

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

REPORTE: LM-PI-UMP-028-R1

INSTRUMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO ACELERADO A ESCALA NATURAL EN COSTA RICA

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Junio, 2014

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR fabricio.leiva@ucr.ac.cr



Información técnica del documento

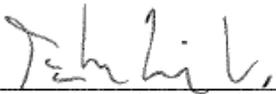
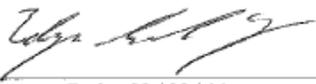
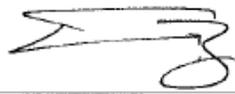
1. Informe LM-PI-UMP-028-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: INSTRUMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL PRIMER ENSAYO ACELERADO A ESCALA NATURAL EN COSTA RICA		4. Fecha del Informe Junio, 2014
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, 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 hace una recopilación de los diferentes elementos que acompañan el proceso de instrumentación de las primeras pistas de ensayo acelerado de pavimentos construidas en Costa Rica, así como de ensayos especializados que los acompañan. El informe también aborda el contexto y generalidades de instrumentación típicamente utilizada en pavimentos. Se incluye un apartado donde se detalla la instrumentación instalada durante el proceso constructivo, los elementos de instrumentación colocados posterior al mismo, así como la capacidad de recolectar información propia del desarrollo y control del ensayo por parte de Simulador de Vehículos Pesados (HVS). Entre los resultados incluidos en este informe se pueden mencionar: deflexiones instantáneas las cuales se utilizaron para el retrocálculo de módulos de capa, deformaciones permanentes y temperaturas a diferentes profundidades dentro de la estructura, presiones medidas a nivel de subrasante; así como resultados del perfil superficial de la estructura utilizados para la progresión del ahueamiento y la regularidad superficial del tramo evaluado. Finalmente se establecen productos esperados en el área de materiales y pavimentos debido al uso del HVS y los resultados mostrados en este informe que serán fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR.</i>		
10. Palabras clave Instrumentación, PaveLab, HVS, APT	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 59
13. Preparado por:		
Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D. Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos	Ing. Edgar Camacho Garita Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos	
 Fecha: 22 / 08 / 14	 Fecha: 22 / 08 / 14	
14. Revisado por:		15. Aprobado por:
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos		Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA
 Fecha: 22 / 08 / 14		 Fecha: 22 / 08 / 14

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
RESUMEN EJECUTIVO	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 OBJETIVO.....	7
1.2 MARCO TEÓRICO	7
1.3 GENERALIDADES	8
2. INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYOS DE LOS TRAMOS EN EL PAVELAB	12
2.1 SENSORES Y EQUIPO UTILIZADOS EN EL PRIMER EXPERIMENTO	12
2.2 DISTRIBUCIÓN DE SENSORES	21
2.3 PROGRAMA DE RECOLECCIÓN DE DATOS	22
3. DATOS RECOLECTADOS POR EL HVS	23
4. RESULTADOS DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO COMPLEMENTARIO.....	27
4.1 DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO	27
4.2 TEMPERATURA	31
4.3 PRESIÓN VERTICAL.....	32
4.4 DEFORMACIÓN PERMANENTE A NIVEL SUPERFICIAL	34
4.5 REGULARIDAD SUPERFICIAL	38
4.6 DEFLEXIONES Y DEFORMACIONES OBTENIDAS CON LOS SENSORES MDD	39
4.7 DEFLEXIONES SUPERFICIALES OBTENIDAS CON EL EQUIPO RSD.....	43
4.8 DETERMINACIÓN DE ESPESORES	45
5. PRODUCTOS ESPERADOS	46
6. CONCLUSIONES.....	47
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

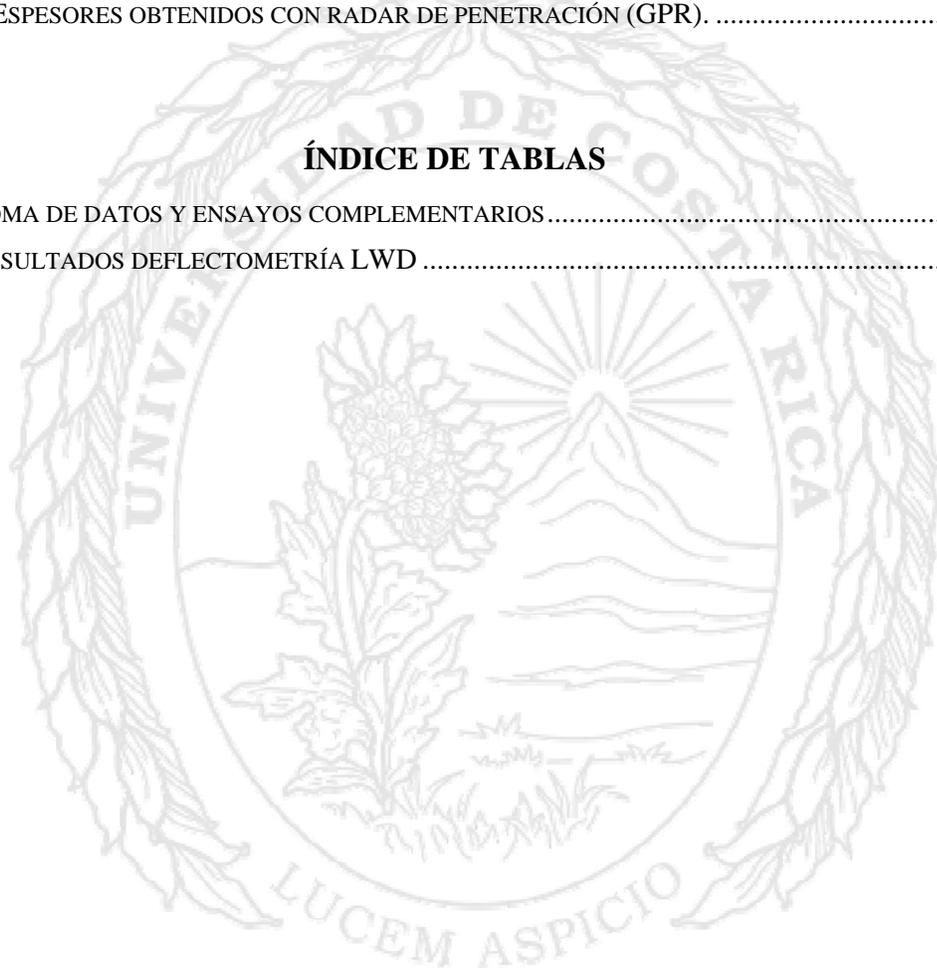
ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. EJEMPLO DE DEFORMACIÓN UNITARIA MEDIDA EN CAMPO (4)	11
FIGURA 2. PERFIL TRIDIMENSIONAL OBTENIDO CON EL PERFILÓMETRO LÁSER.	13
FIGURA 3. DEFLECTÓMETRO DE SUPERFICIE DEL PAVIMENTO (RSD) Y SEÑAL PROCESADA.....	14
FIGURA 4. DEFLECTÓMETRO DE PROFUNDIDAD MÚLTIPLE Y SEÑAL PROCESADA.	15
FIGURA 5. DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO (FWD).	16
FIGURA 6. TRANSDUCTOR Y SEÑAL DE PRESIÓN VERTICAL PROCESADA.....	17
FIGURA 7. TRANSDUCTOR PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES UNITARIAS.	17
FIGURA 8. MEDIDOR DE ACTIVIDAD DE GRIETAS.	18
FIGURA 9. TIPO DE SENSOR Y TEMPERATURA MEDIDA A PROFUNDIDAD MEDIA DE CAPA ASFÁLTICA.	19
FIGURA 10. TIPO DE SENSOR JUNTO A SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA HUMEDAD.	20
FIGURA 11. SOFTWARE Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	20
FIGURA 12. ARREGLO DE INSTRUMENTACIÓN.	21
FIGURA 13. GRÁFICO DE REPETICIONES APLICADAS CONTRA FECHA DE APLICACIÓN.	23
FIGURA 14. GRÁFICO DE CARGA APLICADA CONTRA REPETICIONES, INCLUYENDO DESVIACIONES ESTÁNDAR.	24
FIGURA 15. GRÁFICO DE VELOCIDAD PROMEDIO DE LA RUEDA PARA CADA REPETICIÓN APLICADA.	24
FIGURA 16. GRÁFICO DE TEMPERATURA EN LAS LLANTAS DE ENSAYO PARA CADA REPETICIÓN APLICADA.	25
FIGURA 17. GRÁFICO DE PRESIÓN DE AIRE EN LAS LLANTAS DE ENSAYO PARA CADA REPETICIÓN APLICADA.	25
FIGURA 18. GRÁFICO DE DEFORMACIÓN REGISTRADA POR EL EQUIPO PARA CADA REPETICIÓN APLICADA (INCLUYENDO DEFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE, DE LA RUEDA Y MOVIMIENTOS DE AJUSTE DEL EQUIPO).	26
FIGURA 19. GRÁFICO DE LA UBICACIÓN LATERAL DE LAS CARGAS PARA CADA REPETICIÓN APLICADA.	26
FIGURA 20. RESULTADOS DE ENSAYO DE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO.	28
FIGURA 21. PARÁMETROS DE DEFLEXIÓN.	29
FIGURA 22. ANÁLISIS DE MÓDULOS SUPERFICIALES Y RETROCALCULADOS.	30
FIGURA 23. REGISTRO DE TEMPERATURA AMBIENTE.	32
FIGURA 24. TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO.	32
FIGURA 25. EJEMPLO DE PROCESAMIENTO DE DATOS.	33
FIGURA 26. PRESIÓN VERTICAL MEDIDO A NIVEL DE SUBRASANTE.	34
FIGURA 27. PERFIL DEL TRAMO MEDIDO AL FINAL DEL ENSAYO.	35
FIGURA 28. DEFORMACIÓN LONGITUDINAL MÁXIMA A 1.000.000 DE REPETICIONES.	36
FIGURA 29. DEFORMACIÓN TRANSVERSAL PROMEDIO.	37
FIGURA 30. DEFORMACIÓN PERMANENTE EN FUNCIÓN DE REPETICIONES Y EJES EQUIVALENTES.	38

FIGURA 31. REGULARIDAD SUPERFICIAL (IRI) EN FUNCIÓN DE REPETICIONES Y EJES EQUIVALENTES.	39
FIGURA 32. DEFLEXIÓN INSTANTÁNEA Y DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA ARREGLO SENSOR MDD1. .40	
FIGURA 33. DEFLEXIÓN INSTANTÁNEA Y DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA ARREGLO SENSOR MDD2. .40	
FIGURA 34. SELECCIÓN DE DEFLEXIONES PARA PROCESO DE RETROCÁLCULO.	42
FIGURA 35. RETROCÁLCULO DE MÓDULOS A PARTIR DE ARREGLO SENSOR MDD2.	43
FIGURA 36. RETROCÁLCULO DE MÓDULOS A PARTIR DE ARREGLO SENSOR MDD1.	43
FIGURA 37. DEFLEXIÓN INSTANTÁNEA OBTENIDA CON EL EQUIPO RSD.....	44
FIGURA 38. RETROCÁLCULO DE MÓDULOS A PARTIR DE RESULTADOS RSD.....	45
FIGURA 39. ESPESORES OBTENIDOS CON RADAR DE PENETRACIÓN (GPR).	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TOMA DE DATOS Y ENSAYOS COMPLEMENTARIOS.....	22
TABLA 2. RESULTADOS DEFLECTOMETRÍA LWD	31



RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe hace una recopilación de los diferentes elementos que acompañaron el proceso de instrumentación de las primeras pistas de ensayo acelerado de pavimentos construidas en Costa Rica, así como de ensayos especializados que los acompañan. El informe también aborda el contexto y generalidades de instrumentación típicamente utilizada en pavimentos.

El primer conjunto de pistas de ensayo está ubicado en la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica, ubicadas en un entorno controlado en el interior de un edificio. El documento presenta acá apartados donde se detalla la instrumentación instalada durante el proceso constructivo y los elementos de colocados posterior al mismo. De igual forma se incluyen apartados relacionados con la capacidad de recolectar información propia del desarrollo y control del ensayo por parte de Simulador de Vehículos Pesados (HVS).

Este informe se elaboró siguiendo las recomendaciones del grupo de expertos del Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) de Sur África y del HVS International Alliance (HVSIA) quienes desarrollan informes de diferentes niveles de detalle de los resultados y detalle de análisis de los mismos. En este caso se presenta un informe de primer nivel donde se incluyen los resultados procesados y análisis básicos para ser usados en investigaciones y desarrollos más complejos. Entre los resultados se pueden mencionar: deflexiones instantáneas que se utilizaron para el retrocálculo de módulos de capa, deformaciones permanentes y temperaturas a diferentes profundidades dentro de la estructura, presiones medidas a nivel de subrasante; así como resultados del perfil superficial de la estructura utilizados para la progresión del ahuellamiento y la regularidad superficial del tramo evaluado.

Se espera que los resultados de este informe y el uso del HVS será fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR y por medio del cual se posibilitará la generación de una serie de productos generales como la metodología de diseño mecánica - empírica de pavimentos, basándose en las condiciones de materiales, climáticas, de tráfico y constructivas reales de Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

La instrumentación de pavimentos se ha convertido en una importante herramienta de monitoreo del desempeño del material in situ y una forma de cuantificar la respuesta de estos ante las sollicitaciones de carga y de clima a que es expuesto. Dentro de los parámetros que requieren mediciones de campo se encuentran: la deformación unitaria, los esfuerzos de tensión y compresión, la humedad y la temperatura. Las mediciones in situ de estos parámetros permiten el desarrollo de modelos de desempeño precisos y la calibración de las técnicas de diseño de pavimentos desde un enfoque mecanístico.

Tradicionalmente, en los países que han generado mayor cantidad de avances en el área de pavimentos, ensayos en tiempo real (RTL, por sus siglas en inglés) se han realizado con mayor frecuencia puesto que no requieren de grandes equipos especializados para la realización de los ensayos. No obstante, el tiempo necesario para llevar a cabo el ensayo (más de 10 años de monitoreo continuo de un tramo experimental) está asociado con una gran cantidad de complicaciones ya que muchos de los tramos experimentales están ubicados sobre carreteras en operación.

En el caso de Costa Rica, se considera que debido a la gran variabilidad climática, de materiales y tráfico a la que están sometidos los pavimentos de Costa Rica, el costo de desarrollar un programa adecuado de ensayos RTL que abarque todas estas condiciones por períodos prolongados es prohibitivo. Sin embargo, existe la gran necesidad de poder caracterizar el desempeño a largo plazo de las estructuras de pavimentos del país como método único de poder desarrollar / calibrar metodologías de diseño. Para este propósito, y los definidos previamente, se considera el uso de un equipo de ensayos acelerados en pavimentos (APT, por sus siglas en inglés) es idóneo.

1.1 Objetivo

El objetivo principal de este informe es el de documentar los resultados del primer tramo experimental ensayado en el Pavelab. Dicha información incluye los datos obtenidos mediante la instrumentación colocada, en sincronía con los sistemas del Simulador Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés). Toda la información está basada en un orden jerárquico elemental de análisis cuyos resultados servirán de insumo para investigaciones y estudios más complejos y avanzados.

1.2 Marco teórico

Existen principalmente dos tipos de instrumentación en pavimentos. La primera, y más documentada, es la instrumentación en pistas de prueba para ensayos acelerados de carga a través de sistemas

mecánicos especialmente diseñados para este fin. La segunda consiste en instrumentar tramos de vía en servicio cuya carga es aplicada a través del tráfico real o por medio de vehículos con carga controlada. Las pistas de prueba fueron introducidas por primera vez en 1909 en una instalación circular en Detroit, la cual simulaba el tráfico de caballos y carretas a través de un brazo giratorio (1). Los tramos de vía en servicio a escala real en Estados Unidos datan de 1919 en Arlington, Virginia, donde el pavimento de una pista circular era sometida a las cargas ejercidas por el paso de un camión (1). Con el paso del tiempo estas instalaciones han hecho grandes contribuciones al diseño de pavimentos flexibles y rígidos, ofreciendo información básica de ensayos acerca de diferentes materiales y permitiendo el análisis del efecto del tráfico de vehículos y aeronaves sobre los pavimentos.

Las respuestas medidas con mayor frecuencia en pavimentos son las deformaciones, los esfuerzos y las deflexiones (2). Las deformaciones sirven para comprobar y controlar el daño por fatiga de los materiales asfálticos y el ahuellamiento de las bases con material granular sin tratar, dos de los parámetros de mayor influencia en el proceso de diseño mecanicista de pavimentos. Al conocer la variación del estado de esfuerzos de la estructura del pavimento es posible identificar la influencia de la aplicación de las cargas sobre cada una de las capas. Las deflexiones permiten hacer retrocálculos para cuantificar las propiedades in-situ de los materiales. Adicionalmente a las mediciones de carácter mecánico, la mayoría de proyectos de instrumentación también incluyen la medición de la temperatura y, en algunos casos, de la humedad relativa al interior del pavimento. La temperatura permite explicar fenómenos como el alabeo en pavimentos rígidos o el cambio en la respuesta viscoelástica de los materiales asfálticos. La humedad permite cuantificar la capacidad de drenaje de la estructura y conocer la resistencia de los materiales granulares. El desempeño general de la estructura se mide y se cuantifica en términos de las manifestaciones asociadas a los diferentes tipos de daño, los cuales permiten identificar la serviciabilidad del pavimento.

1.3 Generalidades

1.3.1 Adquisición de datos

Antes de llevar a cabo la instalación de los sensores de medición, el sistema de adquisición de datos debe estar casi completo, cercano a ser operacional, debido a que algunos de los sensores que se utilizan tienen vidas útiles cortas y las mediciones deben empezar a tomarse durante la construcción, el periodo de curado y antes de que algún tipo de agrietamiento o deterioro sea visible. La actividad de registro de los datos proporcionados por los diferentes sensores, puede ser realizada a través de un software diseñado en lenguaje de programación como LabView. La escogencia de LabView (caso del

Pavelab) como herramienta de programación se debe a que éste es un lenguaje gráfico especialmente diseñado para el desarrollo de programas de control, para el procesamiento de señales y adquisición de datos.

1.3.2 Adquisición de datos

No se deben colocar sensores de diferentes tipos muy cerca unos de otros, pues se pueden generar problemas logísticos durante la instalación, además generan esfuerzos adicionales para minimizar los efectos de un sensor instalado sobre la validez de la mediciones de otro cercano. Adicionalmente, se busca que el impacto sobre la estructura sea mínimo de manera que la colocación de un sensor no vaya a resultar en la generación de discontinuidades o irregularidades que de otra manera no estarían presentes en el pavimento.

1.3.3 Validez de las mediciones

Durante las etapas de planeamiento se deben considerar los siguientes factores: funcionalidad de los instrumentos, propiedades de los materiales a instalar, ubicación (proximidad entre sensores, bordes de la carretera), reemplazo de materiales alterados y conservación de las condiciones generales del sitio (sección transversal, apariencia superficial, etc.). Se deben realizar esfuerzos adicionales durante el proceso constructivo para restaurar la sección transversal posterior al trabajo de excavación en las áreas de colocación de sensores.

1.3.4 Operación del equipo de instrumentación

El manejo de los instrumentos a lo largo del proceso de instalación es un factor determinante en la durabilidad de los sensores y en la validez de los datos recopilados. Una de las principales causas de falla en las pruebas de desempeño de carreteras a base de sensores electrónicos es su baja durabilidad, debido principalmente, a las agresivas condiciones ambientales a que son expuestos una vez colocados en sitio.

Muchos de los sensores que se utilizan en este tipo de pruebas son extremadamente delicados y deben ser manejados con mucho cuidado. Cada una de las personas involucradas en el proceso de construcción debe tener claro que existen actividades que generan tensiones, vibración o calor, no pueden realizarse cerca de los sensores. El personal debe ser instruido en cuanto a lo delicado y costoso del equipo y a los objetivos de la investigación con el fin de evitar este tipo de problemas.

1.3.5 Interferencia electromagnética

Las mediciones eléctricas de bajas magnitudes son especialmente susceptibles a la degradación de la señal debido a la atenuación del cableado principal, desensibilización de puentes, cambios de temperatura e interferencia electromagnética (3). Para minimizar los efectos de los tres primeros se debe elegir un sistema de adquisición de datos de corriente dual constante con un sistema de tres cables para instrumentos de “quarter bridge”. La interferencia electromagnética puede imposibilitar la interpretación de los datos generados por los sensores.

La interferencia electromagnética es el resultado de la superposición de campos electrostáticos y magnéticos, como los generados por líneas de transmisión, ondas de radio o la ignición de vehículos, en los datos de salida de los sensores. Con el fin de minimizar esta interferencia el cableado principal debe estar recubierto completamente con material aislante. Es sumamente importante a la hora de elegir un sitio de instrumentación, que este se ubique, en medida de lo posible, lejos de líneas de transmisión.

1.3.6 Medida de deformaciones unitarias

Las tensiones horizontales y sus respectivas deformaciones unitarias en el pavimento se miden con el fin de recolectar información relacionada con el criterio de falla usado en los procedimientos mecanístico – empíricos de diseño. Con esta información se pueden realizar comparaciones entre los resultados de los modelos analíticos y además, utilizarse en el desarrollo de nuevos modelos. La Figura 1 muestra la señal obtenida del paso de medio eje simple dual sobre un sensor de asfalto. La deformación unitaria a tensión como la mostrada está correlacionada con la resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas.

