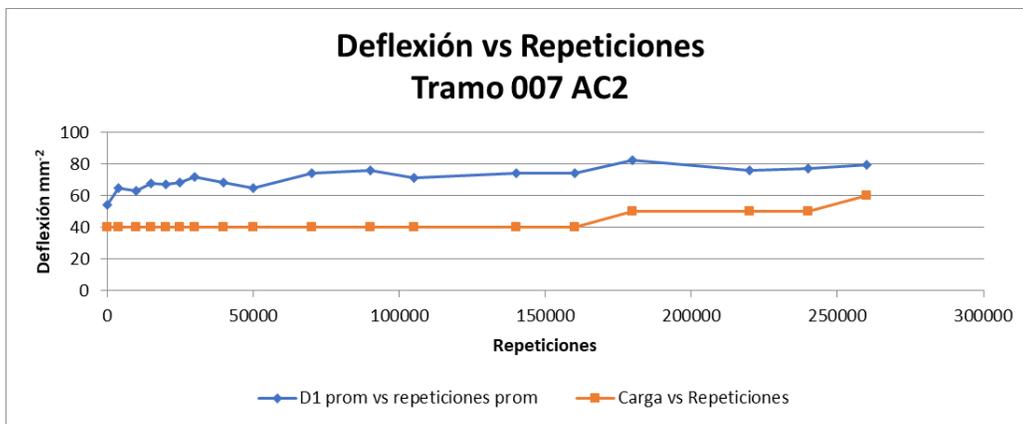
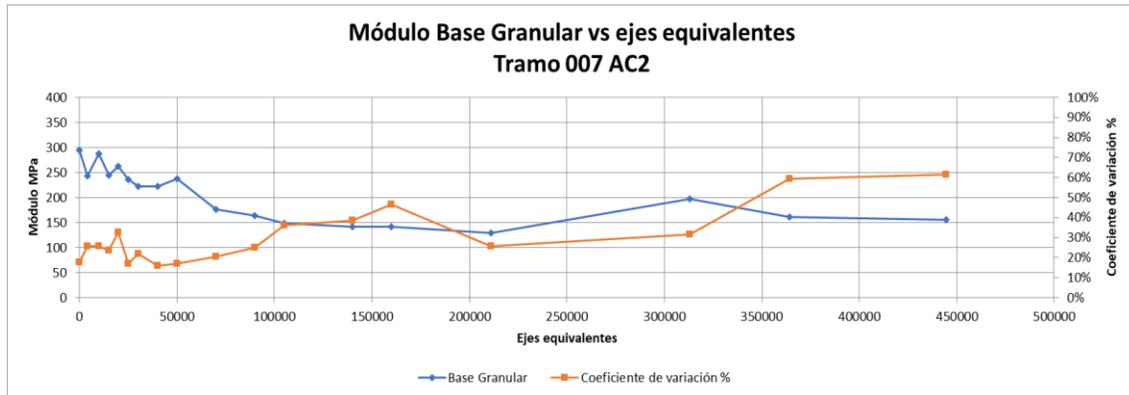
Versión 12-09-2012.

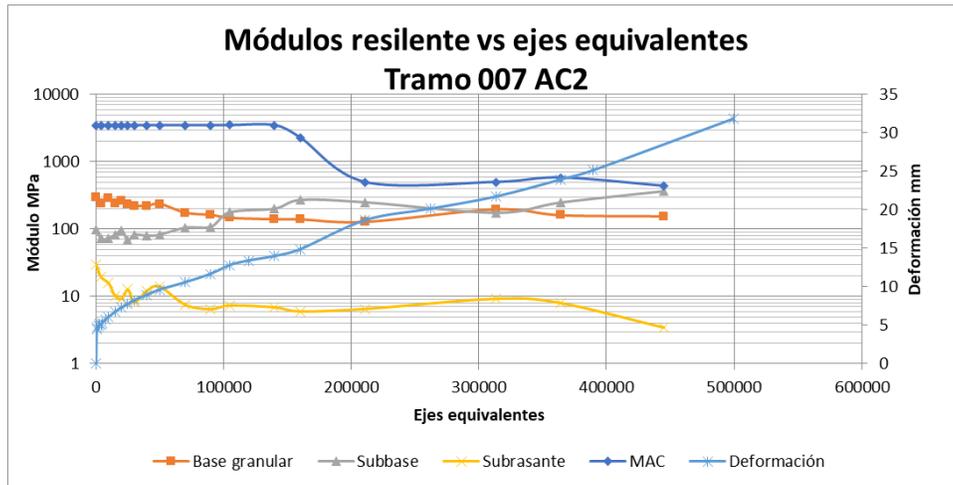


ANEXO D Tramo 007AC2

| Carga (kN) | Repeticiones promedio | ESALS promedio | D1 promedio (mm x 10-2) | MAC promedio (Mpa) | BE Promedio (Mpa) | SB promedio (Mpa) | SR promedio (Mpa) |
|------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 40 | 0 | 0 | 54 | 3499 | 294 | 99 | 30 |
| 40 | 4000 | 4000 | 65 | 3502 | 243 | 72 | 20 |
| 40 | 10000 | 10000 | 63 | 3503 | 287 | 73 | 16 |
| 40 | 15000 | 15000 | 68 | 3504 | 244 | 83 | 10 |
| 40 | 20000 | 20000 | 67 | 3502 | 262 | 95 | 9 |
| 40 | 25000 | 25000 | 69 | 3501 | 236 | 68 | 13 |
| 40 | 30000 | 30000 | 72 | 3501 | 222 | 82 | 8 |
| 40 | 40000 | 40000 | 69 | 3503 | 222 | 80 | 12 |
| 40 | 50000 | 50000 | 65 | 3504 | 237 | 83 | 14 |
| 40 | 70000 | 70000 | 74 | 3503 | 176 | 105 | 8 |
| 40 | 90000 | 90000 | 76 | 3505 | 163 | 108 | 7 |
| 40 | 105000 | 105000 | 71 | 3510 | 148 | 177 | 7 |
| 40 | 140000 | 140000 | 75 | 3505 | 141 | 200 | 7 |
| 40 | 160000 | 160000 | 75 | 2291 | 141 | 270 | 6 |
| 50 | 180000 | 211057 | 83 | 497 | 129 | 249 | 7 |
| 50 | 220000 | 313170 | 76 | 501 | 197 | 174 | 9 |
| 50 | 240000 | 364226 | 78 | 583 | 161 | 247 | 8 |
| 60 | 260000 | 444656 | 80 | 439 | 155 | 363 | 3 |