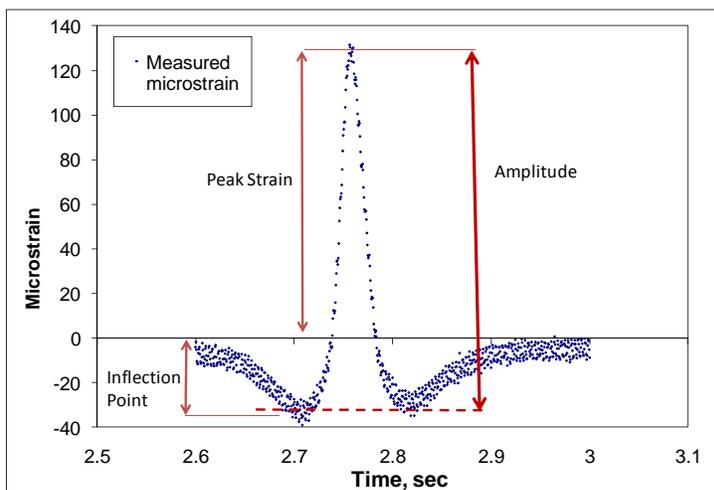


Figura 1. Ejemplo de deformación unitaria medida en campo (4)

1.3.7 Medida de los esfuerzos verticales mediante celdas de carga

La medida de los esfuerzos verticales en las capas de pavimento es una tarea delicada. Esto se debe a que la instalación de los sensores altera el campo de esfuerzos alrededor del sensor e induce una concentración de esfuerzos o una disminución de los mismos debido a un efecto de arco. Estas alteraciones dependen de la rigidez del sensor y de su forma. Para evitar este tipo de problemas se emplearon sensores con diafragmas extremadamente rígidos, con una relación diámetro-espesor superior a 5 y con una relación diámetro-deflexión superior a 2000.

1.3.8 Medida de la humedad relativa en suelos y capas de material granular

La humedad de las capas de pavimento no ligadas (subrasante y granulares) es un parámetro que determina en gran medida su respuesta y desempeño mecánico. En efecto, el módulo resiliente de este tipo de capas está íntimamente relacionado con su humedad. Los sensores seleccionados para medir la humedad en este tipo de capas son del tipo capacitivo, los cuales tienen una respuesta lineal en función de la humedad del material.

1.3.9 Medida de la deflexión dinámica y de la deformación permanente

La deflexión de las diferentes capas es una variable que proporciona información sobre el comportamiento estructural de un pavimento. Debido a que los vehículos se encuentran en circulación en su paso sobre el pavimento, es necesario realizar la medición de la deflexión dinámica de los

materiales. También es importante medir el desplazamiento vertical de cada una de las capas del pavimento bajo condiciones dinámicas.

2. INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYOS DE LOS TRAMOS EN EL PAVELAB

Dentro de los instrumentos de monitoreo, se desarrollan dos tipos de actividades en relación a si la sección de prueba se trata de la forma habitual durante la medición, o si se interrumpe el ensayo acelerado del pavimento (APT) para efectuarla. El monitoreo operacional es la adquisición de datos que se lleva a cabo durante los ensayos de una sección de prueba, esto incluye monitoreo de la velocidad del tránsito, el número de repeticiones y carga, así como el seguimiento de determinados datos que toman los instrumentos (según el tipo de APT). Ciertas técnicas de medición requieren que el APT se detenga durante un periodo de tiempo durante la medición. Estas incluyen casos donde el HVS se utiliza para carga controlada a bajas velocidades en combinación con los dispositivos de medición, como es el caso del medidor de deflexión con el deflectómetro de superficie de la carretera (RSD). Otros instrumentos que requieren que el HVS se detenga en el transcurso normal de la sección de prueba incluyen:

- Deflectómetro multi-profundidad (MDD, por sus siglas en inglés) y
- Perfilómetro láser incorporado en el HVS

2.1 Sensores y equipo utilizados en el primer experimento

Como complemento al equipo HVS, se utilizó una serie de sensores para poder realizar todas las mediciones de respuesta deseadas, así como la recolección de la información generada por el HVS. Para un detalle del proceso constructivo e instalación de los sensores revisar el informe LM-PI-UMP-027-R1 "Proceso Constructivo PaveLab". Entre el equipo y partes que se están utilizando se tienen las siguientes (5-8):

2.1.1 Perfilómetro láser

El perfilómetro láser se utiliza para medir el perfil longitudinal y transversal de la superficie en la sección de ensayo. Este perfil de datos puede ser procesado para determinar el promedio de ahuellamiento y correlacionar la deformación permanente de la sección de prueba con el dato de MDD. El sistema de toma de datos utiliza 2 dispositivos láser Selcom de 16 hz y cada perfil consiste de 64 perfiles longitudinales tomados a intervalos transversales de 25 mm. El ahuellamiento se puede medir hasta profundidades de 100 mm con una incertidumbre de ± 1 mm.

Una vez obtenido el perfil completo, se generan gráficos tridimensionales de la deformación de la superficie de cada sección por comparación durante las diversas etapas del APT. La Figura 2 muestra el perfil tridimensional medido con el perfilómetro láser para el primer tramo evaluado.

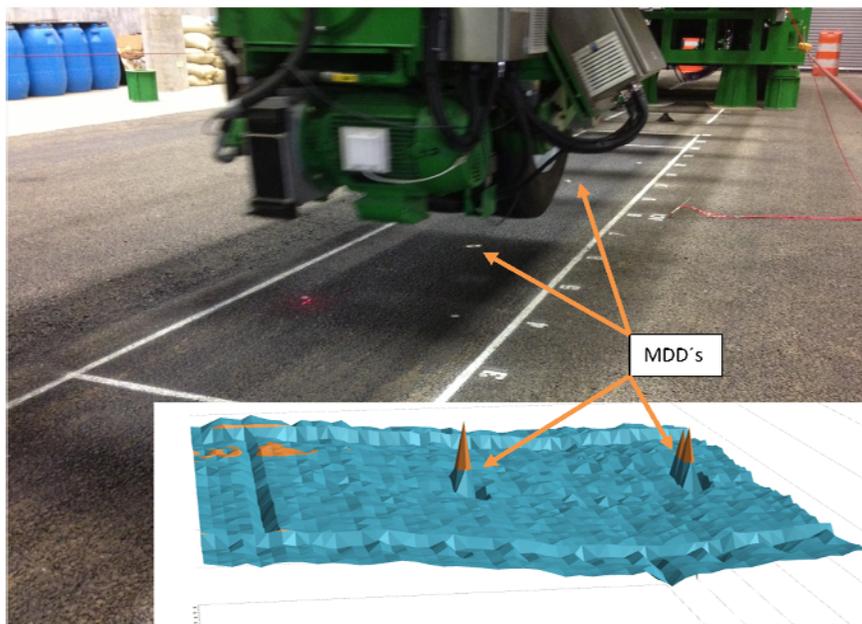


Figura 2. Perfil tridimensional obtenido con el perfilómetro láser.

2.1.2 Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD)

El RSD es esencialmente una versión electrónica de la viga Benkelman con capacidad de transferencia de datos. Se utiliza para medir el cuenco de deflexión de la superficie bajo la carga del HVS. El RSD consiste de una viga T que tiene un punto de medición en el filo de la viga y dos apoyos de referencia en el otro lado de la viga. A un 1/6 de la longitud de la viga desde la intersección T, se localiza el Transductor Diferencial Variable Lineal (LVDT).

El punto de medición del RSD se localiza entre las dos llantas de una configuración de llanta dual. Los neumáticos se alejan del punto de referencia del RSD y se desplazan más allá del punto de medición. La posición de los neumáticos se registra a intervalos regulares (preseleccionados). El pavimento se deflecta y el LVDT registra el movimiento relativo de la superficie del pavimento con respecto al punto de referencia. Esos datos se registran y el cuenco de deformación elástica generada a partir de los datos también. La exactitud en la medición es aproximadamente 10 micrones. La recolección de datos

es automática y de esta manera puede ser utilizado el RSD para calcular el cuenco de deflexiones entero, que consiste de 256 puntos de datos, en el momento que la llanta dual atraviesa el RSD a una velocidad de desplazamiento.

Debido a la naturaleza del ensayo y a la velocidad de medición es necesario detener el funcionamiento del HVS durante las mediciones del RSD. El RSD es un dispositivo versátil de monitoreo del pavimento, el cual se puede utilizar para medir los cuencos de deflexión separadamente del HVS. La Figura 3 muestra al equipo RSD junto a una curva de deflexión medida a lo largo del primer tramo evaluado.

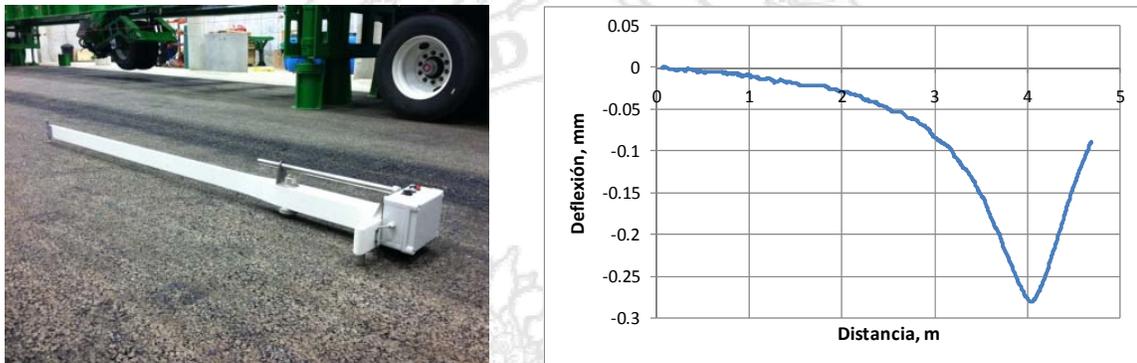


Figura 3. Deflectómetro de superficie del pavimento (RSD) y señal procesada.

2.1.3 Deflectómetro Multi-profundidad (MDD)

El MDD se utiliza para medir la deflexión elástica instantánea y la deformación permanente en varias capas del pavimento de una sección de prueba. Los datos de deformación plástica o permanente se han utilizado para desarrollar las funciones de transferencia que relacionan las repeticiones de carga con la deformación plástica de los materiales de construcción de carreteras. Los datos de deflexión elástica se pueden utilizar para determinar el módulo elástico efectivo de cada capa del pavimento.

El componente primario del sistema patentado MDD es una serie de módulos LVDT, los cuales se colocan en la carretera en un agujero de 39 mm de diámetro taladrado en la sección de prueba. Se pueden montar hasta 6 módulos de LVDT a varias profundidades, separados al menos 150 mm.

Una vez que el agujero ha sido taladrado en la sección de prueba, se coloca una varilla de anclaje en la subrasante aproximadamente 3 m por debajo de la superficie del pavimento. La varilla de referencia está conectada a la varilla de anclaje por medio de un conector para permitir la remoción y reúso de los módulos LVDT. Se instala una membrana antes de la instalación de los módulos LVDT.

El anclaje de los módulos LVDT al suelo se lleva a cabo por medio de un número de pequeños balones de acero que son forzados a salir de una manga en contra de la membrana a la profundidad deseada. Los módulos LVDT miden el desplazamiento del suelo relativo a la barra de referencia con una precisión de ± 10 micrones. La parte superior del agujero del MDD se sella con una tapa, lo cual contiene un conector al sistema que toma los datos. La Figura 4 muestra al sensor MDD junto a un curvas de deflexión medidas a lo largo del primer tramo evaluado.

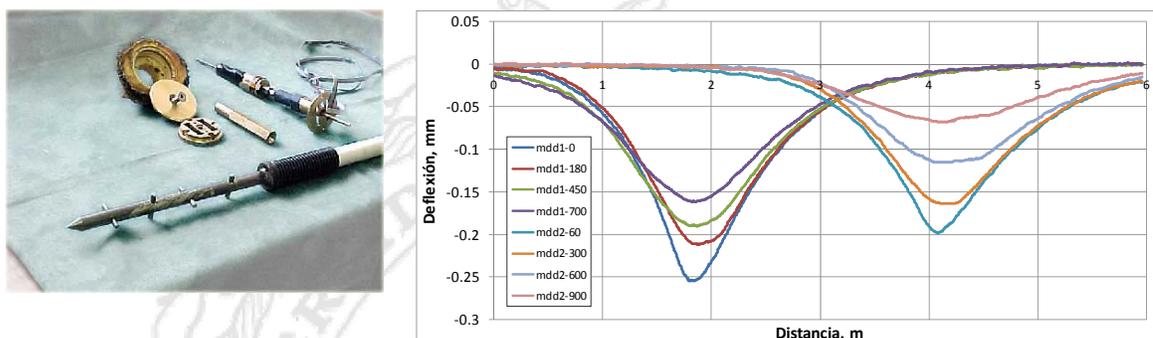


Figura 4. Deflectómetro de Profundidad Múltiple y señal procesada.

2.1.4 Deflectómetro de Impacto

El deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés) es un equipo utilizado para la evaluación del estado estructural de pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos. El operador controla todas las funciones del deflectómetro desde el ordenador que se instala en el vehículo remolcador (en caso de ser con remolque). El FWD es un equipo que aplica una carga de impacto a la superficie del pavimento, determinando las deflexiones verticales (envolvente de deflexiones) como se muestra en la Figura 5.

La deflectometría de impacto se trata de un ensayo no destructivo, que simula el comportamiento del pavimento ante el paso de los vehículos pesados. A través del análisis de este cuenco se obtiene información de la rigidez de la estructura de pavimentos y del suelo de fundación, siendo muy importante para definir la condición de la estructura a lo largo de un proyecto.

La configuración de geófonos utilizado comúnmente con los equipos del LanammeUCR incluye mediciones a distancias de 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 y 1800 mm. Para el equipo FWD, tanto el desplegado del medidor de carga y almacenamiento tienen una resolución máxima de 200 Newtons. De igual forma el desplegado de las mediciones de deflexión y almacenamiento tiene una resolución máxima de $\pm 1.0 \mu\text{m}$. Adicionalmente, la duración del impulso de la carga se encuentra entre 20 y 60 ms.

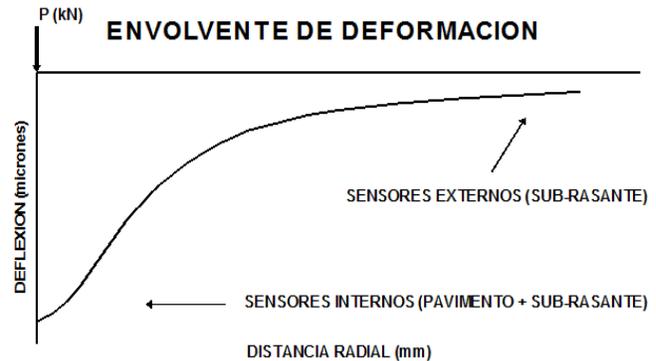


Figura 5. Deflectómetro de Impacto (FWD).

El Deflectómetro de Impacto Liviano (LWD) es un deflectómetro de impacto portátil que fue creado para realizar mediciones in-situ de módulos elásticos de bases, subbases y subrasantes de pavimentos. El principio de funcionamiento de este tipo de equipo es el mismo que el del FWD pero con cargas mucho menores. Consiste básicamente en un equipo de carga que produce una carga dinámica que impacta el suelo sobre un plato de carga y mide la deflexión mediante un geófono central.

El LWD es la alternativa más sencilla y económica para ensayos estáticos de carga, ya que es muy versátil porque pesa menos de 20 kilos y puede ser fácilmente cargado en sitios de construcción de pavimentos. Además, no requiere mediciones referenciales por lo que puede reemplazar exitosamente los onerosos y largos ensayos estáticos de plato de carga. El equipo tiene una altura máxima de caída de 85 cm, con cargas de 10 a 20 kg, con duración del pulso de carga entre 15 y 30 mili segundos, con una resolución de 0.0002 kN y una precisión de $1\% \pm 0.01$ kN para el sensor de carga y una resolución de 0.05 micrómetros y precisión de $2\% \pm 2$ micrómetros para el sensor de deformación.

2.1.5 Transductores de deformación y presión

Se utilizan dos tipos de transductores para la medición in situ de esfuerzos y deformaciones en las secciones de prueba del HVS:

- Transductor de presión del suelo (SOPT) y,
- Transductor de deformación del pavimento (PAST)

El SOPT es una galga de precisión para la medición de los esfuerzos verticales en las capas sin ligante del pavimento. 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. Estos

sensores tienen un diámetro de 68 mm y 13 mm de espesor, 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. La Figura 6 muestra al sensor SOPT utilizado junto a la señal obtenida a nivel de subrasante para 2 niveles de carga.

El PAST se utiliza para la medición de deformación horizontal en la parte inferior de la capa del pavimento (parte inferior de la carpeta asfáltica en la mayoría de las instancias). Pueden ser instaladas directamente en la capa base, en dirección longitudinal o transversal, antes de la pavimentación de la sección de ensayo. Este sensor puede medir hasta 1500 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 ohms. Este sensor tiene una longitud efectiva de 102 mm con anclajes de 75 mm. La Figura 7 muestra al sensor PAST que fue instalado en 2 tramos del primer experimento.

La serie de galgas SOPT y PAST se han diseñado para una vida útil de 36 meses de APT (hasta 100 millones de repeticiones de carga normal para el tipo de galga de deformación PAST III). Los transductores son automáticos y conectados al sistema recolector de datos del HVS, permitiendo un monitoreo continuo de esfuerzos y deformaciones en varios sitios dentro del pavimento durante el tránsito del HVS.

Estos instrumentos no son muy utilizados en los ensayos del HVS en Suráfrica. Sin embargo, si son utilizados en los APT internacionalmente, particularmente en los APT de estructuras de pavimentos de concreto y capas asfálticas gruesas ($>50\text{mm}$).

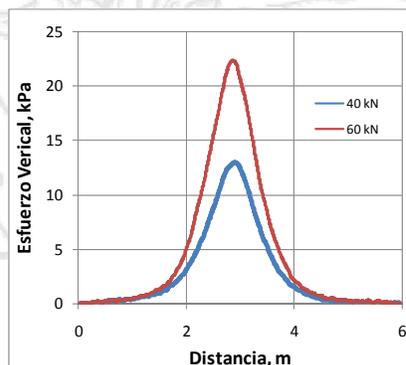


Figura 6. Transductor y señal de presión vertical procesada.

Figura 7. Transductor para medición de deformaciones unitarias.

2.1.6 Medidor de actividad de grietas (CAM)

El CAM permite el control de movimiento de carga asociado y la progresión de las grietas en el pavimento. La exactitud medida de la magnitud de las grietas y la tasa de incremento de la grieta (aumento en el ancho y movimiento asociado) ayuda en la selección de la pavimentación apropiada para acomodar cada movimiento.

El tamaño pequeño del CAM permite su instalación entre las huellas de la rueda dual de la configuración de carga del HVS. El CAM se desarrolló específicamente para la medición de actividad de grietas con la configuración de neumáticos dual. Aunque la actividad de grieta se puede medir en la próxima llanta simple, no es un procedimiento estándar. El CAM tiene que estar pegado a un lado de la grieta y la placa vertical al otro lado de la grieta. Los datos tomados son utilizados en la simulación de grietas de los materiales en el análisis de laboratorio, con el fin de evaluar la capacidad de los materiales para retardar la reflexión de las grietas.

El CAM es capaz de medir tanto el movimiento relativo horizontal y vertical a través de una grieta recorrida por la llanta. Además, se puede utilizar durante el funcionamiento normal del HVS pero sólo para el tráfico canalizado de la sección de ensayo. La Figura 8 muestra al sensor CAM obtenido para medir la actividad de grietas.

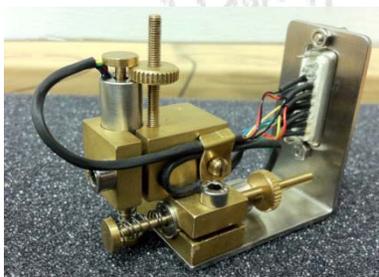


Figura 8. Medidor de actividad de grietas.

2.1.7 Termocuplas

Las termocuplas son sensores de temperatura instalados en la sección de prueba del HVS para monitorear la temperatura a varias profundidades dentro de la estructura del pavimento durante el APT. En la mayoría de las instancias, las termocuplas se instalan en la superficie de la sección de prueba. Este dato luego se procesa y se utiliza en combinación con la medición del ahuellamiento para establecer el efecto de la temperatura del pavimento sobre la deformación de la superficie. Las termocuplas se pueden monitorear durante la operación normal del HVS. Específicamente, las

termocuplas instaladas en los tramos están hechas con 2 alambres de distinto material (Nickel/Cromo) unidos en un extremo y son del tipo K con rangos de temperatura de -180 a 1300 °C. Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts (máximo de 54.8 mV) el cual aumenta con la temperatura. La Figura 9 muestra el tipo de termocupla utilizado y los resultados de medición de temperatura en el primer tramo experimental.

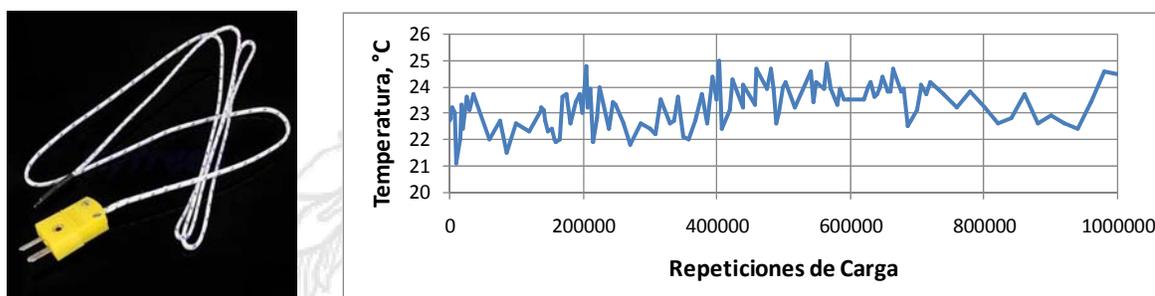


Figura 9. Tipo de sensor y Temperatura medida a profundidad media de capa asfáltica.

2.1.8 Medidor de la humedad relativa en suelos y capas de material granular

Se utilizaron sensores DECAGON 5TE para medir el contenido de agua, la conductividad eléctrica y la temperatura de material de base granular y suelo. El sensor 5TE determina el contenido volumétrico de agua (CVA) mediante la medición de la constante dieléctrica de los medios de comunicación utilizando la capacitancia / tecnología de dominio de la frecuencia. 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 son calibrados en fábrica para todos los tipos de suelo. El sistema de recolección de datos Em50, trabaja con 5 baterías AA y puede guardar hasta 36 mil datos obtenidos de forma continua de 5 puertos diferentes. La Figura 10 muestra al sensor 5TE obtenido para medir los parámetros relacionados con humedad junto con el sistema de adquisición de datos. Este equipo será utilizado en la réplica de cada sección construida en este primer experimento.



Figura 10. Tipo de sensor junto a sistema de adquisición de datos para humedad.

2.1.9 Sistema de Adquisición de Datos

La captura precisa de la respuesta del pavimento, los cambios ambientales y la carga de tráfico son vitales para el éxito y el valor del ensayo del HVS. El hardware y software desarrollado específicamente para la adquisición de datos permiten una gran precisión en combinación con la capacidad de medir las deformaciones permanentes de hasta 150 mm. El sistema HVS toma los datos medidos por el RSD, CAM, MDD, perfilómetro láser, el SOPT y el PAST. El proceso centralizado de los datos recolectados y su registro, facilita el análisis intensivo de los datos. Los datos brutos se procesan utilizando el software estándar de procesamiento de datos del HVS y se almacena en su base de datos. La actividad de registro de los datos proporcionados por los diferentes sensores realiza a través de LabView como se muestra en la Figura 11. De igual forma se muestra el sistema especialmente diseñado para el Pavelab.



Figura 11. Software y sistema de adquisición de datos.

2.2 Distribución de sensores

La Figura 12 muestra el arreglo de instrumentación utilizado para la primera serie de tramos experimentales. 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 subrasante. 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 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 al 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).

El espaciamiento entre sensores se seleccionó basado en la experiencia de otros investigadores que buscan minimizar la posible interferencia de unos sensores con otros (2,8). 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.

En cuanto a las termocuplas, se colocaron a 4 profundidades: 1 superficie, 1 a media profundidad de la capa asfáltica, 1 a nivel de los sensores PAST y 1 a 5 cm de profundidad de la capa de base. En el caso de los tramos AC3 y AC4 se propone utilizar el mismo arreglo de sensores pero sin incluir los sensores PAST.

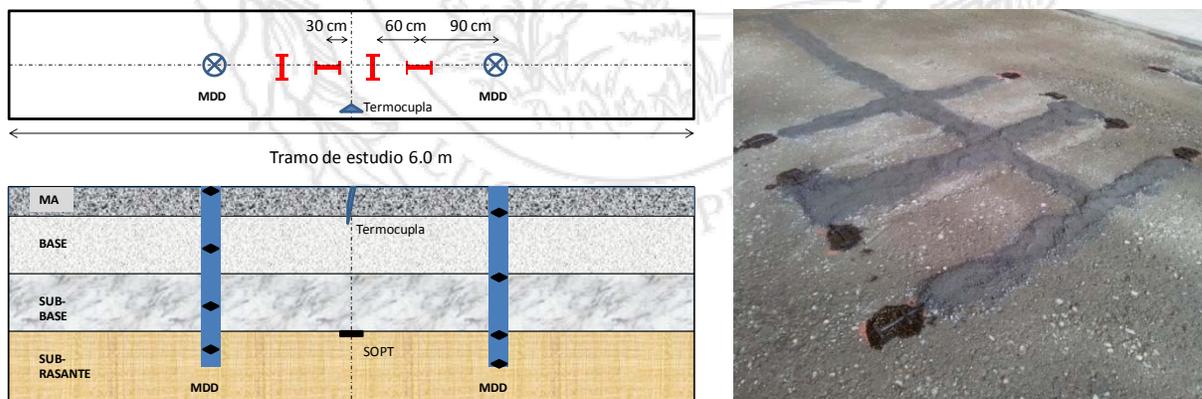


Figura 12. Arreglo de instrumentación.

2.3 Programa de recolección de datos

La Tabla 1 muestra una lista de sensores y ensayos complementarios por realizar junto con la frecuencia de toma de datos (9). La mayoría de estas actividades están relacionadas con el número predeterminado de pasadas de la rueda cargada. A continuación se describe la frecuencia de toma de datos para estas actividades:

Tabla 1. Toma de datos y ensayos complementarios

Tipo de Instrumentación	Relacionado a pasadas de HVS	Horario	Diario	Otro
Perfil Laser 3D	✓			
Deformaciones Unitarias	✓			
Presión	✓			
Temperatura		✓		
Condiciones climáticas			✓	
Deflección superficial RSD	✓			
Deflección estructural MDD	✓			
Núcleos				✓
FWD/LWD/DCP/GPR				✓
Daño superficial			✓	
Caracterización de materiales				✓

FWD: Falling Weight Deflectometer (Deflectometría de Impacto)

LWD: Light Weight Deflectometer (Deflectometría de Impacto)

DCP: Cono Dinámico de Penetración

GPR: Radar de penetración

Toma de datos relacionada con pasadas HVS: en la condición inicial, 100, 200, 300, 500, 1.000, 1.500, 3.000, 5.000, 10.000, 15.000 y de aquí en adelante cada 15.000 pasadas hasta la falla.

Toma de núcleos: una vez terminada la construcción de los tramos fuera de la zona de carga. Al final del experimento se propone tomar núcleos tanto en la zona de carga como afuera de la misma.

Ensayos FWD/LWD/DCP/GPR: ensayos con los equipos LWD y DCP durante la construcción de los tramos en las capas granulares y suelo; y los ensayos de FWD/GPR al terminar la construcción de la capa superficial. Al final del experimento se propone realizar ensayos con el FWD sobre la estructura fallada y ensayos LWD/DCP sobre las capas granulares y suelo falladas.

Inspección de daños superficiales: este se refiere, por ejemplo, a la aparición de grietas, pérdida de fricción, pérdida de adherencia agregado-asfalto entre otros que pueden ser documentados diariamente cuando se realice el respectivo mantenimiento diario del HVS.

3. DATOS RECOLECTADOS POR EL HVS

Como parte de los sistemas que controlan la operación del HVS se recopila una serie de parámetros y datos para cada una de las pasadas ejercidas por el equipo. A modo de ejemplo se presentan a continuación algunos de estos datos que son registrados por el equipo, y procesados para efectos de control sobre la operación del mismo.

El HVS lleva un registro completo por cada repetición aplicada con la fecha y hora de la aplicación (Figura 13). De igual forma la carga se aplicó bidireccionalmente sobre una distancia de 6 m, con un ancho de huella de 0,77 m y se registra tanto la carga aplicada como la desviación estándar (Figura 14) como una forma de control sobre el cumplimiento de la carga esperada. La velocidad establecida para este ensayo fue de 10 km/h, de tal forma que se aplican 870 repeticiones de carga por hora. Como se aprecia en la Figura 15, el equipo mantiene un registro detallado de la velocidad promedio para cada repetición en ambos sentidos de aplicación de la carga.

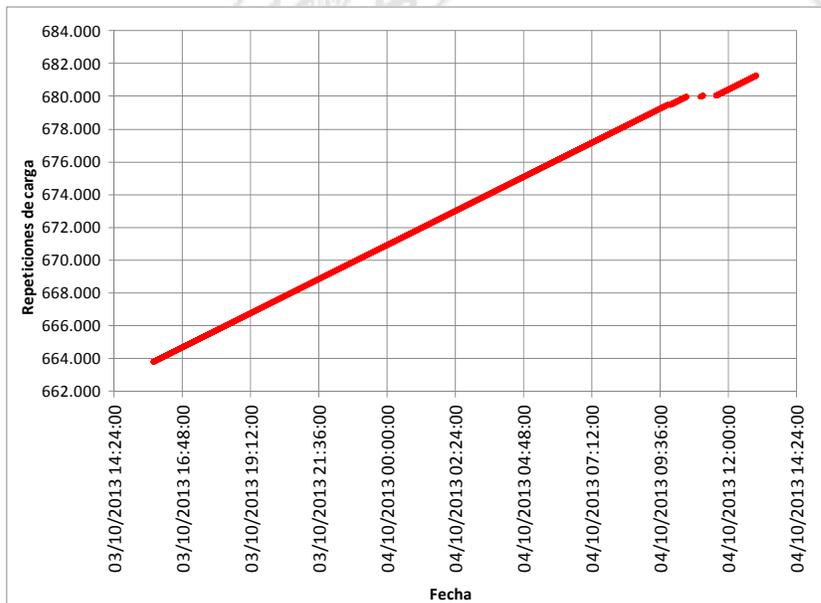


Figura 13. Gráfico de repeticiones aplicadas contra fecha de aplicación.

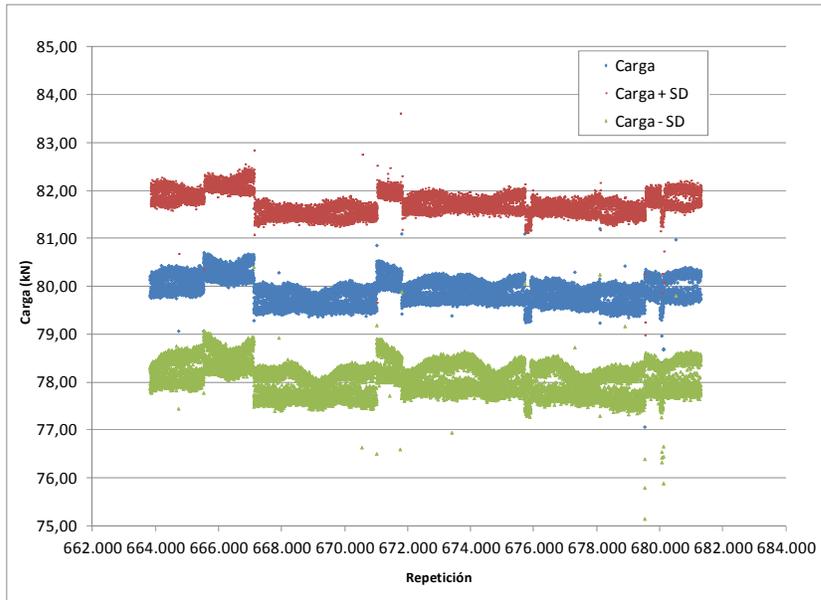


Figura 14. Gráfico de carga aplicada contra repeticiones, incluyendo desviaciones estándar.

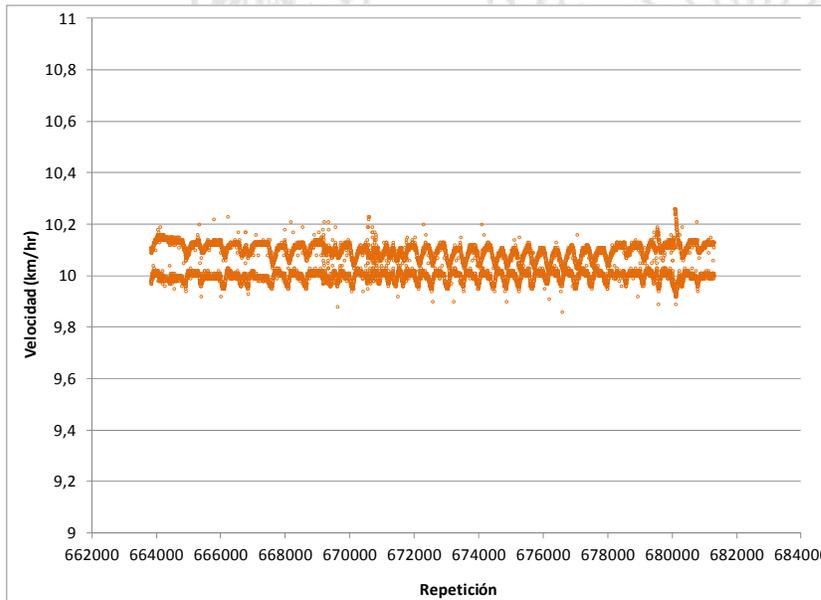


Figura 15. Gráfico de velocidad promedio de la rueda para cada repetición aplicada.

La temperatura del aire en el interior de la llanta y la presión de inflado son parámetros que no solo están relacionados pero que también afectan el desempeño del pavimento. Las figuras 16 y 17 muestran un ejemplo de los datos de temperatura y presión recolectados para cada repetición de carga.

Finalmente, como criterio de falla para detener el ensayo el HVS registrada la deformación para cada

repetición de carga aplicada como se muestra en la Figura 18, al igual que la ubicación lateral de las cargas aplicadas (Figura 19). Para este ensayo se aplicó una desviación lateral de 10 cm basado en experiencia internacional (5,6).

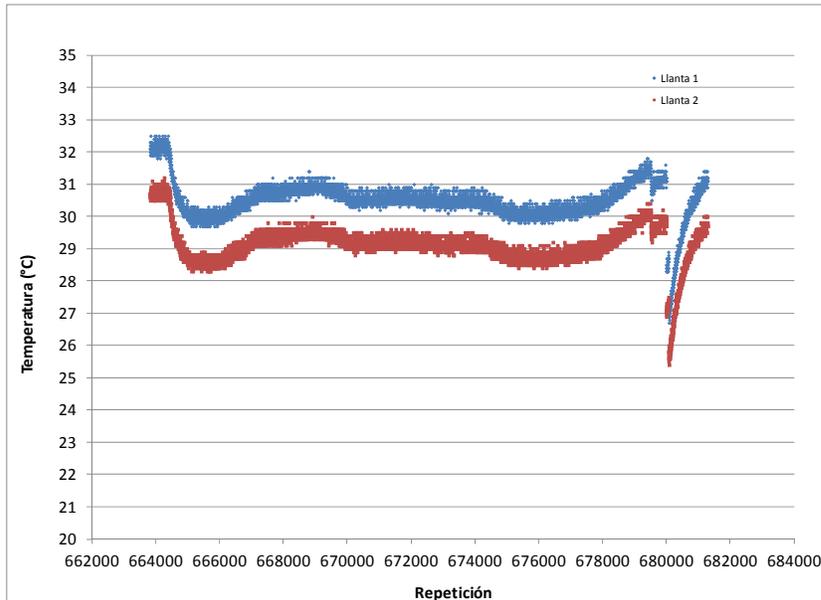


Figura 16. Gráfico de temperatura en las llantas de ensayo para cada repetición aplicada.

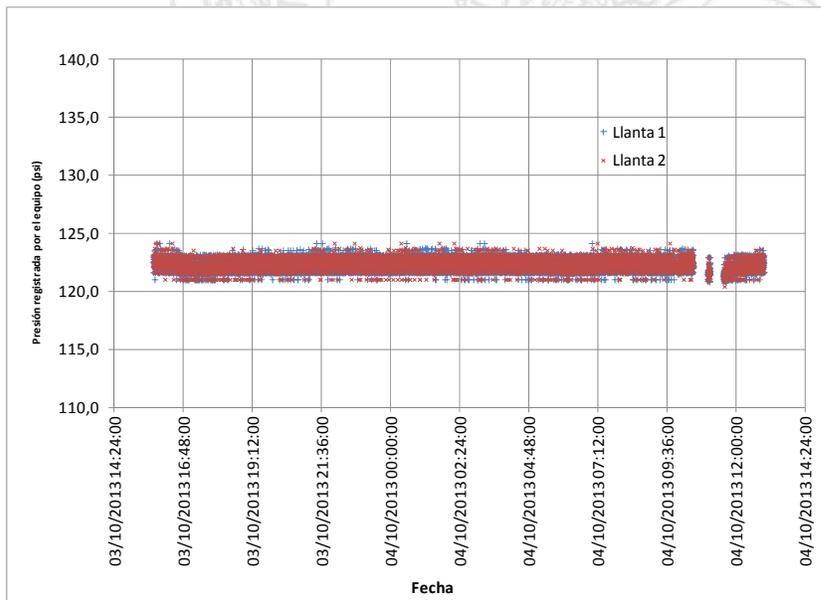


Figura 17. Gráfico de presión de aire en las llantas de ensayo para cada repetición aplicada.

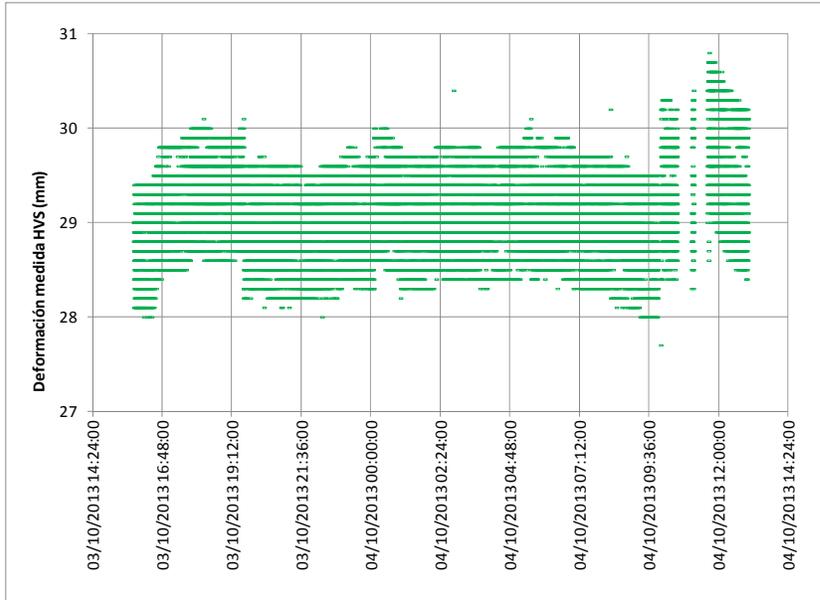


Figura 18. Gráfico de deformación registrada por el equipo para cada repetición aplicada (incluyendo deformación de la superficie, de la rueda y movimientos de ajuste del equipo).

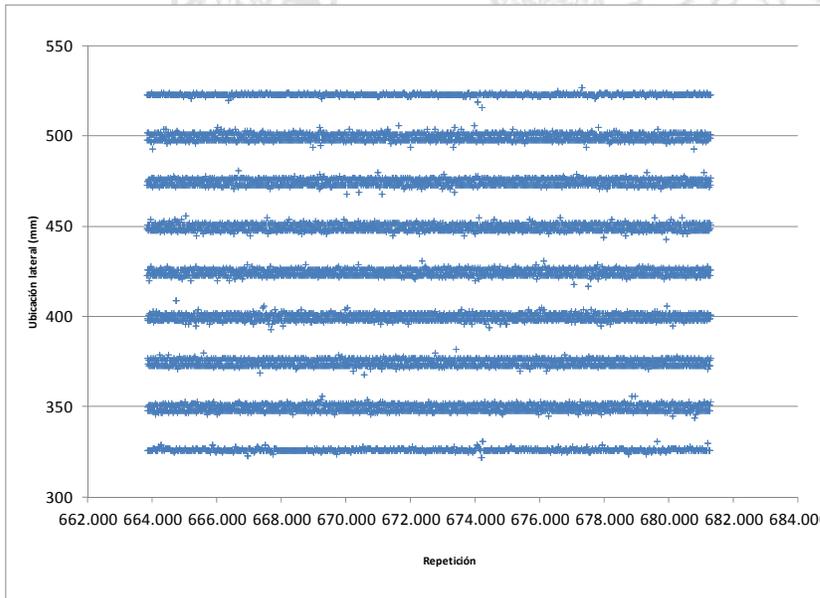


Figura 19. Gráfico de la ubicación lateral de las cargas para cada repetición aplicada.

4. RESULTADOS DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO COMPLEMENTARIO

A continuación se presentan los resultados procesados de los diferentes sensores instalados y equipo utilizado para obtener una respuesta mecánica en la primera pista de ensayo llamada AC1. Este primer tramo experimental consta de una carpeta asfáltica con un espesor promedio de 63 mm, seguido de una base estabilizada con cemento de 240 mm de espesor y 300 mm de subbase granular. La sección de pavimento completa tiene una longitud de 10 m por un ancho de 4.4 m y de aquí se dividió en 2 tramos experimentales: AC1 y una réplica. Tanto el tramo experimental AC1 como la réplica tienen una longitud de 8.15 m por un ancho de 1.1 m; ambos centrados en el sentido longitudinal con respecto a la sección de pavimento.

4.1 Deflectometría de Impacto

La Figura 20 muestra el promedio de 2 repeticiones de ensayo al mismo nivel de carga de 40 kN para las deflexiones medidas en los 9 sensores por cada estación utilizando el deflectómetro de impacto (FWD). Esto para la sección de pavimento donde se ubica el tramo experimental AC1.

Acá se observan deflexiones relativamente altas en los extremos de la sección. Cabe resaltar que este comportamiento se da en los sensores cercanos al plato de carga, lo cual es una indicación de que las deflexiones medidas se deben a la capacidad de soporte de las capas superiores y a la vez indica una heterogeneidad en las propiedades de los materiales de las respectivas capas. Por el contrario se observan valores de deflexión en los sensores más alejados del plato de carga relativamente uniformes a lo largo del tramo. Esto es una indicación de poca variabilidad en las propiedades de las capas inferiores.

Con el fin de validar las observaciones previas, existen además algunos indicadores con base en las medidas de deflexión que se usan a nivel internacional para cuantificar la capacidad del paquete estructural o las distintas capas. A saber, estos parámetros se conocen como: Índice Base de Curvatura (BCI por sus siglas en inglés), Índice Base de Daño (BDI por sus siglas en inglés) e Índice de Curvatura Superficial (SCI por sus siglas en inglés).