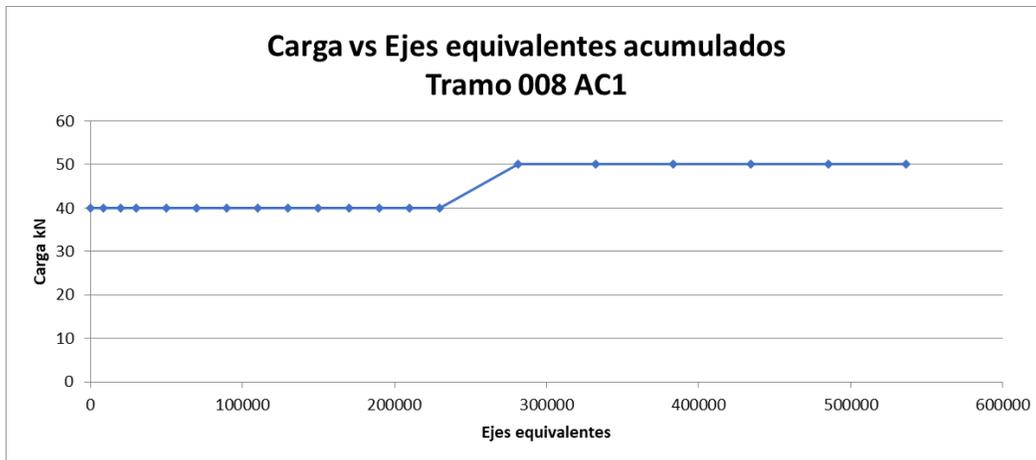


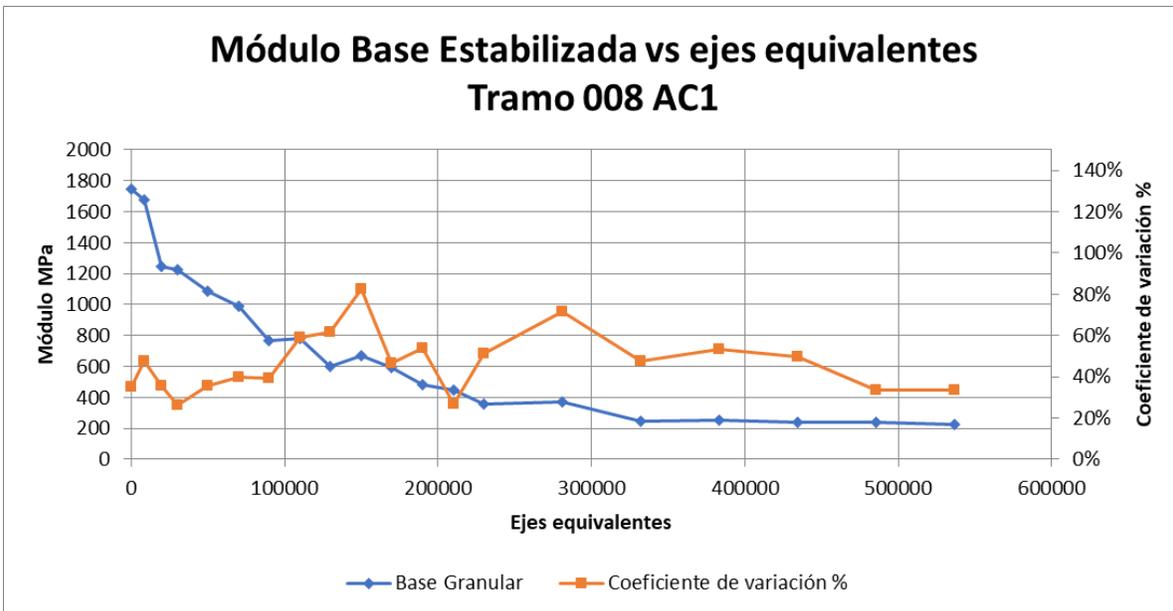
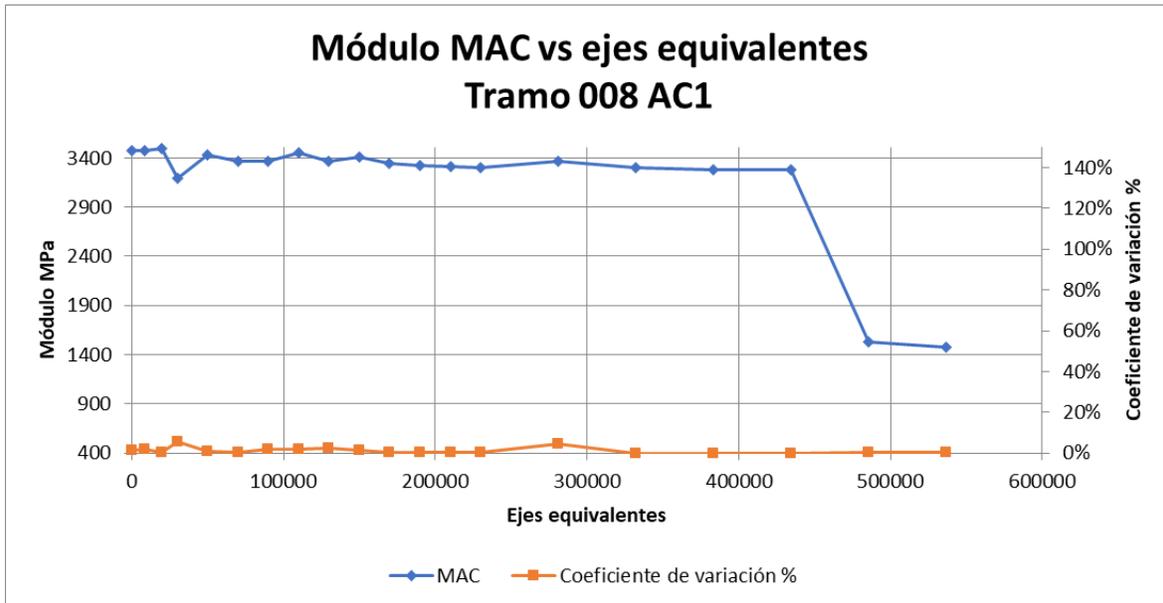




ANEXO E Tramo 008AC1

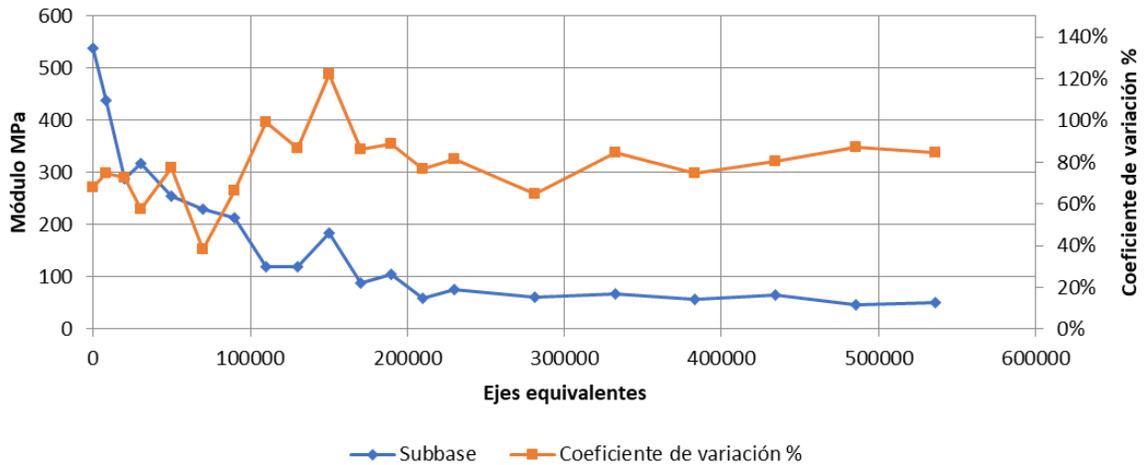
| Carga (kN) | Repeticiones promedio | ESALS promedio | D1 promedio (mm x 10-2) | MAC promedio (Mpa) | BE Promedio (Mpa) | SB promedio (Mpa) | SR promedio (Mpa) |
|------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 40 | 0 | 0 | 28 | 3475 | 1749 | 539 | 57 |
| 40 | 8500 | 8500 | 39 | 3469 | 1674 | 439 | 38 |
| 40 | 20000 | 20000 | 43 | 3492 | 1243 | 289 | 40 |
| 40 | 30000 | 30000 | 53 | 3190 | 1223 | 317 | 26 |
| 40 | 50000 | 50000 | 51 | 3430 | 1085 | 254 | 32 |
| 40 | 70000 | 70000 | 52 | 3366 | 991 | 231 | 31 |
| 40 | 90000 | 90000 | 57 | 3368 | 764 | 214 | 31 |
| 40 | 110000 | 110000 | 57 | 3453 | 778 | 119 | 43 |
| 40 | 130000 | 130000 | 61 | 3370 | 598 | 119 | 39 |
| 40 | 150000 | 150000 | 58 | 3408 | 671 | 185 | 39 |
| 40 | 170000 | 170000 | 62 | 3340 | 591 | 88 | 42 |
| 40 | 190000 | 190000 | 64 | 3320 | 479 | 105 | 42 |
| 40 | 210000 | 210000 | 65 | 3317 | 450 | 59 | 52 |
| 40 | 230000 | 230000 | 69 | 3307 | 359 | 77 | 50 |
| 50 | 250000 | 281057 | 74 | 3364 | 374 | 61 | 51 |
| 50 | 270000 | 332113 | 81 | 3297 | 244 | 68 | 47 |
| 50 | 290000 | 383170 | 80 | 3283 | 250 | 57 | 64 |
| 50 | 310000 | 434226 | 73 | 3281 | 241 | 67 | 69 |
| 50 | 330000 | 485283 | 85 | 1533 | 239 | 47 | 66 |
| 50 | 350000 | 536340 | 80 | 1477 | 229 | 50 | 79 |