Los valores de BCI, BDI y SCI se definen matemáticamente de la siguiente forma:

$$BCI = D_5 - D_6 \quad Ec. 1$$

$$BDI = D_3 - D_5 \quad Ec. 2$$

$$SCI = D_1 - D_3 \quad Ec. 3$$

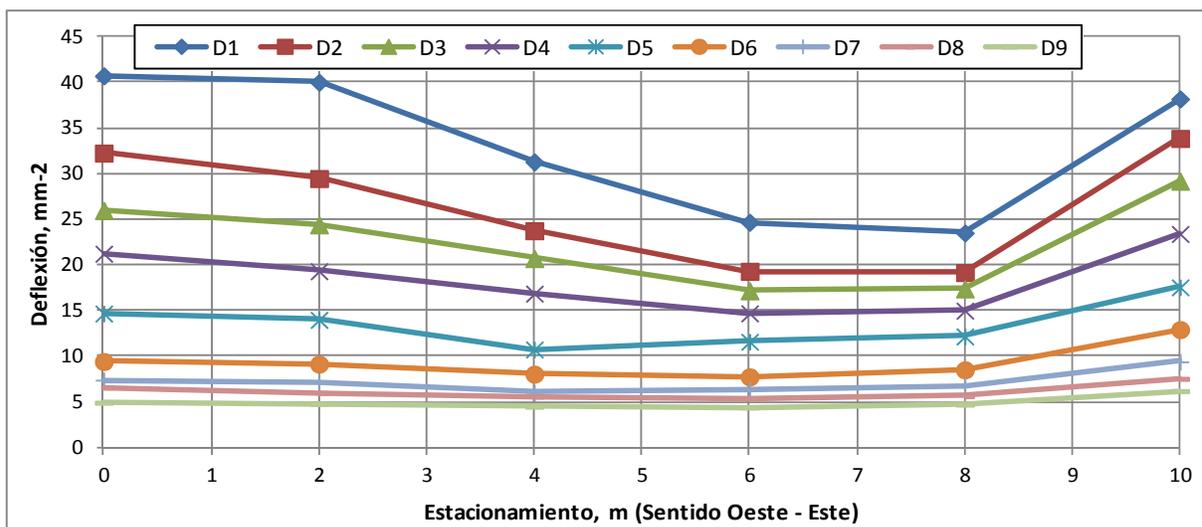


Figura 20. Resultados de ensayo de deflectometría de impacto.

En general se establece que valores altos de BCI y BDI corresponden a estructuras de pavimento con baja resistencia. Para bases estabilizadas con cemento, valores de BCI cercanos o mayores a 80×10^{-3} mm (10) indican potenciales deficiencias estructurales en las capas intermedias. Como puede observarse en la Figura 21 ninguno de los puntos supera este valor. Valores de BDI cercanos o mayores a 100×10^{-3} indican potenciales deficiencias estructurales en las capas de base y como es evidente de la Figura 21, los puntos localizados cerca de los extremos del tramo evaluado excedieron dicho límite. Finalmente, el parámetro SCI es indicativo de la capacidad de la capa asfáltica. Sin embargo, dicho valor es muy sensible al espesor de dicha capa. De la misma Figura 21 se puede observar que este indicador se encontró por debajo de 160×10^{-3} mm y con poca variabilidad, lo cual es una indicación de homogeneidad de la capas asfáltica a lo largo de la sección donde se realizaron los ensayos de deflectometría. Valores de SCI cercanos o mayores a 300×10^{-3} mm indican potenciales deficiencias estructurales en las capas superiores. Como puede observarse en la Figura 21 ninguno de los puntos supera este valor. Finalmente, en el caso de la deflexión D0, valores cercanos o mayores a 400×10^{-3} mm indican potenciales deficiencias estructurales del pavimento. En este caso se obtuvieron valores superiores a 400×10^{-3} mm al inicio del tramo.

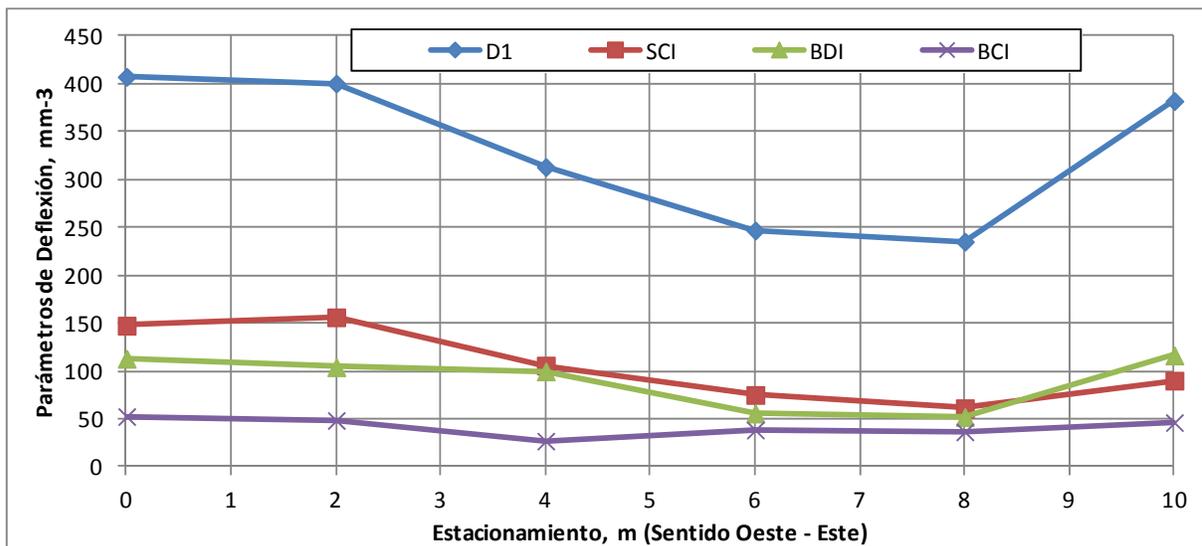


Figura 21. Parámetros de deflexión.

Típicamente, la capa de subrasante contribuye entre 60 a 80% con la deflexión obtenida directamente bajo la carga aplicada. Utilizando la teoría de Boussinesq es posible obtener un promedio ponderado de los módulos de una estructura equivalente al pavimento existente. Este valor resultante se conoce como módulo superficial que se puede calcular a lo largo de la curva de deflexión por medio la Ecuaciones 1 y 2.

$$M_s = 2\sigma_0(1 - \mu^2) \left(\frac{a}{d_0}\right) \text{ para } r = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

$$M_s = \sigma_0(1 - \mu^2) \left(\frac{a^2}{rd_r}\right) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde,

M_s = Módulo superficial

σ_0 = Esfuerzo de contacto bajo el plato de carga

μ = Módulo de Poisson (típicamente = 0.35)

a = radio del plato de carga

r = distancia radial

d_r = deflexión a la distancia r

d_0 = deflexión bajo el plato de carga

A partir del análisis de módulos superficiales se determinó que la subrasante se podía modelar como material infinito y lineal-elástico. Al mantener una relación módulo superficial y distancia radial del

plato de carga para los sensores más alejados como se muestra en la Figura 22 se descarta un comportamiento no-lineal y se descarta la influencia de manto rocoso o en este caso la influencia de la losa inferior del tramo experimental (10). El retrocálculo de módulos se realizó simulando una estructura de 4 capas, a saber: capa de subrasante con espesor infinito, subbase granular de 30 cm, base estabilizada con cemento de 24 cm y carpeta asfáltica de 6.3 cm. Los valores de módulo retrocalculados con el programa Elmod se muestran en la Figura 22. En promedio, el módulo de la capa asfáltica fue de 2826 MPa, el de la base estabilizada de 1004 MPa, y los módulos de la subbase y subrasante de 132 y 76 MPa respectivamente. Este último valor es cercano al valor promedio de módulo superficial de los sensores más alejados de 98 MPa, el cual es una aproximación al módulo de la subrasante. El comportamiento observado para la subbase granular se puede explicar por la baja compactación aplicada durante el proceso constructivo. El estacionamiento cero del tramo corresponde con la pared de la fosa donde se colocaron los materiales, donde no es posible usar el compactador de rodillo. Por el contrario, hacia el centro del tramo se realizó efectivamente la compactación deseada donde se obtuvieron valores de módulo esperados para este tipo de material.

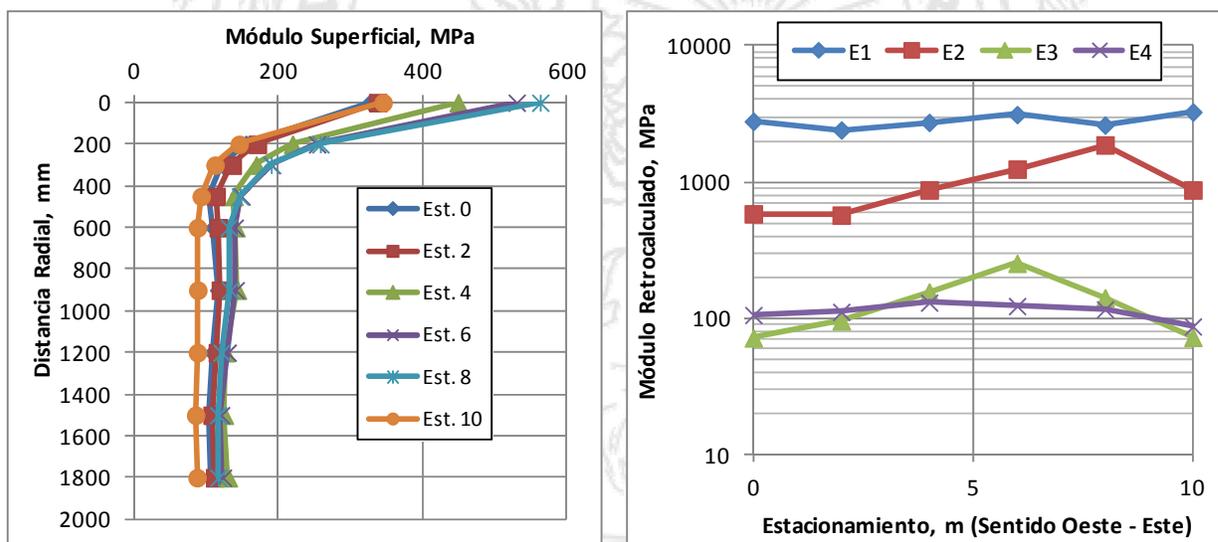


Figura 22. Análisis de módulos superficiales y retrocalculados.

Los valores de módulo resiliente medidos con el equipo LWD se muestran en la Tabla 2. Comparado con los valores retrocalculados utilizando el equipo FWD los valores medidos son significativamente mas bajos. Esto se atribuye a que estos resultados se obtuvieron durante el proceso constructivo, en donde los estados de esfuerzos y confinamiento de las capas granulares no tienen la influencia de os

materiales de las capas superiores. este fenómeno también se observa con la mayor variabilidad de resultados como se observa en la segunda columna de la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados deflectometría LWD

Material	Módulo Promedio, MPa	Rango Valores, MPa
Base Granular	24.7	12 - 47
SubBase Granular	21.9	13 - 35
SubRasante	8.2	4 - 16

4.2 Temperatura

La Figura 23 muestra la variación de la temperatura ambiente medida a una altura de 1.0 m sobre el primer tramo experimental en un período de 10 días. Estas lecturas se tomaron cada 2 minutos. Claramente se observan los ciclos de calentamiento y enfriamiento de las instalaciones del Pavelab cuya temperatura oscila entre 19.5 a 26.0 °C para este período mostrado. Para el ensayo completo se determinó que la temperatura mínima fue de 19.0 °C y la máxima de 27.3 °C para un período de 4 meses.

En la Figura 24 se muestran los valores de temperatura recolectados al momento de la toma de datos de los sensores. La temperatura ambiente fue la que mas variabilidad presentó al oscilar entre 21.5 a 26.7 °C. Por otro lado la temperatura medida a nivel de superficie del pavimento se mantuvo en el rango de 21.1 a 25.0 °C, mientras que la temperatura a la profundidad media de la carpeta asfáltica (CA) se registró entre 21.6 a 25.2 °C. Adicionalmente, la temperatura medida a nivel de interface CA/Base se encontró entre 21.7 y 24.9 °C; y a 5 cm dentro de la base entre 21.8 a 25.2 °C.

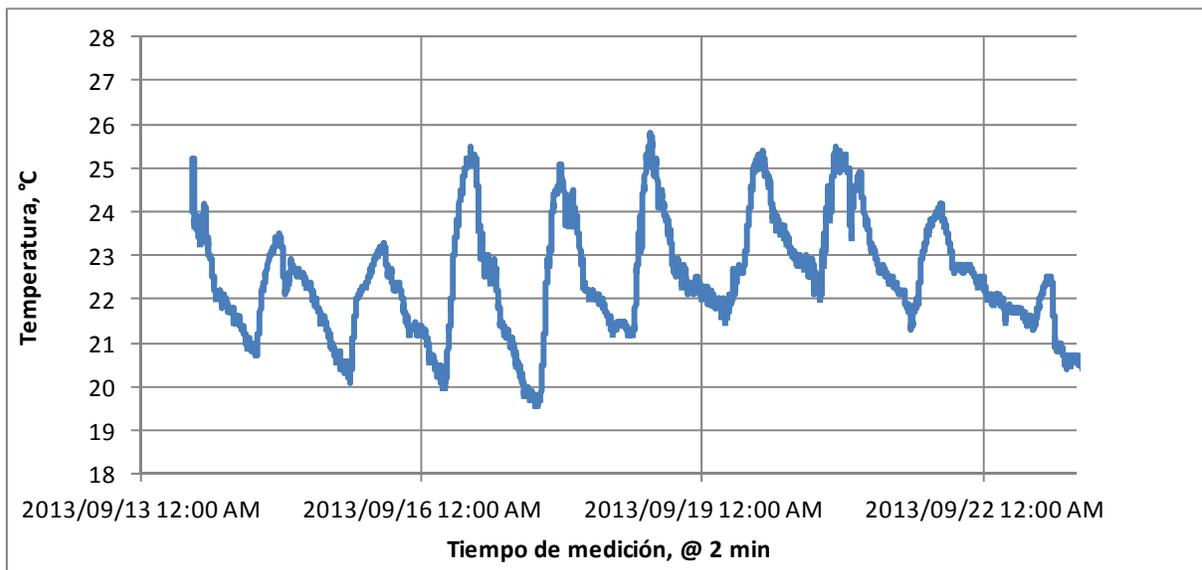


Figura 23. Registro de temperatura ambiente.

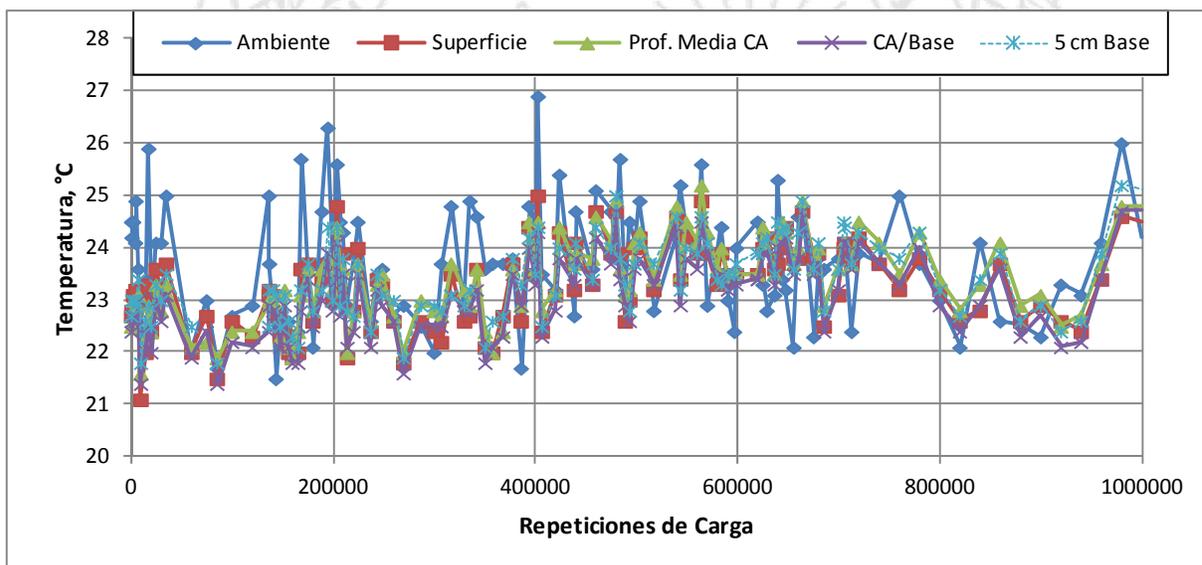


Figura 24. Temperatura de la estructura de pavimento.

4.3 Presión vertical

Los resultados obtenidos deben ser tratados para reducir el ruido propio de sistemas de recolección de datos. Para esto se procede a establecer primero una línea base a partir de datos que mantienen una pendiente constante a lo largo de una distancia definida como se muestra en la primera parte de la Figura 25. Seguido a esto se procedió a la reducción del ruido mediante la aplicación de una media

móvil de 10 datos con lo cual se obtiene el producto final mostrado en la segunda parte de la Figura 25. Cabe destacar que este tipo de tratamiento de los datos fue necesario para todos los sensores instalados en la estructura de pavimento.

Inicialmente la carga base establecida fue de 40 kN que corresponde a la carga de medio eje equivalente. Como es propio de estos ensayos acelerados se procedió a realizar diferentes incrementos de carga para acelerar el daño en la estructura. Específicamente, las cargas fueron 60, 70 y 80 kN. La Figura 26 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 subrasante. 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.

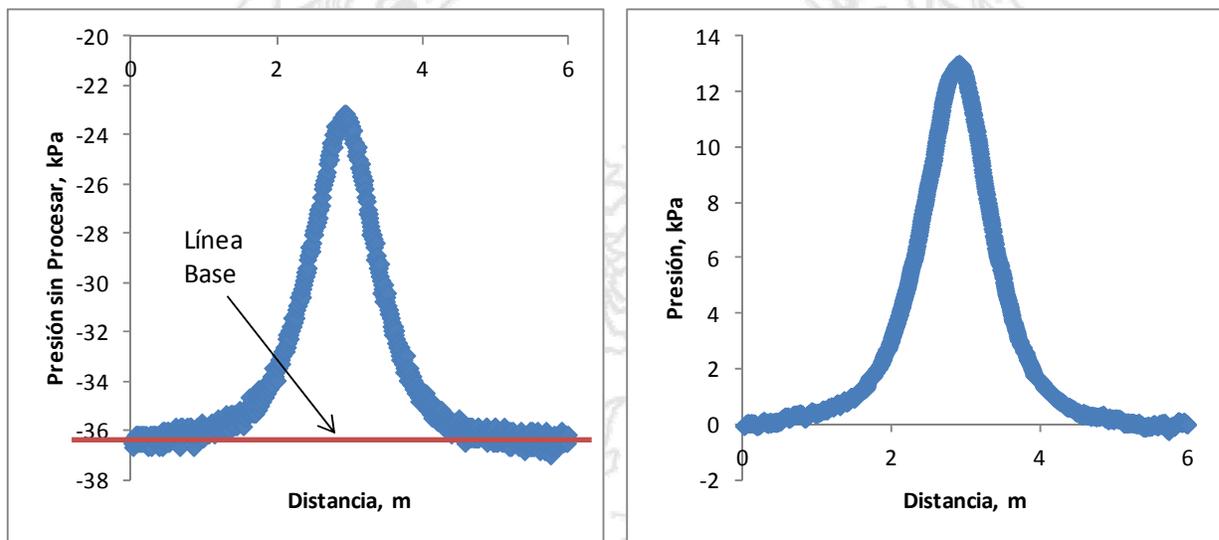


Figura 25. Ejemplo de procesamiento de datos.

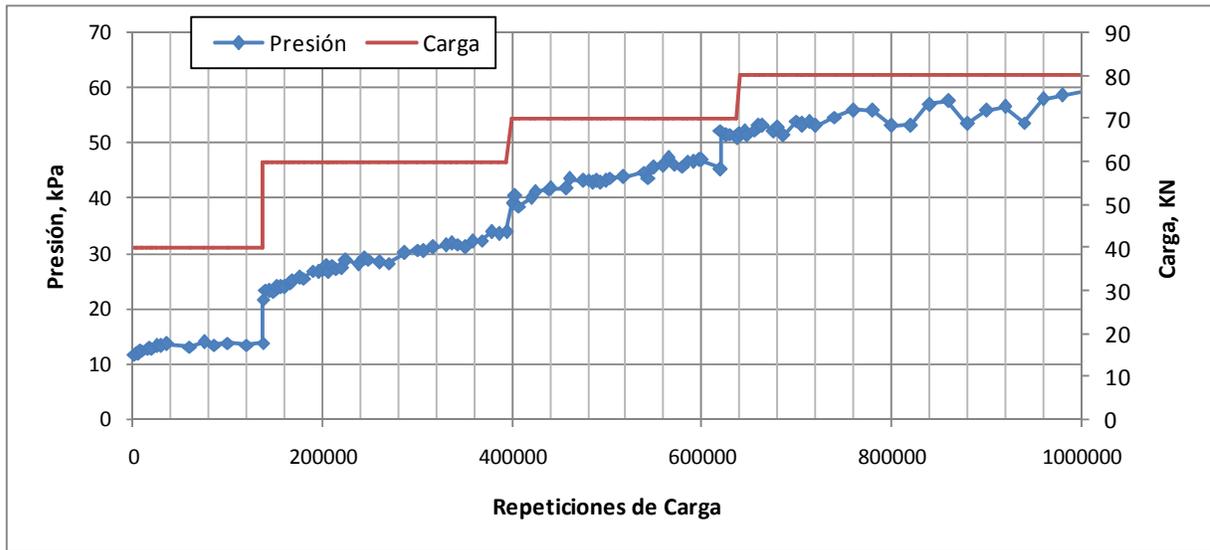


Figura 26. Presión vertical medido a nivel de subrasante.