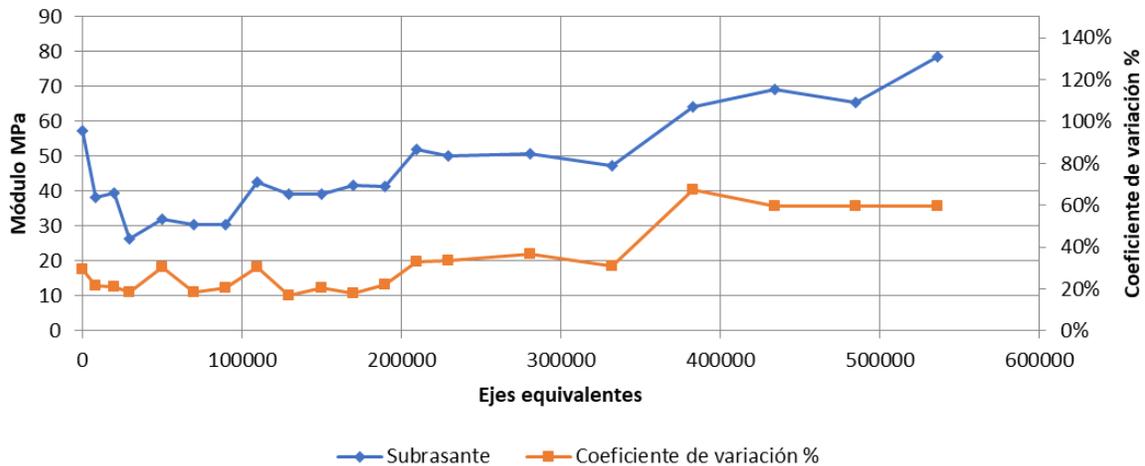


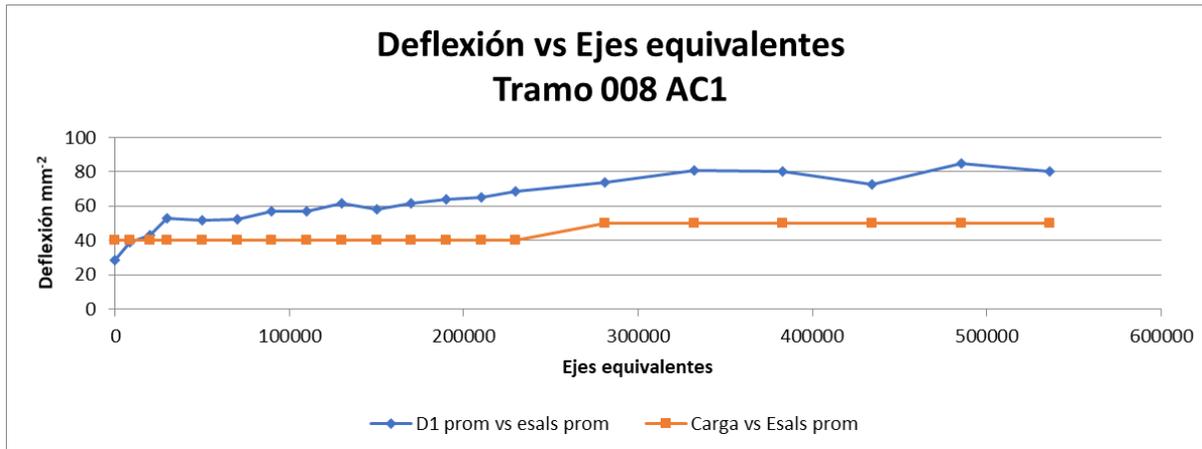
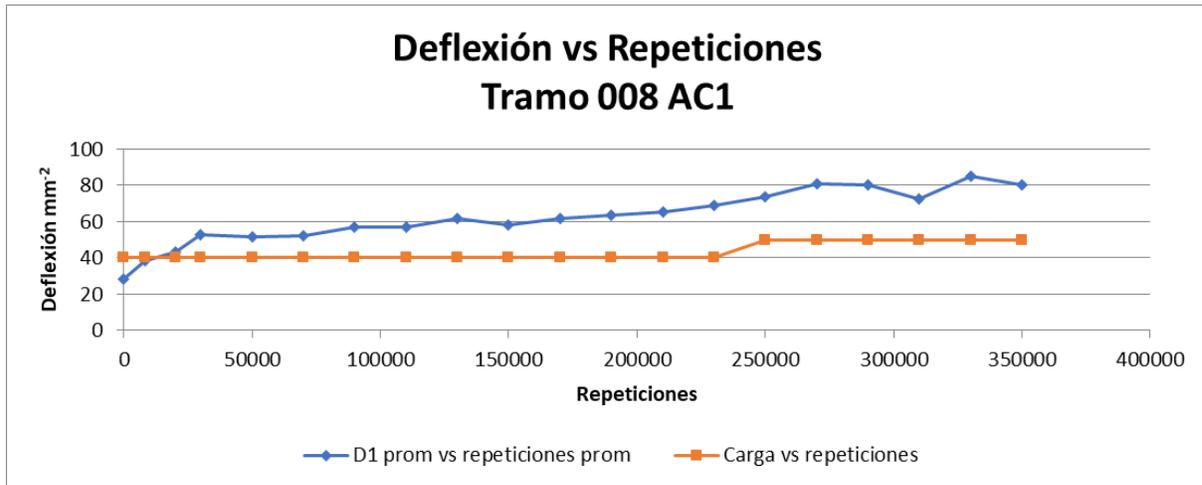


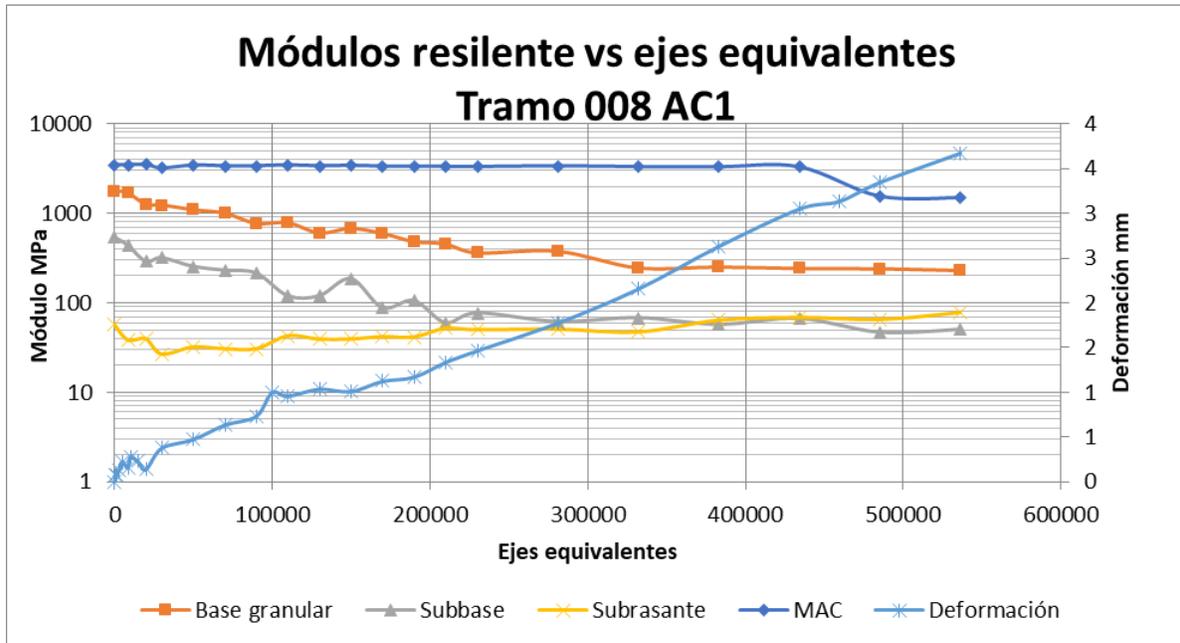
Módulo Subbase vs ejes equivalentes Tramo 008 AC1