4.4 Deformación permanente a nivel superficial

Una vez obtenido el perfil completo del tramo valuado efectivo, se realizó un proceso de depuración y tratamiento de los datos, se crearon gráficos de deformación permanente en sentidos longitudinal y transversal de la superficie durante las diversas etapas del ensayo. La Figura 27 muestra el segmento del tramo de estudio donde se obtiene el perfil tridimensional y un ejemplo del mismo. El tramo de estudio comprende 8.15 m de largo por 1.6 m de ancho. Se deja 1.0 m en ambos extremos como zona de aceleración/frenado para un total de 6.15 m efectivos de carga aplicada. De ahí, debido a la posición excéntrica del láser con respecto a la posición de la carga, se obtiene una longitud efectiva para el perfil superficial de 5.1 m.

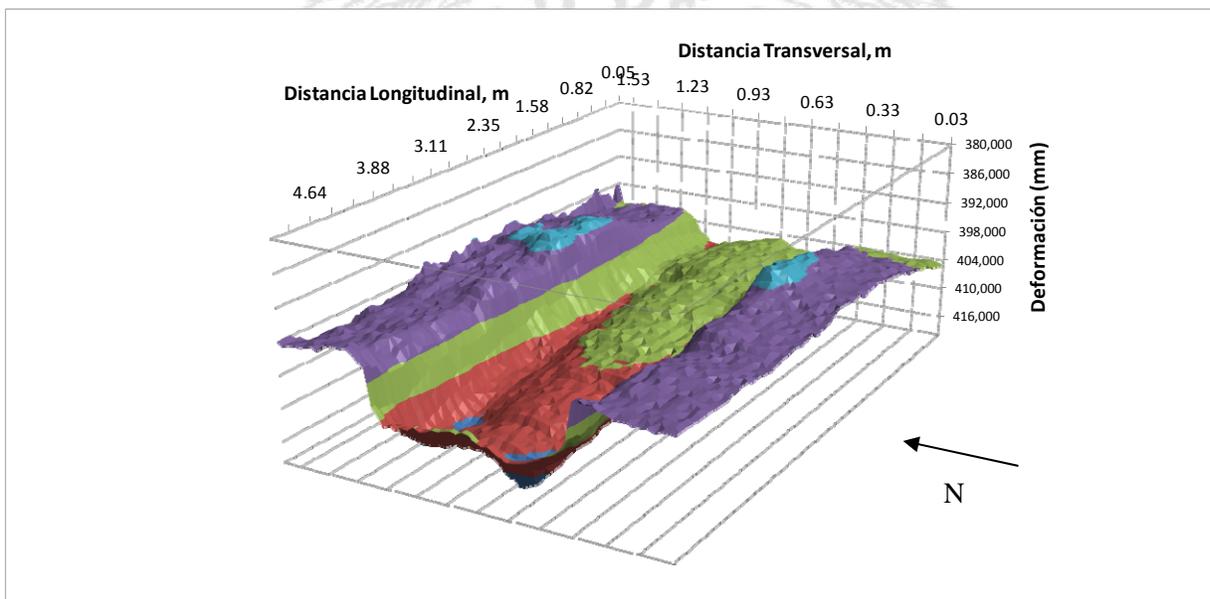
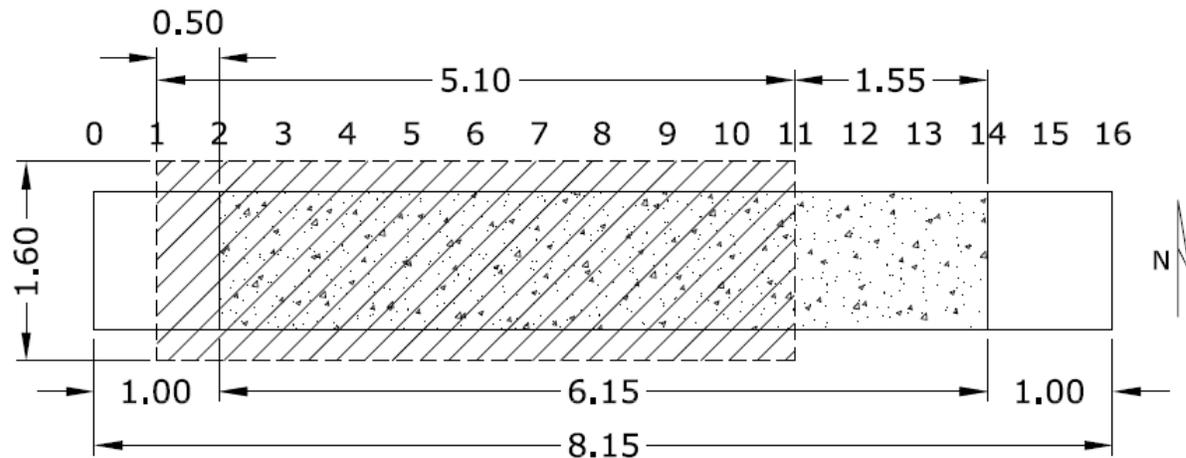


Figura 27. Perfil del tramo medido al final del ensayo.

La Figura 28 muestra el perfil de máxima deformación en el sentido longitudinal obtenida a partir del perfil tridimensional. Aquí se observa que la mayoría de la sección alcanzó el límite de falla establecido de 12.5 mm excepto por el segmento del tramo que corresponde a la sección donde se obtuvieron las deflexiones más bajas medidas con el FWD y valores más altos de módulo como se indicó en la sección 3.1.

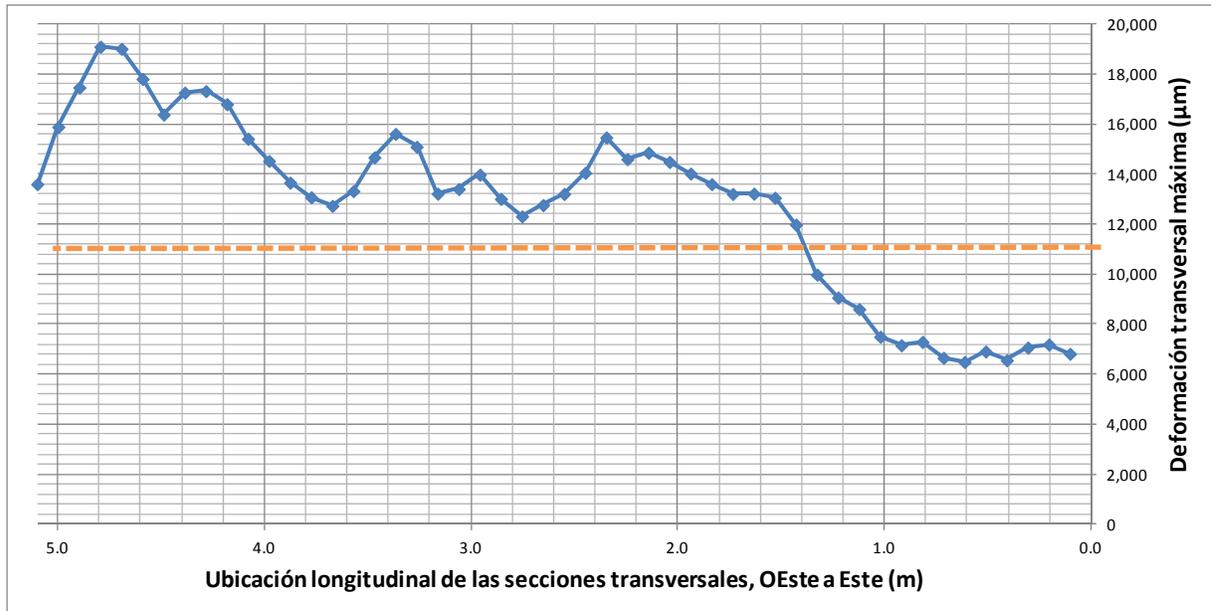


Figura 28. Deformación longitudinal máxima a 1.000.000 de repeticiones.

En la Figura 29 se exhiben secciones transversales promedio obtenidas a partir del perfil medido para diferentes niveles de repetición de carga. Aquí se observa no solo el efecto de consolidación de la estructura de pavimento sino también el desplazamiento lateral de la mezcla por los esfuerzos cortantes aplicados en la mezcla asfáltica.

La progresión de la deformación permanente a lo largo de las repeticiones de carga y sus respectivos ejes equivalentes de 40 kN se puede apreciar en la Figura 30. Esta figura incluye el valor de máxima deformación, el de mínima deformación y un valor representativo de la sección (seleccionado dentro del tercio medio del tramo) que se utiliza para controlar el avance diario de la deformación y para eventualmente detener el ensayo al alcanzar el criterio de falla. Para pasar de número de repeticiones con diferentes niveles de carga a cantidad de ejes equivalentes de carga se requiere de un factor de daño (Ecuación 3). El factor de daño utilizado para calcular los ejes equivalentes de 40 kN a partir de las otras cargas fue de 4.2. Este valor fue obtenido de experiencias de otros investigadores que han utilizado el mismo equipo y ensayo acelerado de pavimentos (5).

$$ESALS = \left(\frac{P_i}{40 \text{ kN}} \right)^{FD} \times R_i \quad \text{Ec. 3}$$

Donde;

ESALS = Cantidad de ejes equivalentes

P_i = Carga aplicada i

FD = Factor de daño

R_i = repeticiones aplicadas en la carga i

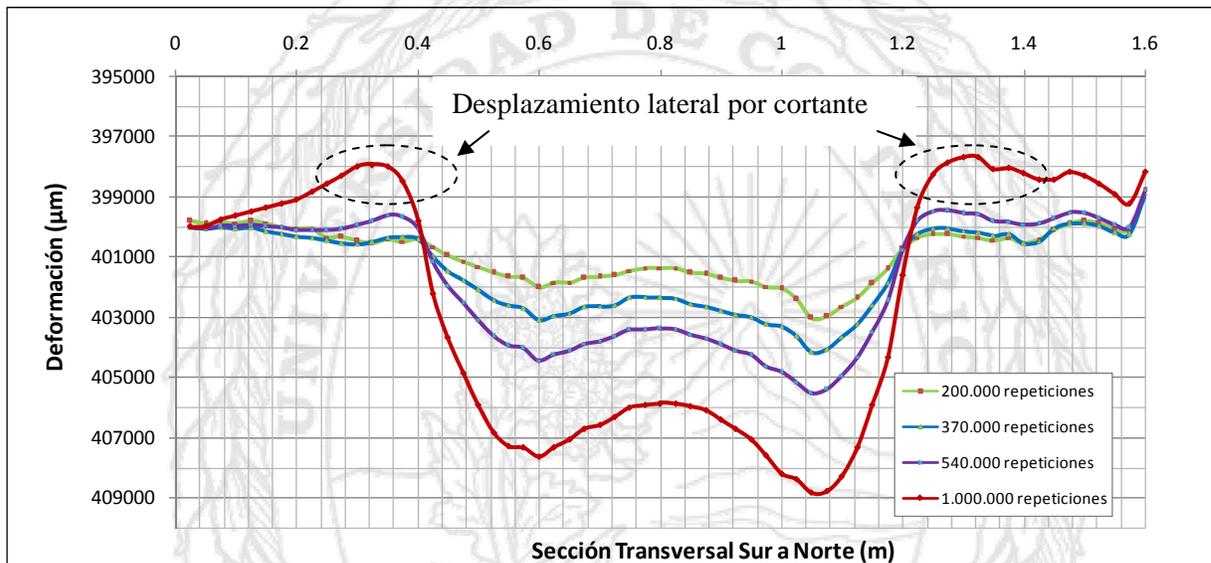


Figura 29. Deformación transversal promedio.

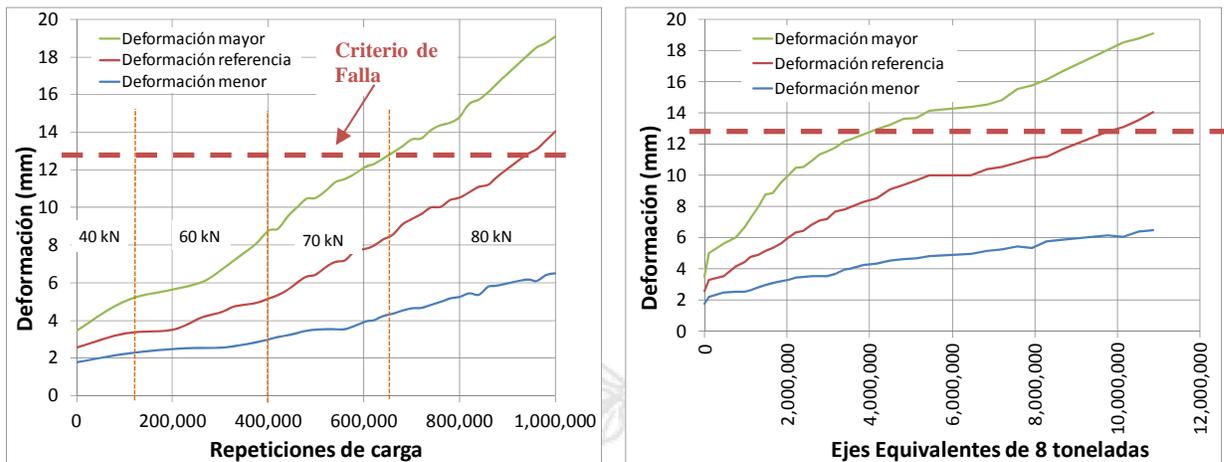


Figura 30. Deformación permanente en función de repeticiones y ejes equivalentes.

4.5 Regularidad superficial

La regularidad superficial se determinó mediante el parámetro llamado Índice de Regularidad Superficial (IRI). Mediante las lecturas de deformación longitudinal de la superficie, registradas con el sistema laser incorporado, se procedió a calcular el IRI del tramo de análisis para los diferentes momentos del desarrollo del ensayo. En la Figura 31 se aprecia cómo se modificó la regularidad de la superficie conforme avanzaron las repeticiones de carga y la respectiva asociación a los ejes equivalentes de carga.

Como se aprecia se parte de valores cercanos a 1.5, para luego disminuir ligeramente a 1.3 producto de la compactación causada por el paso inicial de la rueda, lo cual es típico del fenómeno de de deformación permanente en su primera etapa. Posteriormente con el incremento en repeticiones de carga la estructura avanzó en su deterioro mostrando un aumento en el valor de la regularidad superficial. Valga la pena señalar que los valores bajos del índice están asociados en alguna medida a la poca longitud del tramo.

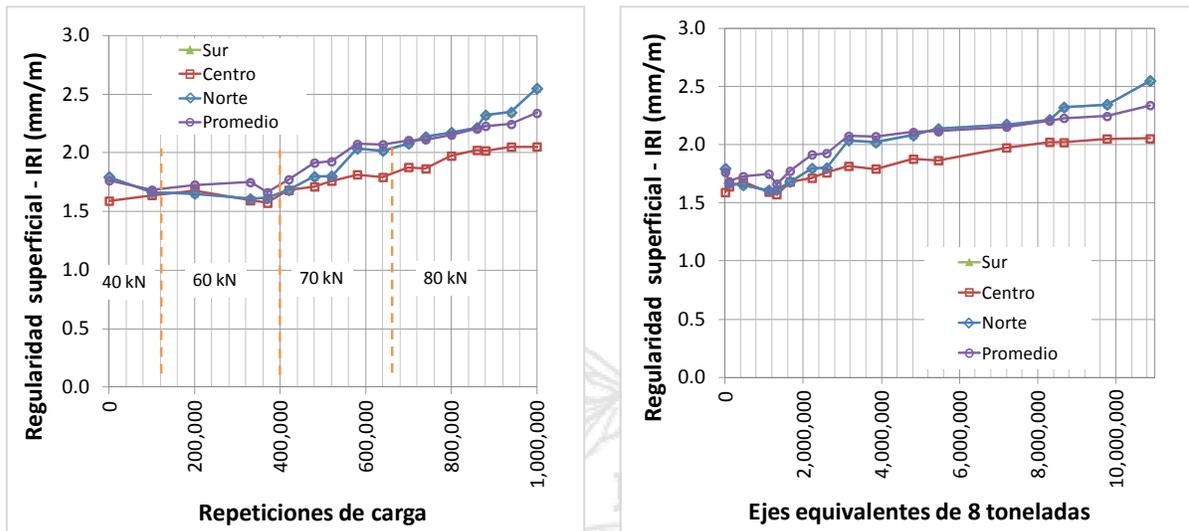


Figura 31. Regularidad superficial (IRI) en función de repeticiones y ejes equivalentes.

4.6 Deflexiones y deformaciones obtenidas con los sensores MDD

Los datos de deflexión elástica instantánea y deformación permanente para las diferentes capas a lo largo del ensayo se muestran en las Figuras 31 y 32. Estos valores obtenidos luego de un proceso de depuración y tratamiento de los datos fueron medidos para una carga de 40 kN. Al igual que en el caso de la presión vertical, un aumento en el nivel de deflexión instantánea para un mismo nivel de carga y temperatura relativamente constante es evidencia de daño acumulado. Para ambos arreglos de sensores MDD colocados en este primer experimento se observó la acumulación de daño para todas las capas siendo las capas superiores las más afectadas. En términos de deformación permanente 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.

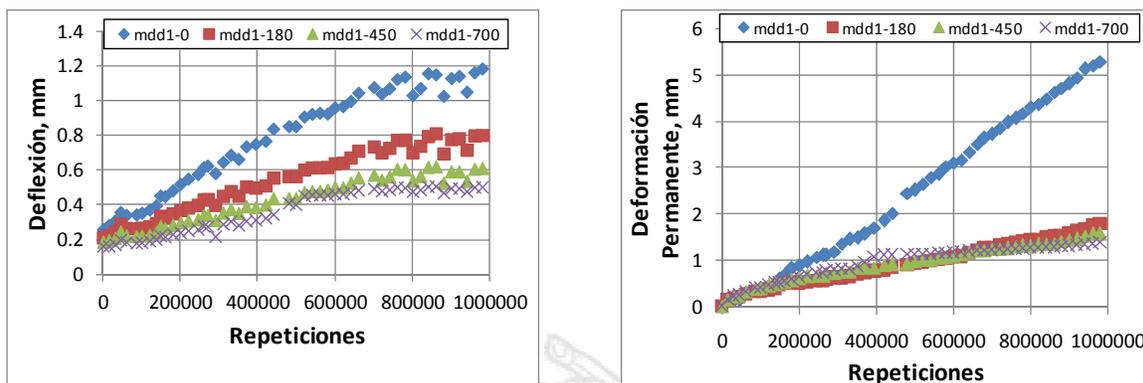


Figura 32. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor MDD1.

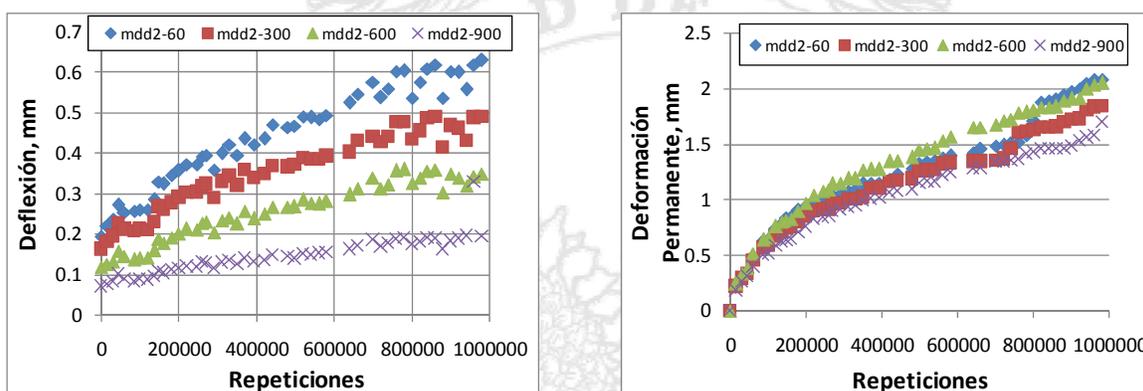


Figura 33. Deflexión instantánea y deformación permanente para arreglo sensor MDD2.