Módulo Subrasante vs ejes equivalentes Tramo 008 AC1









ANEXO F Tramo 009AC4

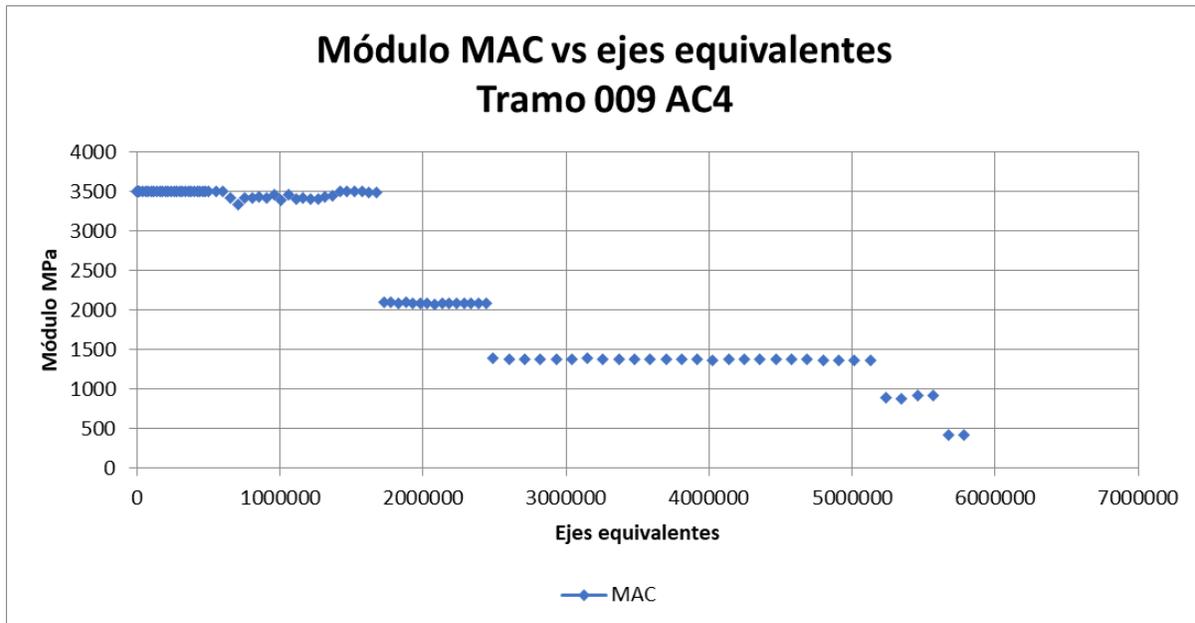
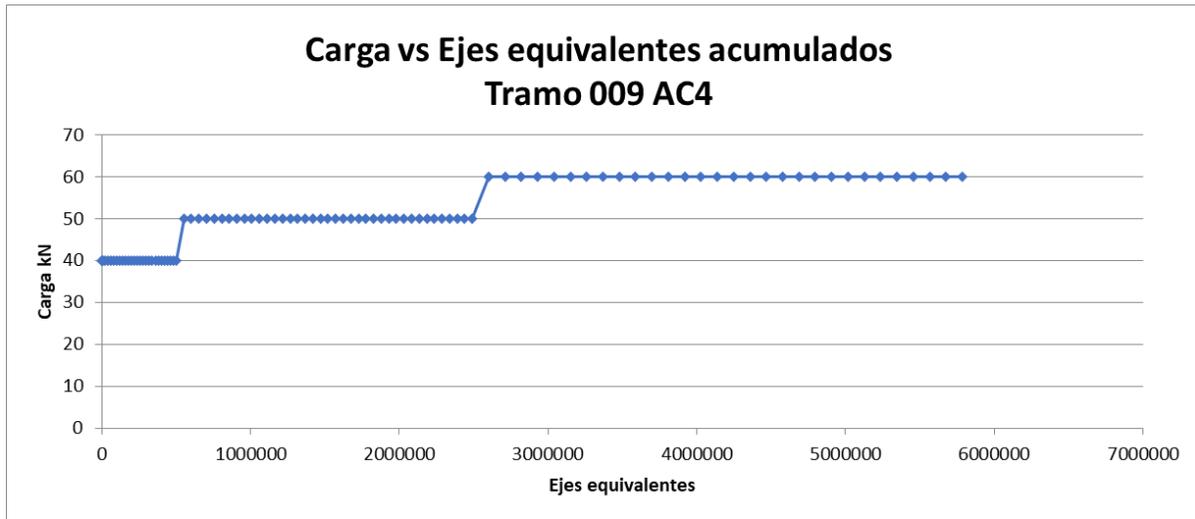
| Carga (kN) | Repeticiones promedio | ESALS promedio | D1 promedio (mm x 10-2) | MAC promedio (Mpa) | BE Promedio (Mpa) | SB promedio (Mpa) | SR promedio (Mpa) |
|------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 40 | 0 | 0 | 14 | 3500 | 1900 | 500 | 121 |
| 40 | 500 | 500 | 15 | 3500 | 1900 | 500 | 105 |
| 40 | 1500 | 1500 | 17 | 3500 | 1882 | 500 | 93 |
| 40 | 3000 | 3000 | 4 | 3500 | 1900 | 500 | 69 |
| 40 | 5000 | 5000 | 18 | 3500 | 1900 | 500 | 85 |
| 40 | 10000 | 10000 | 19 | 3500 | 1900 | 500 | 77 |
| 40 | 20000 | 20000 | 21 | 3500 | 1809 | 444 | 73 |
| 40 | 40000 | 40000 | 24 | 3500 | 1625 | 317 | 68 |
| 40 | 60000 | 60000 | 23 | 3500 | 1443 | 401 | 67 |
| 40 | 80000 | 80000 | 25 | 3500 | 1658 | 343 | 63 |
| 40 | 100000 | 100000 | 25 | 3500 | 1655 | 302 | 64 |
| 40 | 120000 | 120000 | 23 | 3500 | 1475 | 435 | 66 |
| 40 | 140000 | 140000 | 27 | 3500 | 1307 | 416 | 57 |
| 40 | 160000 | 160000 | 29 | 3500 | 1253 | 400 | 49 |
| 40 | 180000 | 180000 | 27 | 3500 | 1197 | 408 | 54 |
| 40 | 200000 | 200000 | 28 | 3500 | 1211 | 488 | 46 |
| 40 | 220000 | 220000 | 29 | 3500 | 1003 | 446 | 50 |
| 40 | 240000 | 240000 | 27 | 3500 | 870 | 460 | 60 |
| 40 | 260000 | 260000 | 29 | 3500 | 981 | 432 | 51 |
| 40 | 280000 | 280000 | 31 | 3500 | 812 | 429 | 50 |
| 40 | 300000 | 300000 | 29 | 3500 | 1188 | 435 | 51 |
| 40 | 320000 | 320000 | 30 | 3500 | 1006 | 432 | 49 |
| 40 | 340000 | 340000 | 31 | 3500 | 738 | 430 | 51 |
| 40 | 360000 | 360000 | 30 | 3500 | 913 | 447 | 50 |
| 40 | 380000 | 380000 | 28 | 3500 | 916 | 342 | 63 |
| 40 | 400000 | 400000 | 32 | 3500 | 1040 | 298 | 52 |
| 40 | 420000 | 420000 | 33 | 3500 | 906 | 379 | 42 |
| 40 | 440000 | 440000 | 30 | 3500 | 858 | 337 | 58 |
| 40 | 460000 | 460000 | 33 | 3500 | 791 | 342 | 53 |
| 40 | 480000 | 480000 | 32 | 3500 | 874 | 330 | 56 |
| 40 | 500000 | 500000 | 31 | 3500 | 1072 | 338 | 55 |
| 50 | 520000 | 551057 | 34 | 3500 | 930 | 263 | 51 |
| 50 | 540000 | 602113 | 32 | 3500 | 718 | 321 | 67 |



| Carga (kN) | Repeticiones promedio | ESALS promedio | D1 promedio (mm x 10-2) | MAC promedio (Mpa) | BE Promedio (Mpa) | SB promedio (Mpa) | SR promedio (Mpa) |
|------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 50 | 560000 | 653170 | 35 | 3423 | 689 | 231 | 72 |
| 50 | 580000 | 704226 | 38 | 3346 | 629 | 230 | 60 |
| 50 | 600000 | 755283 | 39 | 3427 | 571 | 234 | 52 |
| 50 | 620000 | 806340 | 37 | 3423 | 607 | 289 | 50 |
| 50 | 640000 | 857396 | 36 | 3432 | 641 | 249 | 55 |
| 50 | 660000 | 908453 | 38 | 3418 | 521 | 302 | 49 |
| 50 | 680000 | 959510 | 39 | 3467 | 515 | 246 | 52 |
| 50 | 699174 | 1008458 | 39 | 3400 | 422 | 290 | 51 |
| 50 | 720000 | 1061623 | 36 | 3464 | 563 | 156 | 67 |
| 50 | 740000 | 1112679 | 39 | 3413 | 579 | 186 | 56 |
| 50 | 760000 | 1163736 | 39 | 3420 | 599 | 160 | 57 |
| 50 | 780000 | 1214793 | 38 | 3413 | 513 | 153 | 62 |
| 50 | 800000 | 1265849 | 41 | 3411 | 526 | 148 | 57 |
| 50 | 820000 | 1316906 | 41 | 3439 | 597 | 148 | 58 |
| 50 | 840000 | 1367963 | 36 | 3450 | 486 | 265 | 60 |
| 50 | 860000 | 1419019 | 37 | 3500 | 558 | 242 | 59 |
| 50 | 880000 | 1470076 | 39 | 3500 | 532 | 155 | 59 |
| 50 | 900000 | 1521132 | 36 | 3500 | 513 | 243 | 64 |
| 50 | 920000 | 1572189 | 39 | 3500 | 438 | 242 | 56 |
| 50 | 940000 | 1623246 | 40 | 3499 | 375 | 243 | 58 |
| 50 | 960000 | 1674302 | 41 | 3498 | 342 | 240 | 57 |
| 50 | 980000 | 1725359 | 42 | 2099 | 204 | 122 | 32 |
| 50 | 1000000 | 1776415 | 38 | 2099 | 237 | 150 | 32 |
| 50 | 1020000 | 1827472 | 39 | 2096 | 205 | 135 | 35 |
| 50 | 1040000 | 1878529 | 41 | 2099 | 213 | 48 | 39 |
| 50 | 1060000 | 1929585 | 41 | 2096 | 209 | 123 | 33 |
| 50 | 1080000 | 1980642 | 38 | 2096 | 218 | 126 | 37 |
| 50 | 1100000 | 2031699 | 40 | 2092 | 167 | 170 | 34 |
| 50 | 1120000 | 2082755 | 42 | 2078 | 146 | 191 | 30 |
| 50 | 1140000 | 2133812 | 42 | 2095 | 164 | 161 | 30 |
| 50 | 1160000 | 2184868 | 41 | 2090 | 181 | 125 | 36 |
| 50 | 1180000 | 2235925 | 39 | 2091 | 216 | 123 | 37 |
| 50 | 1200000 | 2286982 | 38 | 2090 | 201 | 127 | 40 |
| 50 | 1220000 | 2338038 | 42 | 2088 | 186 | 122 | 34 |
| 50 | 1240000 | 2389095 | 42 | 2091 | 168 | 123 | 35 |