Los datos de deflexión elástica se pueden utilizar para determinar el módulo elástico efectivo de cada capa del pavimento. Esto se realizó aplicando el Método de Espesor Equivalente (11) mediante el cual se transforman los espesores de la estructura en una sola capa. Esta transformación se hace con la metodología de Odemark (Ecuación 4) y el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones se realiza con la teoría de Boussinesq. Para la determinación del módulo de la subrasante se considera su comportamiento no-lineal mediante la Ecuación 5. El valor suma cuadrado de los residuales (SSE en inglés) entre deflexiones medidas y calculadas fue utilizado como parametro de optimización del proceso de retrocálculo. Valores de SSE son una forma de cuantificar que porcentaje de los datos analizados el modelo no es capaz de explicar. Por lo tanto, entre más cercanos a cero sean los valores de SSE mejor es el proceso de estimación. El procedimiento de retrocálculo utilizado fue del tipo manual, lo que significa que para repetición de carga donde se recolectó información, se llevó a cabo este proceso de minimización del error con la ayuda de la herramienta "solver" de MS Excel.

$$h_{e,n} = f \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left(h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right) = f \left\{ \left[\left(h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} + h_2} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \right] \dots h_{n-1} \right\} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_n}}$$

Ec. 4

Donde,

E_i = Módulo de capa

h_i = espesor de capa

f = factor de ajuste de 1.0 para la primera interface y de 0.8 a 1.0 para las otras interfaces.

$$E_{SR} = C \times \left(\frac{\sigma_d}{0.1 MPa} \right)^n$$

Ec. 5

Donde,

E_{SR} = Módulo de la capa de subrasante

σ_d = Esfuerzo desviador

C y n = constantes de regresión

Para este primer experimento se realizó el retrocálculo manual de módulos basados en la deflexión máxima obtenida en cada sensor a las diferentes profundidades donde éstos fueron instalados y se consideró una carga uniformemente distribuida de 40 kN con una presión de contacto de 750 kPa. Adicionalmente se obtuvieron deflexiones a 30 cm del sensor con lo cual se tienen un total de 8 mediciones que fueron utilizadas para el proceso de retrocálculo de módulos (Figura 34). La idea de utilizar más de 4 medidas se presenta para mitigar potenciales problemas con los grados de libertad del proceso, donde se pretende obtener 5 propiedades de las diferentes capas (módulos de las capas asfáltica, base y subbase, mas parámetros de la subrasante C y n). En este caso, los valores de la suma cuadrado de los residuales entre deflexiones medida y calculada estuvieron entre 3.81 a 11.53 para el arreglo MDD2, Para el arreglo MDD1 fue más difícil obtener un comportamiento que siguiera la metodología planteada ya que los errores estuvieron entre 10 y 41.

Los módulos estimados mediante esta metodología se muestran en las Figuras 35 y 36 para los arreglos MDD2 y MDD1. Para el caso del arreglo MDD2 se observa como la base estabilizada presenta la mayor acumulación de daño al tener una mayor razón de cambio (pérdida) en su módulo. De igual forma se observa como el módulo de la capa asfáltica y el módulo de la subbase presentan cambios bajos, indicación de menor daño acumulado. Finalmente, se observa como el procedimiento provee una buena estimación de las deflexiones máximas con resultados cerca y sobre la línea de igualdad para el arreglo MDD2.

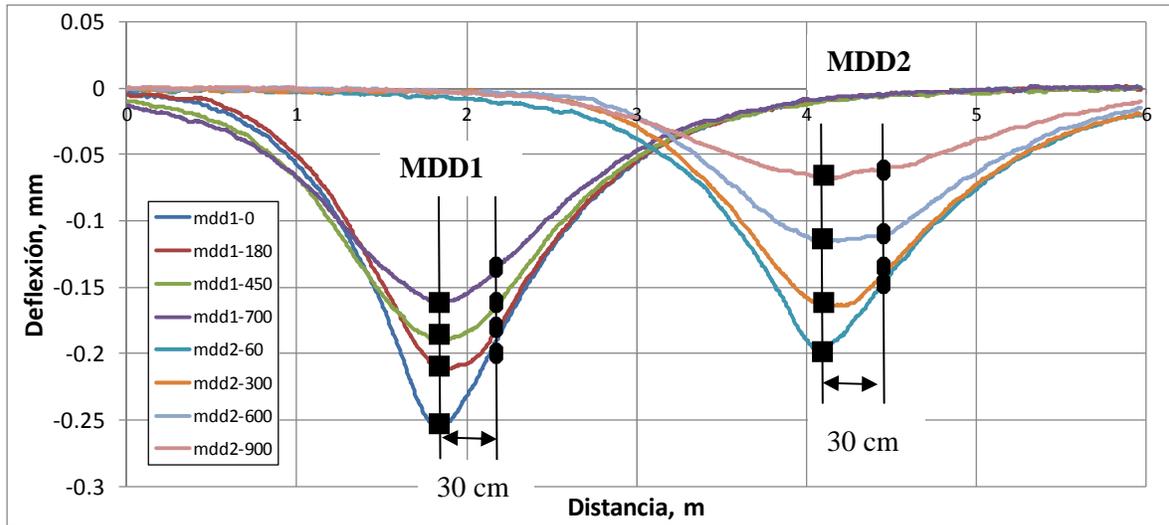


Figura 34. Selección de deflexiones para proceso de retrocálculo.

Para el arreglo MDD1 el parámetro "n" de la subrasante fue de cero para el 95% de los casos analizados con valores hasta -0.08 especialmente entre las primeras 100 mil repeticiones. De igual forma se observa como la base estabilizada presenta la mayor acumulación de daño al tener una mayor razón de cambio (pérdida) en su módulo hasta un punto alrededor de los 440 mil repeticiones donde se consideró que la vida útil del material estabilizado había terminado al presentar una pérdida de su módulo inicial superior al 50%. A partir de este punto y siguiendo los pasos de la Guía de Diseño de Africa del Sur (12) se trató la base estabilizada como base granular y esta capa, junto con la subbase se analizaron como una sola capa. Como resultado de errores mas altos en la estimación se observa una mayor variabilidad y desviación de las deflexiones estimadas en relación a la igualdad como se muestra en la Figura 36. El siguiente paso a seguir para mejorar la estimación y obtener propiedades de los materiales para el arreglo MDD1 será con la inclusión de respuestas medidas en otros puntos a lo largo de la curva de deflexión y la utilización de metodologías automatizadas programadas a partir de resultados de teorías de viscoelasticidad y Elemento Finito. Esto se presentará en un siguiente informe.

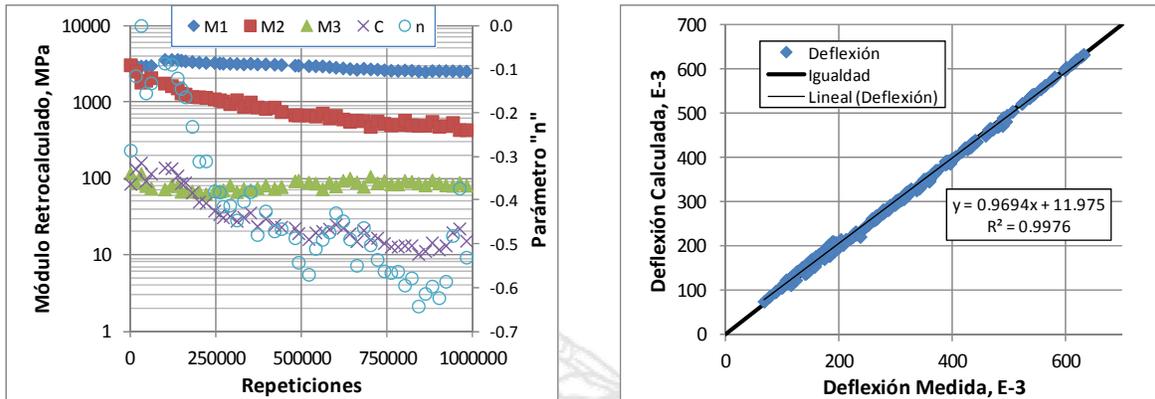


Figura 35. Retrocálculo de módulos a partir de arreglo sensor MDD2.

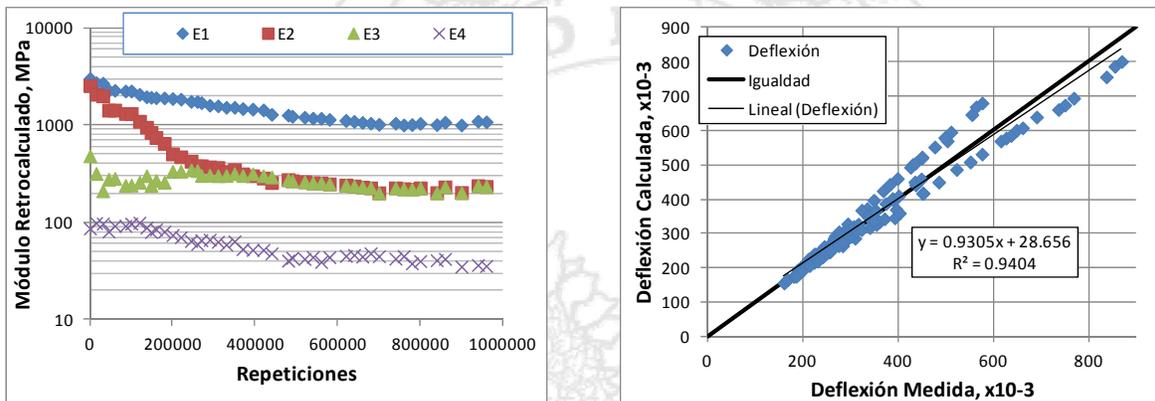


Figura 36. Retrocálculo de módulos a partir de arreglo sensor MDD1.

4.7 Deflexiones superficiales obtenidas con el equipo RSD

El deflectómetro de superficie del pavimento (RSD) se utilizó para medir deflexiones y posteriormente determinar módulos de las diferentes capas del pavimento en otras ubicaciones a lo largo del tramo. La Figura 36 muestra la progresión de la deflexión máxima medida para 4 puntos localizados en los extremos del tramo. Se observa como el daño acumulado es mayor hacia el extremo Oeste del tramo lo cual coincide con altas deflexiones medidas con el deflectómetro de impacto y por ende bajos módulos.

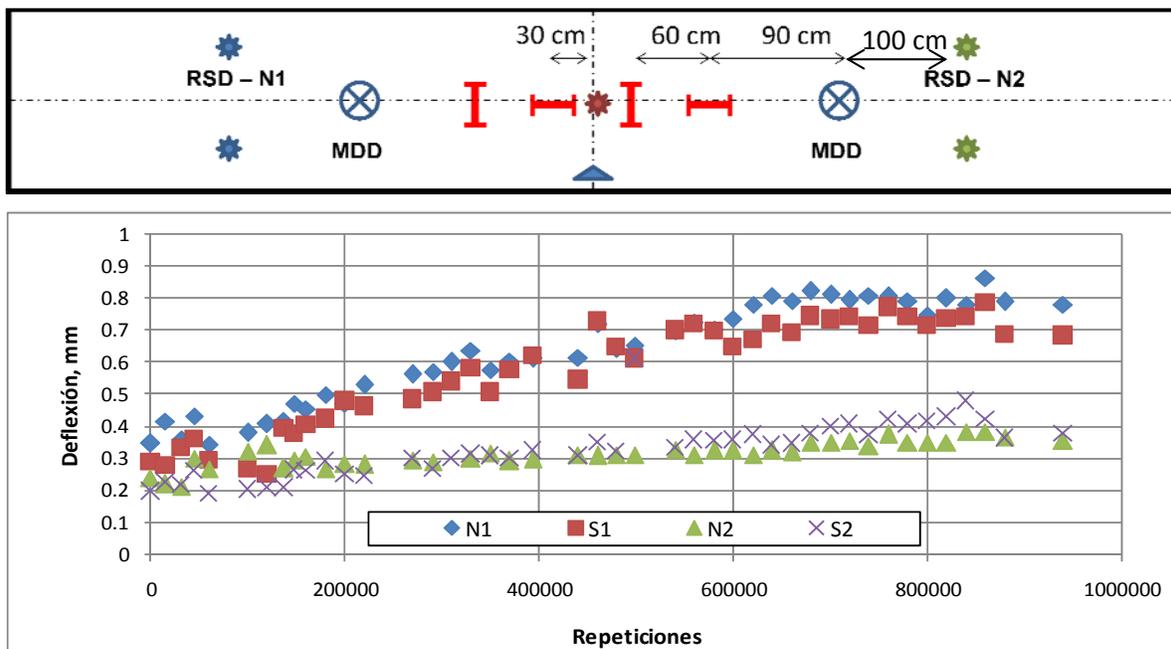


Figura 37. Deflexión instantánea obtenida con el equipo RSD.

Los datos de deflexión instantánea obtenidas con el equipo RSD también fueron utilizados para determinar el módulo elástico efectivo de cada capa del pavimento. Esto se realizó mediante la aplicación del Método de Espesor Equivalente mediante el cual se transforman los espesores de la estructura en una sola capa. Esta transformación se hace con la metodología de Odemark (Ecuación 1) y el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones se realiza con la teoría de Boussinesq. Para la determinación del módulo de la subrasante se considera su comportamiento no-lineal mediante la Ecuación 2. Al igual que en el proceso de retrocálculo para los arreglos MDD se consideró una carga uniforme distribuida de 40 kN con una presión de contacto de 750 kPa.

En este caso se llevó a cabo primero el tratamiento de los datos como se mencionó anteriormente y luego se extrajeron deflexiones a distancias, desde el punto de máxima deflexión, iguales al arreglo utilizado en el FWD (0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 mm). Con estos 9 puntos de deflexión se realizó el retrocálculo de módulos y los resultados se muestran en la Figura 38. Dado que las deflexiones entre puntos N1-S1 y N2-S2 son muy similares sólo se muestran los resultados de los puntos S1 y S2. Al igual que en el caso anterior se observa como la base estabilizada presenta la mayor acumulación de daño al tener una mayor razón de cambio (pérdida) en su módulo. De igual forma se observa como el módulo de la capa asfáltica presenta cambios bajos y por otro lado se obtuvo una mayor variabilidad en los módulos de la subbase y la subrasante. Sin embargo, en este caso la constante

"n" de no-linealidad de la subrasante presentó menos variabilidad con valores entre 0.0 a -0.47 (ver Anexos) con un valor promedio de -0.18. Finalmente, se observa como el procedimiento provee una buena estimación de las deflexiones máximas con resultados cerca y sobre la línea de igualdad en la Figura 38. En este caso, los valores de la suma cuadrado de los residuales entre deflexiones medida y calculada estuvieron entre 0.47 y 4.91.

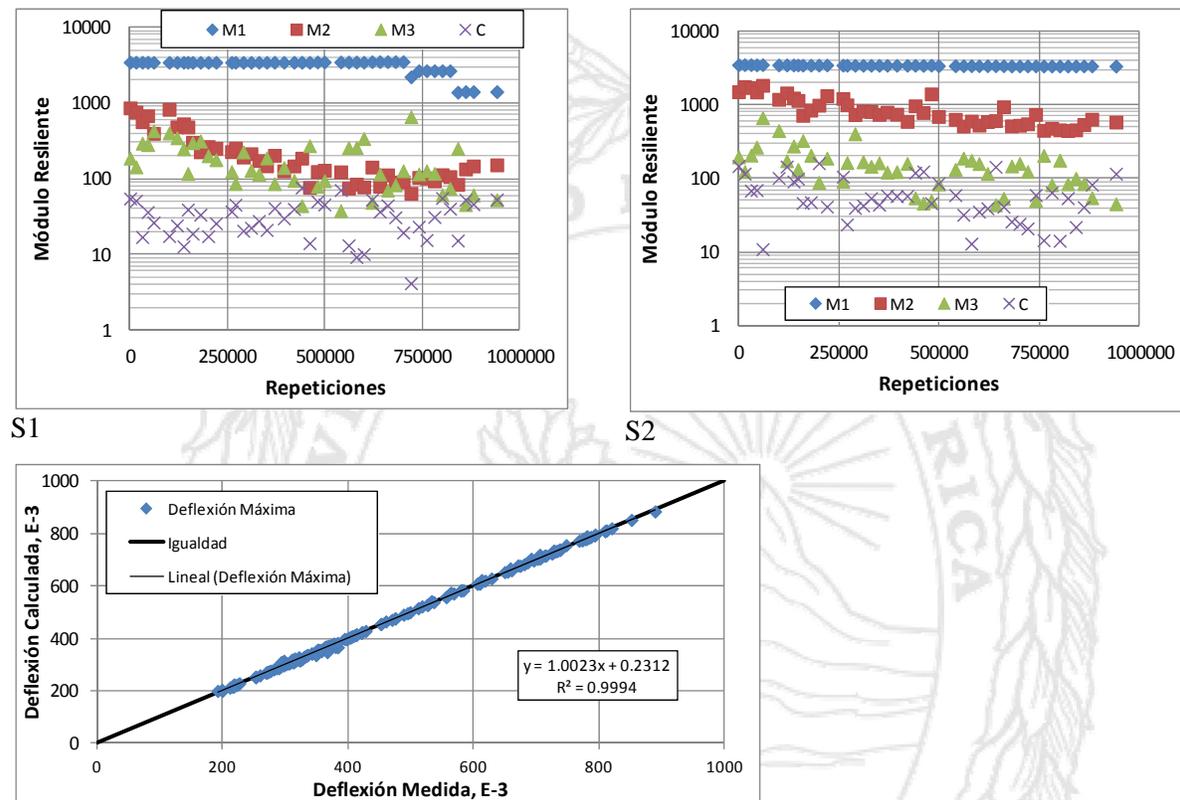


Figura 38. Retrocálculo de módulos a partir de resultados RSD.

4.8 Determinación de espesores

Una vez finalizada la construcción de los tramos experimentales se utilizó el radar de penetración para determinar los espesores de cada capa. Como se muestra en la Figura 39, se determinó que el espesor promedio de la capa asfáltica para las secciones AC1 y AC2 es de 5,1 cm y de 13,1 cm para las secciones AC3 y AC4. Por otro lado el material de base granular y base estabilizada para las secciones AC1 y AC2 fue en promedio 18.0 cm y 21.2 cm respectivamente. Para las secciones restantes se obtuvo 31,0 cm de base granular y 24,9 cm de base estabilizada. Finalmente se calculó el espesor promedio de la sub-base granular de 30,1 cm. Estos resultados fueron obtenidos con un grado de

confiabilidad alta debido a la presencia de placas de cobre colocadas en las interfaces de las distintas capas como se observa en la Figura 39. El espesor medido en cada placa es el más exacto posible debido a que la señal se refleja completamente en el cobre y por ende se utiliza para calibración del equipo para la estimación de espesores y la constante dieléctrica de las capas.

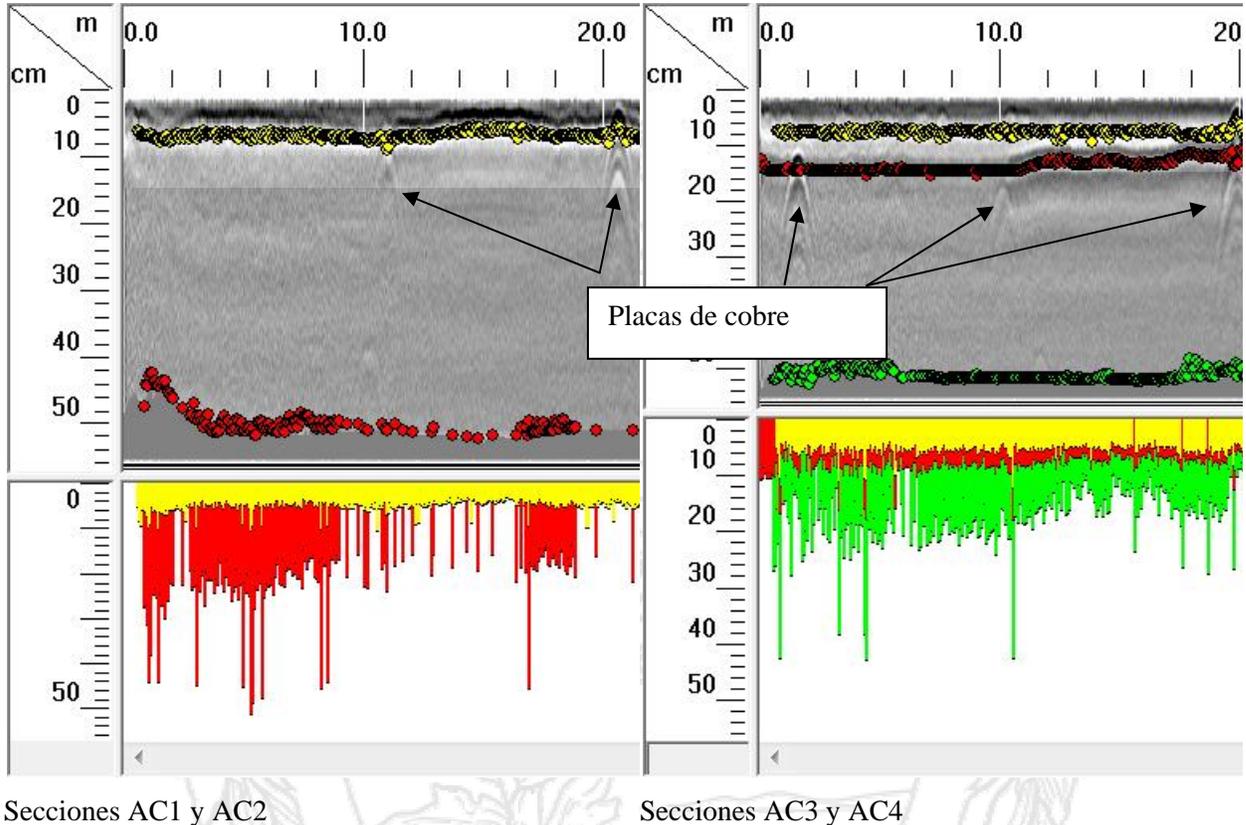


Figura 39. Espesores obtenidos con radar de penetración (GPR).

5. PRODUCTOS ESPERADOS

El uso del HVS será fundamental en asegurar un gran avance en cuanto al nivel de investigación realizado por el LanammeUCR en el tema de ingeniería vial y por medio del cual se posibilitará la generación de una serie de productos generales tales como:

- Metodología de diseño mecánica - empírica de pavimentos, basándose en las condiciones de materiales, climáticas, de tráfico y constructivas reales de Costa Rica.

- 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.
- Desarrollo de nuevas especificaciones de materiales que se basen en el desempeño real y aporte estructural de los materiales en campo.
- 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.
- Posibilidad de evaluación de materiales mejorados o nuevos materiales en una estructura de pavimento real.
- 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 posible deficiencias en la misma.