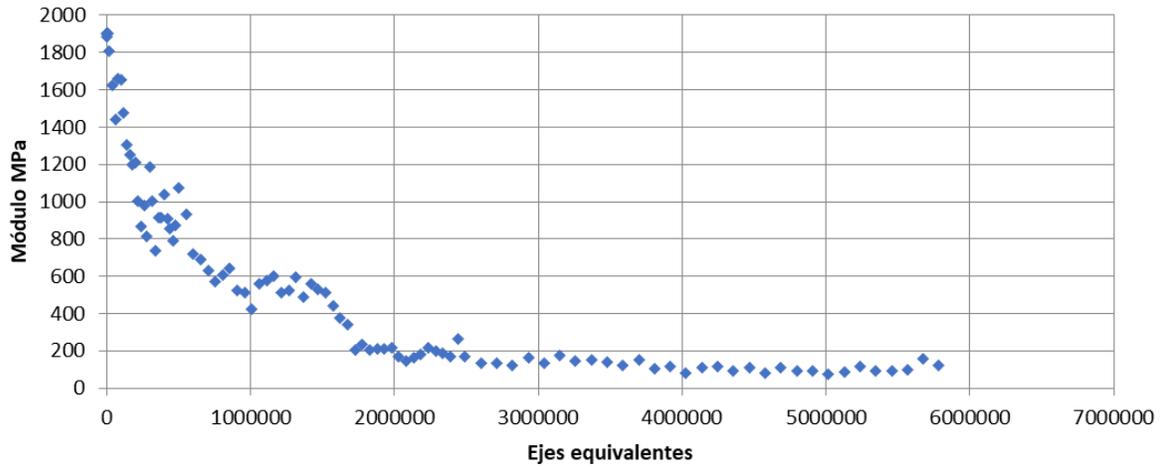


| Carga (kN) | Repeticiones promedio | ESALS promedio | D1 promedio (mm x 10 ⁻²) | MAC promedio (Mpa) | BE Promedio (Mpa) | SB promedio (Mpa) | SR promedio (Mpa) |
|------------|-----------------------|----------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 50 | 1260000 | 2440152 | 40 | 2093 | 265 | 53 | 38 |
| 50 | 1280000 | 2491208 | 43 | 1391 | 167 | 23 | 23 |
| 60 | 1300000 | 2601011 | 42 | 1387 | 134 | 23 | 23 |
| 60 | 1320000 | 2710814 | 45 | 1387 | 133 | 22 | 22 |
| 60 | 1340000 | 2820616 | 45 | 1386 | 122 | 24 | 24 |
| 60 | 1360000 | 2930419 | 39 | 1388 | 163 | 26 | 26 |
| 60 | 1380000 | 3040222 | 45 | 1384 | 133 | 54 | 18 |
| 60 | 1400000 | 3150025 | 43 | 1389 | 178 | 25 | 22 |
| 60 | 1420000 | 3259828 | 49 | 1386 | 147 | 30 | 16 |
| 60 | 1440000 | 3369630 | 50 | 1386 | 154 | 40 | 15 |
| 60 | 1460000 | 3479433 | 51 | 1385 | 141 | 37 | 14 |
| 60 | 1480000 | 3589236 | 52 | 1383 | 123 | 36 | 14 |
| 60 | 1500000 | 3699039 | 47 | 1385 | 151 | 38 | 17 |
| 60 | 1520000 | 3808841 | 53 | 1381 | 104 | 31 | 15 |
| 60 | 1540000 | 3918644 | 51 | 1378 | 115 | 25 | 17 |
| 60 | 1559000 | 4022957 | 55 | 1374 | 83 | 34 | 15 |
| 60 | 1580000 | 4138250 | 51 | 1375 | 108 | 40 | 15 |
| 60 | 1600000 | 4248052 | 53 | 1382 | 116 | 40 | 15 |
| 60 | 1620000 | 4357855 | 54 | 1377 | 91 | 54 | 12 |
| 60 | 1640000 | 4467658 | 57 | 1380 | 110 | 35 | 13 |
| 60 | 1660000 | 4577461 | 58 | 1379 | 81 | 35 | 14 |
| 60 | 1680000 | 4687263 | 52 | 1380 | 109 | 39 | 15 |
| 60 | 1700000 | 4797066 | 58 | 1373 | 93 | 37 | 13 |
| 60 | 1720000 | 4906869 | 59 | 1373 | 95 | 26 | 13 |
| 60 | 1740000 | 5016672 | 60 | 1369 | 73 | 41 | 13 |
| 60 | 1760000 | 5126475 | 57 | 1370 | 90 | 33 | 15 |
| 60 | 1780000 | 5236277 | 62 | 899 | 116 | 23 | 14 |
| 60 | 1800000 | 5346080 | 63 | 887 | 92 | 33 | 13 |
| 60 | 1820000 | 5455883 | 63 | 924 | 90 | 34 | 13 |
| 60 | 1840000 | 5565686 | 61 | 927 | 97 | 17 | 17 |
| 60 | 1860000 | 5675488 | 55 | 424 | 157 | 48 | 14 |
| 60 | 1880000 | 5785291 | 58 | 419 | 124 | 45 | 15 |

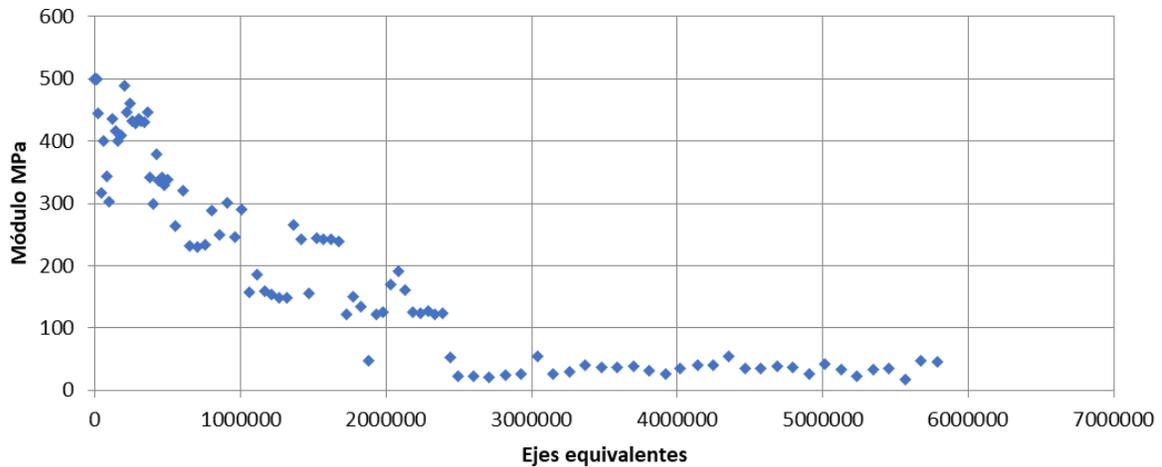




Módulo Base estabilizada vs ejes equivalentes Tramo 009 AC4

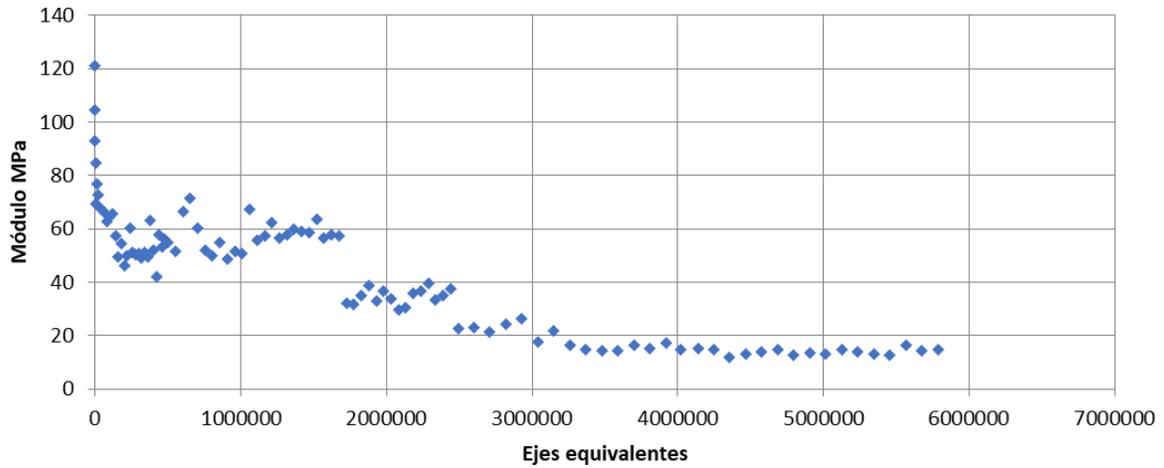


Módulo Subbase vs ejes equivalentes Tramo 009 AC4





Módulo Subrasante vs ejes equivalentes Tramo 009 AC4



Deflexión vs Repeticiones Tramo 009 AC4