Dentro de los productos específicos esperados de los resultados de este informe se incluyen:

- Modelos de desempeño preliminares para las diferentes capas del pavimento.
- Junto con la caracterización en laboratorio de los materiales y modelación mecánica de la estructura se espera realizar una verificación y calibración entre la teoría y los resultados de campo.
- Desarrollo de modelos de retrocálculo de módulos con la metodología empleada en este informe mejorados y automatizados.
- Publicaciones científicas.

6. CONCLUSIONES

Cabe resaltar que este es un informe inicial, no profundo, de los resultados del primer tramo evaluado en el Pavelab. Como se menciona al principio del documento, este es un informe de primer nivel (de acuerdo con las recomendaciones del CSIR) donde se incluyen los resultados procesados y análisis básicos para ser usados en investigaciones y desarrollos mas complejos.

La instrumentación de pavimentos ha demostrado ser una herramienta eficiente para investigar el comportamiento al interior de estas estructuras. El manejo de la información recolectada a partir de esquemas de instrumentación permite identificar el cambio de las condiciones estructurales y

climáticas de la estructura a lo largo de su vida útil. Con este conocimiento es posible desarrollar, entre otras cosas, modelos mecánicos de desempeño y deterioro, los cuales pueden ser eficientemente empleados para revisar y mejorar los procedimientos de diseño, construcción y gestión de pavimentos, con el objetivo de promover la consecución de estructuras más durables y confiables. Así mismo, esta información se puede emplear para calibrar y/o validar parámetros de entrada requeridos en las nuevas y cada vez más populares metodologías mecanicistas de diseño de pavimentos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Metcalf, J. B. (1996). NCHRP Synthesis of Highway Practice 235.
2. Timm, D. (2009). NCAT Report 09-01 Design, Construction And Instrumentation Of The 2006 Test Track Structural Study, NCAT.
3. Baker Harris B., Buth Michael R., Van Deusen David A. (1994) Minnesota Road Research Project: *Load response Instrumentation Installation and Testing Procedures*. Minnesota Department of Transportation.
4. Leiva-Villacorta, F. and D. Timm, (2011) *Analysis of Measured Versus Predicted Critical Pavement Strain Responses*, Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board, Washington, D.C.
5. Harvey, J. T., L. du Plessis, F. Long, S. Shatnawi, C. Scheffy, B-W. Tsai, I. Guada, D. Hung, N. Coetzee, M. Reimer, and C. L. Monismith. (1996) *Initial CAL/APT Program: Site Information, Test Pavement Construction, Pavement Materials Characterizations, Initial CAL/APT Test Results, and Performance Estimates*. Report prepared for the California Department of Transportation. Report No. RTA-65W485-3. Pavement Research Center, CAL/APT Program, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley.
6. Harvey, J. T., Hoover, T., Coetzee, N. F., Nokes, W. A., and Rust, F. C. *Caltrans Accelerated Pavement Test (CAL/APT) Program—Test Results: 1994–1997*. AAPT Symposium on Accelerated Pavement Testing, Boston, MA, March 16-18, 1998.
7. Heavy Vehicle Simulator. *Monitoring of test sections and instrumentation*. Documento consultado el 6 de abril del 2010. <http://www.gautrans-hvs.co.za/>
8. 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.

9. Leiva, Aguiar y Loría. *Ensayos Acelerados De Pavimentos En Costa Rica*. Revista Infraestructura Vial, Vol 15 (#26), 33-41. San José Costa Rica, 2013.
10. Horak, E. 2008. *Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering Volume 52 0 Number 2.
11. Ullidtz, P., (1987), *Pavement Analysis, Development in Civil Engineering*, Vol.19, Amsterdam, the Netherlands.
12. Theyse, H.L., *Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method*, South African Transport Conference, July 2000.



ANEXOS

Tabla A1. Deflexión máxima sensores MDD

Repetición	mdd1-0	mdd1-180	mdd1-450	mdd1-700	mdd2-60	mdd2-300	mdd2-600	mdd2-900
23	256.5	212.4	189.2	162.3	190.8	159.1	114.3	67.0
15016	283.6	224.7	194.8	160.9	217.8	180.6	122.9	77.1
31022	309.5	245.3	207.3	168.2	250.9	205.8	145.6	98.8
45023	356.9	286.1	243.5	197.9	269.1	224.2	155.6	96.3
60019	340.6	265.8	222.2	183.2	250.4	209.5	140.5	86.9
86019	360.6	276.7	228.8	191.1				
100021	354.3	268.3	220.2	181.5	259.1	211.3	138.6	87.2
120022	371.3	275.9	224.8	186.5	262.2	211.5	141.6	87.9
137016	396.2	294.4	240.9	199.3	282.6	228.2	155.7	96.8
148007	452.3	334.9	272.9	223.9	325.5	264.2	182.4	105.9
160010	451.6	323.8	263.1	214.4	321.7	257.6	173.3	102.8
180015	485.2	349.2	282.3	231.1	346.0	276.9	190.2	110.7
200011	522.5	368.6	296.7	242.0	356.3	288.8	197.9	112.1
220013	551.3	382.8	307.1	249.8	367.6	298.8	206.3	116.6
245033	575.9	398.6	316.7	258.2	372.3	302.9	209.8	116.9
260010	615.3	426.1	337.2	275.1	391.9	318.5	224.1	125.0
270017	626.3	430.7	340.0	275.6	396.5	322.1	229.2	126.1
290021	636.7	436.5	339.5	274.8	393.3	315.6	222.9	123.3
310012	648.1	449.7	353.3	287.9	398.7	326.1	231.2	126.1
330010	690.3	476.8	374.5	302.7	420.8	344.6	240.7	136.2
350015	661.0	450.1	350.2	283.6	393.4	316.3	222.4	122.6
370020	736.0	503.2	390.5	306.0	433.4	351.8	250.0	135.5
394011	749.5	497.9	388.5	311.6	421.7	339.0	238.2	131.2
420023	767.9	510.8	401.2	323.3	434.7	348.9	247.8	134.1
440014	836.4	554.7	436.6	348.7	464.3	369.4	265.7	144.7
480019	854.0	563.5	435.2	393.0	463.3	364.1	262.6	141.9
490011	868.5	576.3	448.3	403.0	465.9	368.1	266.0	140.5
520008	906.8	603.3	472.7	404.0	489.0	388.1	283.5	150.1
540011	936.7	628.2	489.8	412.0	489.6	386.3	277.0	149.1
560015	918.2	605.1	472.3	403.6	490.3	389.4	278.4	152.3
580015	926.0	623.5	484.2	407.4	495.2	388.4	278.0	152.9
599013	956.2	633.2	498.7	413.0	488.7	395.0	276.6	157.3
620014	966.1	640.3	501.8	413.1	505.3	386.8	286.5	157.5
640021	996.8	671.9	526.4	423.6	521.9	404.6	298.0	163.5
660028	1043.8	708.7	557.6	435.4	542.7	429.8	314.7	170.2
680015	860.8	583.1	455.9	400.0	536.4	424.9	300.9	167.5
700017	1075.0	735.3	575.1	443.3	574.1	438.8	335.7	180.5
720011	1037.8	702.7	544.3	430.9	537.8	426.3	308.5	166.9
740009	1070.5	726.6	564.0	438.1	562.3	441.8	324.1	174.6
760013	1123.1	775.0	604.0	453.6	599.9	480.5	358.1	186.6
780013	1137.5	774.7	601.7	450.7	598.5	478.2	358.2	188.2

Tabla A1 (continuación). Deflexión máxima sensores MDD

Repetición	mdd1-0	mdd1-180	mdd1-450	mdd1-700	mdd2-60	mdd2-300	mdd2-600	mdd2-900
800012	1029.8	700.9	538.0	428.3	539.8	431.5	317.7	171.5
820021	1073.9	740.3	566.4	437.4	579.3	457.6	340.9	180.5
840011	1156.2	797.0	615.1	455.1	609.8	483.3	359.2	188.5
860009	1150.6	811.2	618.7	457.1	613.7	487.2	359.9	189.8
880017	1027.0	697.1	525.4	420.5	534.9	415.3	303.7	160.2
900017	1132.3	779.4	591.4	445.8	599.6	470.5	346.2	181.9
920018	1144.3	780.7	591.2	445.6	597.4	466.7	342.0	182.6
940018	1050.9	716.6	539.8	426.8	554.8	430.4	313.5	182.4
960011	1163.1	802.7	606.0	453.4	617.9	487.4	347.3	236.5
980013	1183.7	807.2	611.2	455.5	626.4	489.8	349.1	193.1
1000017	1185.6	822.0	623.1	445.9	630.5	493.3	349.3	202.1

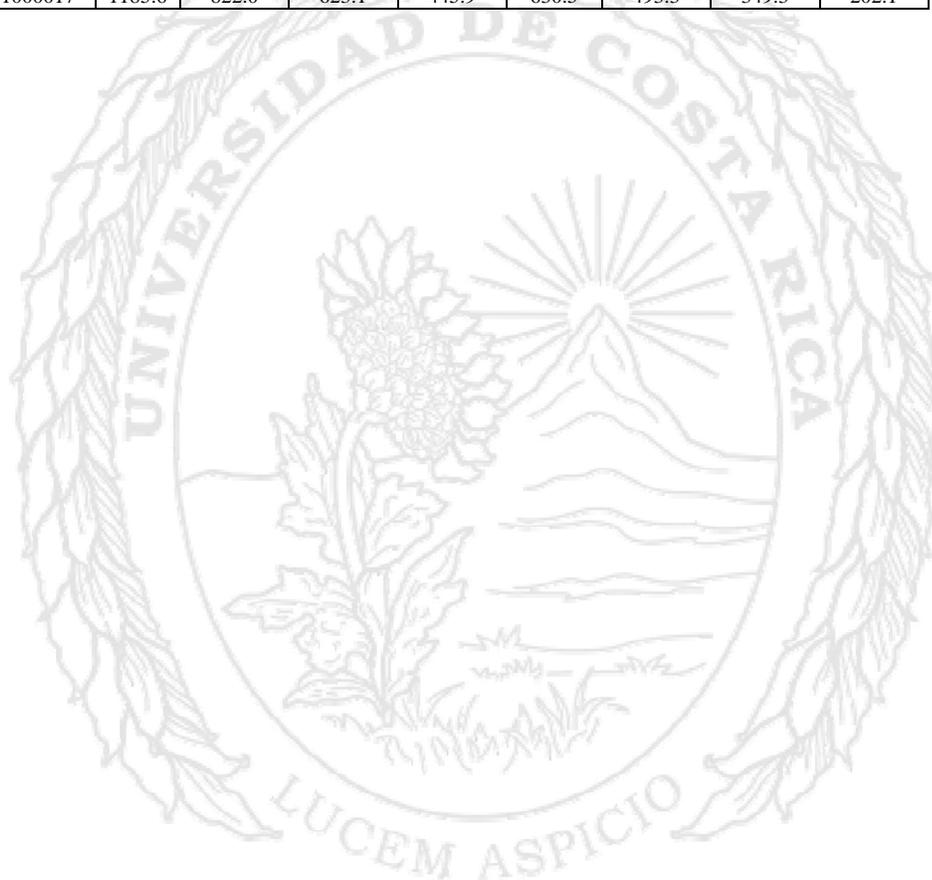


Tabla A2. Deflexión @ 30 cm sensores MDD

Repetición	mdd1-0	mdd1-180	mdd1-450	mdd1-700	mdd2-60	mdd2-300	mdd2-600	mdd2-900
23	204.0	182.9	164.0	141.3	141.4	137.5	98.7	59.2
15016	202.2	181.6	169.2	141.8	165.7	154.6	113.1	69.4
31022	221.4	200.8	184.2	150.0	185.1	172.0	130.2	87.2
45023	249.8	236.6	209.5	175.2	202.9	188.6	138.8	86.6
60019	230.2	208.6	191.7	160.7	187.7	175.9	123.3	77.6
86019	241.8	221.2	195.6	165.4				
100021	240.7	212.8	187.2	157.4	194.0	175.4	122.2	78.6
120022	239.3	211.9	190.6	155.7	193.6	173.9	124.0	78.2
137016	265.2	227.6	203.1	170.9	208.6	189.9	138.2	85.0
148007	295.5	260.2	232.3	192.6	237.3	223.2	164.7	95.1
160010	285.3	247.5	224.1	183.3	237.5	209.0	151.9	92.5
180015	300.0	264.3	236.8	197.7	254.1	225.0	165.3	98.1
200011	320.2	270.5	244.2	205.2	255.0	236.7	172.3	99.3
220013	331.0	287.3	256.7	209.7	261.9	248.2	175.9	103.5
245033	342.3	293.2	257.5	217.5	265.3	244.1	183.3	103.0
260010	368.6	312.9	273.8	230.6	279.8	262.1	197.2	111.1
270017	365.7	314.6	278.7	234.1	279.3	264.0	195.8	111.2
290021	368.9	308.9	274.8	231.6	270.8	254.0	193.0	107.9
310012	383.9	321.7	283.8	239.9	282.6	268.1	198.9	110.9
330010	400.4	347.7	299.5	252.7	282.6	268.1	198.9	110.9
350015	378.9	324.1	280.7	234.0	275.6	258.4	191.3	108.8
370020	412.6	349.5	307.0	252.8	297.9	279.5	212.1	118.0
394011	404.8	345.1	304.1	254.9	287.5	262.8	201.2	114.3
420023	423.4	354.5	312.7	265.8	296.3	282.6	213.1	116.5
440014	450.6	389.7	339.1	285.3	311.8	298.0	226.5	125.5
480019	466.2	387.2	341.7	290.0	305.6	281.7	220.9	122.6
490011	485.7	398.1	349.5	305.0	302.9	283.8	221.6	122.0
520008	492.8	413.6	363.2	305.6	325.1	302.4	239.9	128.9
540011	518.9	431.4	375.6	303.9	324.0	301.0	239.0	129.0
560015	474.8	395.0	357.8	310.7	331.9	313.7	242.4	128.7
580015	496.4	402.1	369.8	304.3	323.5	300.6	237.0	130.2
599013	509.4	411.1	380.1	313.5	321.3	303.8	231.4	134.4
620014	516.3	422.5	381.8	310.4	336.2	303.3	241.9	134.5
640021	520.3	439.3	397.1	319.2	335.1	312.4	249.4	139.8
660028	554.1	457.2	419.3	329.2	350.6	334.5	265.6	145.2
680015	453.8	384.0	345.6	297.9	345.1	330.2	253.8	141.1
700017	570.8	479.1	433.4	336.1	374.7	335.1	279.7	155.1
720011	547.9	447.0	404.5	324.0	348.3	323.0	255.3	141.2
740009	550.7	460.5	427.0	333.2	359.6	338.0	271.6	148.4
760013	599.2	504.1	455.2	342.4	384.6	372.2	292.6	157.2
780013	594.6	503.9	454.0	339.8	385.6	368.7	293.3	159.9

Tabla A2 (continuación). Deflexión @ 30 cm sensores MDD

Repetición	mdd1-0	mdd1-180	mdd1-450	mdd1-700	mdd2-60	mdd2-300	mdd2-600	mdd2-900
800012	544.9	450.0	405.8	326.3	352.8	323.4	263.4	139.1
820021	569.2	479.4	426.9	329.3	372.4	342.7	277.4	148.1
840011	602.2	509.8	468.9	345.7	393.2	367.7	296.3	158.2
860009	604.4	514.9	467.8	342.2	393.5	373.5	294.3	161.0
880017	535.5	438.2	395.5	317.9	343.0	315.4	252.7	133.0
900017	570.6	487.4	442.7	330.5	380.2	355.6	281.6	151.9
920018	587.7	488.8	441.4	333.5	383.8	356.1	279.9	149.9
940018	532.5	452.4	403.6	317.2	357.9	334.0	252.4	133.8
960011	578.6	494.6	452.7	338.7	390.4	364.1	288.8	151.4
980013	585.3	498.6	458.8	337.7	394.1	363.2	289.5	157.0
1000017	589.3	513.9	458.9	334.2	400.5	368.0	287.2	165.5



Tabla A3. Módulos retrocalculados sensores MDD

Repetición	MDD1				MDD2				
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	C	n
23	3006.4	2545.5	482.3	86.7	3092.8	3060.8	116.9	85.1	-0.29
15016	2726.7	2076.3	317.9	98.4	3041.7	2545.2	89.2	133.4	-0.12
31022	2696.8	1996.7	210.8	96.9	2948.9	1817.4	116.0	161.5	0.00
45023	2274.3	1423.6	277.5	80.3	2969.1	1922.5	80.7	92.8	-0.15
60019	2273.7	1423.0	282.7	91.9	2994.3	2077.1	74.8	115.7	-0.13
86019	2239.0	1313.6	239.6	92.0					
100021	2238.6	1313.0	241.4	97.0	3593.2	1766.6	72.7	138.9	-0.09
120022	2068.0	1094.4	258.3	99.3	3587.8	1633.9	82.1	135.9	-0.09
137016	1955.0	950.2	301.2	88.4	3587.8	1530.3	80.1	108.8	-0.12
148007	1930.7	839.2	239.5	79.3	3516.1	1308.1	67.7	87.0	-0.14
160010	1910.0	745.0	270.0	84.6	3445.8	1267.6	68.7	89.0	-0.16
180015	1900.0	646.9	258.4	80.1	3376.9	1177.4	68.0	65.5	-0.23
200011	1870.0	505.3	334.2	74.0	3309.3	1168.1	67.0	49.7	-0.31
220013	1844.7	471.5	335.6	70.4	3276.2	1146.7	62.9	48.0	-0.31
245033	1748.0	424.9	346.2	64.2	3276.2	1096.8	71.1	37.9	-0.38
260010	1743.2	379.3	339.9	59.8	3227.1	1067.1	68.4	34.2	-0.38
270017	1700.0	381.3	302.2	65.5	3210.7	1029.2	71.0	31.0	-0.41
290021	1599.7	370.7	304.8	66.2	3206.5	952.0	81.7	32.4	-0.41
310012	1575.8	365.7	301.2	63.1	3190.4	1065.8	67.1	27.9	-0.45
330010	1521.0	332.5	303.0	59.0	3142.3	877.3	73.4	31.3	-0.40
350015	1521.3	348.7	316.3	63.7	3207.5	998.5	71.2	35.9	-0.38
370020	1477.1	315.0	303.0	53.0	3146.5	859.4	75.3	23.9	-0.48
394011	1457.3	301.0	315.0	52.0	3144.4	822.9	81.8	29.9	-0.42
420023	1430.0	285.0	301.0	52.0	3113.0	855.0	74.3	24.8	-0.47
440014	1287.0	256.5	292.6	48.0	3081.9	748.0	78.1	23.3	-0.47
480019	1266.5	274.5	274.5	40.4	3020.2	680.2	92.8	22.6	-0.49
490011	1232.4	267.2	267.2	43.2	3020.2	674.7	95.0	19.3	-0.54
520008	1204.7	261.1	261.1	41.9	2974.9	671.9	89.4	16.1	-0.57
540011	1176.1	254.9	254.9	44.0	2974.0	653.0	86.6	19.7	-0.51
560015	1172.8	254.2	254.2	39.1	2959.8	714.9	73.1	20.6	-0.49
580015	1142.8	247.7	247.7	43.8	2900.8	619.8	89.0	22.0	-0.47
599013					2843.0	666.4	79.7	25.0	-0.43
620014	1114.9	241.7	241.7	45.1	2786.1	599.4	94.3	22.6	-0.45
640021	1090.1	236.3	236.3	46.1	2730.4	559.6	100.8	19.2	-0.49
660028	1063.8	230.6	230.6	44.5	2675.8	575.1	90.1	15.1	-0.55
680015	1042.8	226.1	226.1	47.9	2758.3	569.7	78.8	21.1	-0.46
700017	1018.6	200.8	200.8	44.8	2702.6	479.1	106.3	15.8	-0.50
720011					2677.5	565.3	87.8	16.7	-0.54
740009	1044.0	226.3	226.3	42.3	2637.3	525.4	93.8	14.3	-0.56
760013	1002.4	221.6	221.6	44.9	2597.8	499.3	84.5	12.9	-0.57
780013	1011.2	219.2	219.2	37.7	2584.6	508.6	84.5	12.9	-0.56

Tabla A3 (continuación). Módulos retrocalculados sensores MDD

Repetición	MDD1				MDD2				
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	C	n
800012	1040.2	225.5	225.5	40.0	2624.0	575.9	94.0	13.4	-0.59
820021					2597.2	502.8	91.3	13.4	-0.58
840011	1008.7	201.7	201.7	40.8	2545.8	494.0	86.8	10.3	-0.64
860009	1067.6	231.4	231.4	42.1	2494.9	494.9	82.1	11.3	-0.61
880017					2571.5	557.0	95.4	14.6	-0.60
900017	1002.4	202.5	202.5	35.1	2571.8	481.0	87.3	11.8	-0.62
920018					2572.5	490.5	82.0	13.3	-0.59
940018	1097.2	237.8	237.8	36.4	2561.4	538.0	81.1	19.8	-0.48
960011	1078.3	233.7	233.7	35.6	2545.8	434.4	88.6	22.2	-0.37
980013					2532.8	433.3	81.3	15.3	-0.53
1000017	1051.2	227.9	227.9	47.9	2519.9	427.6	76.0	21.4	-0.41



Tabla A4. Deflexiones y Módulos retrocalculados RSD-N1

Repetición	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	M1	M2	M3	C	n
10	177.0	146.4	125.2	97.7	75.0	47.7	33.5	24.5	18.0	3382.0	506.4	99.3	73.0	-0.13
15019	204.8	166.2	142.6	110.0	85.6	58.1	40.8	28.7	21.0	3378.4	369.7	128.6	49.1	-0.16
31024	181.5	146.8	124.8	97.1	73.4	47.3	32.1	22.5	16.8	3379.6	437.7	132.3	50.8	-0.20
45026	182.3	149.1	125.5	96.4	73.9	49.3	36.4	26.6	20.1	3379.0	422.3	94.0	108.1	-0.04
60024	166.6	128.8	107.7	80.2	57.4	35.3	22.4	12.9	7.2	3379.9	391.4	223.4	23.0	-0.44
100024	181.4	147.8	121.3	90.1	65.4	38.9	32.9	23.0	15.3	3379.6	385.2	65.5	169.9	0.00
120023	202.9	164.9	137.6	104.0	78.7	49.7	35.0	23.9	16.7	3379.7	368.2	96.5	59.5	-0.16
137031	206.6	167.2	138.6	102.6	75.9	51.5	36.9	26.5	18.9	3378.6	329.5	72.6	114.9	-0.03
148038	230.1	191.7	159.1	120.3	88.3	56.4	40.1	28.2	19.8	3378.5	329.3	43.8	124.7	-0.01
160029	226.2	183.8	149.7	110.6	80.7	48.6	32.9	23.2	17.1	3377.2	305.5	54.9	94.5	-0.09
180036	249.4	191.9	156.9	116.8	86.5	55.6	38.4	25.6	16.8	3375.6	217.7	124.2	37.6	-0.23
200027	255.8	204.2	166.7	122.4	90.2	58.5	42.0	27.5	19.7	3376.6	240.0	68.7	68.4	-0.11
220026	258.9	205.4	164.8	116.8	83.5	49.9	33.3	23.4	15.4	3376.8	226.7	48.9	90.9	-0.10
260026	266.4	219.0	175.3	121.4	84.2	46.4	31.5	21.8	14.3	3376.7	234.0	40.3	73.4	-0.16
270031	278.0	217.0	176.3	129.1	93.3	56.3	39.7	26.6	18.4	3376.5	207.6	64.3	56.9	-0.15
290034	284.1	220.7	178.8	126.6	89.9	53.8	38.1	26.5	17.5	3376.7	191.8	47.2	90.9	-0.08
310025	302.8	227.8	180.6	122.8	85.3	51.5	36.1	23.5	16.9	3376.9	151.3	49.5	93.9	-0.08
330025	304.9	230.8	182.2	123.4	82.1	54.7	38.4	26.7	18.9	8631.1	30.0	4678.4	8.6	-0.48
350030	282.1	227.7	178.3	122.8	81.9	42.8	28.6	19.5	13.8	3377.9	201.4	39.4	66.9	-0.20
370033	290.2	223.5	176.7	121.9	83.7	47.2	32.7	21.7	13.2	3377.9	175.8	45.1	82.5	-0.13
394029	291.7	209.2	162.8	109.5	72.1	42.7	29.0	19.1	12.3	3377.2	139.5	64.7	81.2	-0.14
420042	306.4	241.5	187.5	126.5	83.3	47.6	34.3	23.5	15.2	3378.4	156.7	39.7	90.2	-0.11
440030	314.2	244.9	192.0	129.9	87.1	48.6	33.9	24.3	16.3	12378.1	51.2	136.4	54.5	-0.17
460024	356.7	264.6	206.1	138.8	94.2	52.6	34.7	24.2	16.2	3379.0	116.4	42.3	74.5	-0.12
480036	327.1	233.9	181.0	119.3	76.1	41.0	25.8	12.6	4.3	3376.0	120.9	92.7	18.8	-0.47
498026	329.2	255.6	197.0	131.3	87.6	46.7	31.1	20.6	13.8	3377.8	141.2	37.7	71.3	-0.16
540024	352.7	283.1	213.0	137.0	87.0	44.6	30.1	20.0	12.2	7709.3	69.2	23.6	232.7	0.00
560032	363.7	277.6	215.9	145.4	97.6	54.8	38.7	27.8	17.5	3378.8	116.7	36.0	86.6	-0.08
580028	352.9	270.9	208.2	136.7	88.5	47.0	30.8	21.2	13.0	8018.3	23.1	2745.6	13.9	-0.45
599029	364.3	272.9	207.7	135.3	87.3	46.4	30.6	19.4	11.1	3381.8	110.7	38.0	66.6	-0.18
620063	387.4	292.6	228.5	152.6	102.5	57.4	38.5	26.1	16.9	3383.3	107.0	35.0	72.5	-0.11
640034	390.1	269.9	204.4	131.9	84.6	48.6	31.4	19.6	10.9	3379.9	76.1	90.9	31.8	-0.30
660041	390.4	295.2	223.4	143.7	93.7	50.9	32.2	20.7	12.1	3383.0	99.7	35.4	63.2	-0.18
680028	406.0	293.3	227.0	152.0	101.9	56.8	37.4	25.1	18.0	3382.2	89.2	49.5	51.8	-0.17
700030	404.7	282.7	210.7	131.8	81.5	44.9	27.5	15.6	10.7	3381.9	76.5	53.4	52.1	-0.23
720024	390.0	296.6	227.9	149.1	97.6	54.1	35.9	24.7	15.7	3383.3	102.1	33.8	73.7	-0.13
740020	396.4	282.1	219.0	147.5	95.7	52.3	33.5	18.0	8.1	3375.7	86.3	103.4	13.5	-0.47
760024	404.8	283.5	218.6	143.4	92.0	51.7	32.6	25.2	14.6	212.6	134.1	51.0	48.6	-0.20
780028	393.4	291.0	224.3	151.3	100.9	55.2	37.4	23.9	14.5	5454.6	71.9	80.9	28.2	-0.29
800031	373.7	283.6	216.8	141.2	91.3	47.9	31.3	20.3	12.6	3379.5	110.2	35.0	63.9	-0.18
820038	396.8	292.2	224.8	151.9	102.1	58.4	40.1	27.3	17.5	3379.9	94.9	44.8	62.6	-0.13
840024	389.0	300.3	228.3	151.7	98.5	54.6	36.1	23.6	15.9	7085.9	20.9	3581.5	6.9	-0.55
860026	425.8	318.8	240.4	158.9	105.8	57.6	38.0	25.5	16.5	6501.2	29.4	366.6	22.0	-0.32
880030	391.9	283.9	219.7	149.2	98.1	52.7	34.7	22.7	12.8	3378.1	96.6	61.9	31.0	-0.29
940031	384.1	282.2	214.2	138.9	87.9	46.6	31.3	20.0	13.8	3380.0	96.0	36.7	78.9	-0.14
1000034	444.5	299.2	232.1	154.8	104.2	61.3	40.6	27.5	17.7	3370.0	48.2	218.1	17.7	-0.36

Tabla A5. Deflexiones y Módulos retrocalculados RSD-N2

Repetición	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	M1	M2	M3	C	n
10	113.3	105.3	94.9	79.6	66.4	45.9	33.7	25.8	20.8	3510.4	1787.4	84.6	140.9	-0.01
15019	109.0	103.2	93.9	79.5	65.1	42.9	29.7	21.4	15.7	3520.9	1906.6	40.1	211.3	0.00
31024	107.8	91.5	80.6	64.6	55.7	38.5	26.9	19.8	13.9	3445.4	917.3	416.4	49.2	-0.24
45026	126.4	105.9	94.9	77.6	62.8	42.3	29.8	22.1	16.9	3442.1	877.4	238.4	55.5	-0.19
60024	136.5	115.7	102.9	83.9	66.5	49.1	34.6	24.8	18.0	3439.0	766.3	243.6	51.4	-0.18
100024	158.9	131.8	117.0	93.9	76.9	52.4	36.2	25.5	19.8	3434.7	589.2	232.5	36.3	-0.24
120023	126.2	110.7	97.5	81.2	66.1	42.7	28.9	20.2	16.1	3440.0	1179.5	184.2	40.4	-0.26
137031	135.7	118.2	105.7	85.5	67.4	41.2	24.1	14.4	12.9	3440.8	1198.8	167.8	16.7	-0.47
148038	150.7	133.8	121.3	101.2	81.3	52.8	35.5	23.5	17.6	3440.2	1194.1	143.0	21.9	-0.34
160029	152.3	133.2	118.6	96.7	78.0	47.1	30.3	18.5	18.5	3426.0	936.4	30.3	208.4	0.00
180036	135.2	114.1	100.8	80.9	66.3	43.6	28.4	20.2	14.5	3426.1	937.9	49.7	211.0	0.00
200027	144.8	122.2	109.0	89.1	70.3	42.1	27.5	18.4	12.8	3428.8	928.5	32.4	241.9	0.00
220026	143.1	122.2	108.6	88.9	70.2	44.1	29.2	20.4	13.1	3428.8	928.5	32.5	241.9	0.00
270031	148.8	135.8	122.6	104.2	85.5	54.5	35.3	26.1	20.3	3428.8	928.3	22.3	240.1	0.00
290034	146.5	133.1	119.9	99.7	81.9	52.7	35.3	25.6	21.3	3428.8	928.5	24.3	240.2	0.00
330025	149.2	128.4	114.9	96.6	78.3	51.7	35.2	26.2	20.3	3428.8	928.6	26.0	240.4	0.00
350030	157.7	134.9	121.0	101.7	82.8	54.3	37.1	28.0	21.7	3428.8	928.6	22.0	239.8	0.00
370033	146.8	133.4	120.7	101.0	82.0	52.7	34.9	25.3	20.3	3428.9	928.7	24.0	240.0	0.00
394029	150.2	130.3	116.5	96.9	78.5	51.5	35.9	25.8	19.9	3428.9	928.8	25.4	240.1	0.00
420042	154.9	133.0	119.9	100.2	82.3	55.3	38.0	29.5	22.0	3428.9	928.8	22.8	239.7	0.00
440030	157.3	134.0	120.5	100.0	80.6	53.2	36.1	26.3	20.5	3428.9	928.8	22.8	239.7	0.00
460024	156.0	138.6	123.5	103.0	82.7	54.2	37.4	27.4	20.6	3428.9	928.8	21.5	239.5	0.00
480036	155.2	138.4	124.2	103.0	83.4	56.7	39.7	29.6	22.6	3428.9	928.8	21.1	239.5	0.00
498026	155.2	136.1	122.1	100.8	80.8	51.0	34.2	23.6	18.7	3428.9	928.9	22.9	239.6	0.00
540024	163.6	138.4	124.5	102.1	83.6	56.1	38.4	29.2	22.7	3428.9	928.9	20.4	239.3	0.00
560032	156.4	132.1	117.4	96.8	77.1	51.0	37.9	30.0	22.1	3428.9	929.1	24.3	239.5	0.00
580028	161.7	138.9	125.2	104.7	85.3	56.0	38.7	29.1	22.3	3428.9	929.0	20.1	238.9	0.00
599029	162.1	136.1	120.6	101.5	81.8	53.9	37.2	27.3	20.2	3428.9	929.1	21.7	239.0	0.00
620063	157.4	140.6	126.7	106.3	86.8	56.2	38.6	27.5	18.6	3428.9	929.1	20.0	238.8	0.00
640034	161.3	134.2	119.7	99.1	78.8	49.4	32.1	22.0	13.1	3426.6	852.7	29.1	211.4	0.00
660041	158.5	135.4	121.2	100.2	79.9	49.4	31.6	21.3	14.3	3426.6	852.7	28.8	211.4	0.00
680028	174.6	147.8	132.7	111.7	90.6	60.1	41.8	29.4	22.0	3426.5	852.5	20.4	209.8	0.00
700030	176.2	151.4	134.6	112.1	90.6	57.8	38.1	26.0	17.8	3426.5	852.5	20.1	209.7	0.00
720024	178.8	150.5	134.8	113.1	93.0	62.4	43.6	31.1	23.2	3426.5	852.5	19.0	209.6	0.00
740020	167.7	144.8	128.8	106.2	85.6	61.3	44.1	32.1	23.5	3426.6	852.7	22.5	209.8	0.00
760024	188.2	164.1	147.3	123.9	101.5	68.8	48.5	35.4	26.6	3426.5	852.6	14.8	208.8	0.00
780028	176.1	153.8	137.6	115.4	97.9	65.7	47.5	34.4	26.1	3426.6	852.9	17.9	209.1	0.00
800031	175.3	147.8	130.3	108.3	88.6	61.4	44.5	33.4	24.5	3426.6	853.0	20.8	209.3	0.00
820038	174.4	145.3	127.2	104.8	84.6	56.1	39.0	28.6	25.1	3426.6	853.1	22.8	209.4	0.00
840024	189.9	160.3	143.3	118.8	96.3	64.6	46.2	33.0	25.2	3426.6	852.9	16.1	208.4	0.00
860026	191.8	159.7	142.8	118.3	94.5	62.2	48.5	34.4	27.0	3426.6	852.9	16.2	208.4	0.00
880030	183.3	148.7	131.1	106.1	87.8	63.8	46.1	33.6	25.7	3426.6	853.1	20.0	208.6	0.00
940031	177.7	146.2	126.8	102.2	81.1	54.4	38.1	25.9	18.3	3412.5	473.3	216.4	29.4	-0.27
1000034	191.5	163.3	144.8	120.2	96.7	63.9	44.8	31.7	23.4	3413.9	607.1	149.5	26.8	-0.26

Tabla A6. Deflexiones y Módulos retrocalculados RSD-S1

Repetición	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	M1	M2	M3	C	n
10	140.9	121.8	108.1	89.0	72.1	50.5	36.4	26.7	19.8	3451.8	862.3	186.7	54.8	-0.16
15019	146.4	123.6	108.5	86.1	67.1	43.6	28.6	20.9	15.5	3447.7	759.3	143.2	51.1	-0.22
31024	173.7	145.3	129.4	108.4	88.3	59.4	40.7	28.7	20.1	3445.0	565.3	294.0	17.0	-0.36
45026	144.8	123.1	107.7	87.5	73.0	51.3	34.8	25.5	18.7	3447.0	677.3	282.0	36.2	-0.24
60024	155.8	121.0	105.4	86.0	68.9	44.8	31.4	22.3	15.7	3442.7	397.2	428.5	26.4	-0.33
100024	138.4	118.6	106.1	88.4	76.7	50.7	33.7	24.6	18.0	3442.7	822.1	401.0	17.5	-0.38
120023	165.8	136.6	119.9	98.9	81.5	56.6	39.7	27.6	19.9	3436.0	484.5	346.5	24.1	-0.30
137031	187.9	159.9	140.2	113.5	92.0	62.5	41.6	26.5	17.5	3437.6	531.2	247.7	12.8	-0.42
148038	185.8	155.6	130.7	101.0	78.6	48.5	32.4	21.6	15.9	3435.9	481.9	117.2	39.1	-0.25
160029	201.9	159.2	135.9	108.1	86.3	57.2	39.2	25.3	17.7	3432.9	302.5	297.6	18.8	-0.36
180036	200.3	151.3	124.8	92.5	75.0	52.6	35.6	23.3	16.1	3435.0	226.8	313.0	33.5	-0.26
200027	234.9	186.0	157.6	121.3	95.6	61.8	41.7	26.5	17.2	3438.9	265.1	200.6	17.4	-0.37
220026	226.1	177.4	146.4	109.1	82.3	56.5	37.4	22.2	14.6	3440.4	251.5	178.1	25.7	-0.31
260026	244.2	190.7	154.0	114.0	87.4	54.3	37.4	25.1	16.6	3441.1	227.2	124.1	37.0	-0.24
270031	237.5	185.6	150.0	108.0	78.6	46.4	30.6	19.9	12.8	3441.9	252.6	86.3	45.3	-0.24
290034	247.4	187.9	156.0	114.4	92.4	58.5	40.5	25.5	15.9	3440.9	192.6	225.4	20.6	-0.34
310025	263.0	205.1	167.4	123.9	92.2	57.3	38.1	23.6	14.3	3444.0	213.5	128.7	22.5	-0.34
330025	289.9	222.7	180.7	132.0	97.7	62.5	42.6	26.5	16.9	3443.4	173.5	114.0	27.7	-0.27
350030	263.6	190.7	148.6	105.6	76.3	44.5	28.1	18.1	10.1	3442.5	148.1	187.6	21.1	-0.40
370033	268.2	207.5	166.6	120.6	88.4	53.2	33.6	24.1	16.1	3445.8	203.7	85.8	40.9	-0.23
394029	303.4	224.2	174.8	123.4	90.8	58.6	39.5	25.7	14.0	3444.6	126.6	140.0	29.9	-0.27
420042	278.3	202.5	153.6	103.3	71.0	39.6	24.6	15.6	9.0	3446.9	147.0	94.9	39.8	-0.30
440030	281.5	227.0	174.7	116.9	82.3	47.5	31.1	20.0	12.6	3448.6	186.7	43.9	76.4	-0.15
460024	362.7	256.4	203.1	146.7	107.3	68.2	46.9	29.7	17.6	3444.3	76.6	271.6	14.0	-0.39
480036	324.8	242.9	186.2	130.8	93.5	56.8	40.2	27.5	16.9	3469.3	124.5	79.1	50.1	-0.17
498026	309.2	227.6	176.0	123.7	89.0	53.4	35.8	25.4	17.2	3469.6	129.5	94.0	45.5	-0.20
540024	345.9	271.4	202.6	132.1	89.3	48.6	31.6	20.8	13.7	3471.3	122.9	37.8	70.7	-0.16
560032	362.3	253.9	198.8	140.9	100.4	61.6	40.7	25.8	14.6	3466.7	75.1	256.9	13.2	-0.43
580028	347.8	248.3	193.3	135.8	98.6	58.1	37.3	21.5	10.9	3466.8	84.8	257.4	9.2	-0.52
599029	330.2	226.0	175.6	121.4	84.4	50.1	31.5	18.8	9.5	3455.3	77.9	338.8	10.1	-0.54
620063	335.4	264.2	203.1	140.8	99.9	59.2	40.4	24.5	15.5	3510.6	142.2	48.5	52.8	-0.17
640034	353.6	244.2	180.8	115.1	76.3	46.0	28.9	17.6	10.1	3509.2	79.3	115.1	36.7	-0.29
660041	343.0	254.7	193.0	131.8	91.2	53.1	36.3	24.5	12.7	3511.9	112.5	70.5	44.4	-0.21
680028	368.6	264.3	197.3	130.2	87.0	47.9	30.3	18.8	11.1	3511.8	90.1	82.8	30.9	-0.31
700030	357.7	254.4	194.7	131.6	91.0	50.9	31.9	21.2	10.7	3511.0	90.7	127.3	19.5	-0.39
720024	368.9	245.3	193.8	140.0	101.7	59.3	39.1	25.3	14.2	2210.8	64.2	658.4	4.2	-0.67
740020	350.9	249.0	189.6	129.8	90.4	52.1	32.0	21.7	12.0	2658.7	104.1	115.5	23.3	-0.35
760024	386.6	282.3	223.2	162.7	116.3	70.6	46.3	29.7	17.9	2658.6	101.7	127.2	15.5	-0.37
780028	366.9	258.4	199.2	137.8	97.6	60.4	40.4	28.7	16.4	2659.2	93.6	117.5	31.2	-0.25
800031	352.8	253.8	192.0	129.8	87.5	50.1	33.0	21.7	14.9	2661.9	112.9	61.3	55.5	-0.18
820038	364.6	261.9	200.1	135.8	93.8	54.5	36.0	22.8	16.6	2661.9	106.6	74.5	40.2	-0.23
840024	366.3	243.0	186.2	133.0	98.5	57.8	37.6	23.6	16.0	1387.2	84.1	250.6	15.3	-0.41
860026	389.2	291.3	223.5	154.5	107.2	62.8	41.3	28.2	17.7	1408.9	134.1	45.4	52.7	-0.15
880030	340.4	247.6	189.2	128.2	87.4	49.8	30.9	20.7	12.0	1409.3	147.0	61.1	46.1	-0.23
940031	337.2	246.8	187.0	125.9	84.8	46.0	28.3	17.5	13.2	1409.6	152.1	52.6	53.0	-0.22
1000034	410.1	276.2	218.4	156.1	114.8	70.7	44.8	29.1	16.3	1406.4	77.7	233.8	11.1	-0.44

Tabla A7. Deflexiones y Módulos retrocalculados RSD-S2

Repetición	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	M1	M2	M3	C	n
10	99.4	89.6	81.8	70.0	58.7	44.1	32.8	25.4	20.1	3500.8	1507.1	196.2	147.6	0.00
15019	110.8	100.4	91.3	77.7	64.4	46.4	32.8	26.0	21.6	3511.1	1768.7	123.5	116.2	-0.04
31024	112.2	102.3	92.3	80.2	67.1	49.0	37.1	27.1	22.4	3505.7	1718.7	206.8	68.2	-0.11
45026	109.0	97.3	88.2	75.3	63.7	47.0	34.3	26.4	21.3	3492.7	1494.5	266.0	69.4	-0.12
60024	96.0	91.8	86.0	72.9	61.5	41.6	29.3	21.2	17.5	3511.6	1839.4	668.3	10.9	-0.50
100024	99.8	88.0	79.0	67.5	57.0	46.8	35.6	28.1	21.7	3481.0	1189.1	446.3	101.3	-0.05
120023	105.7	94.1	85.6	71.4	59.7	41.1	34.1	28.1	20.7	3483.6	1451.5	174.0	145.3	0.00
137031	108.8	93.5	85.8	72.5	61.0	44.1	32.7	26.3	21.0	3478.9	1237.9	275.7	90.9	-0.08
148038	134.5	119.0	108.2	90.5	75.1	55.1	41.7	31.4	24.3	3473.0	1149.8	132.7	99.2	-0.03
160029	137.6	115.6	103.6	86.3	73.0	51.7	37.0	28.6	21.8	3457.6	717.7	327.2	46.4	-0.18
180036	148.8	127.6	115.7	97.3	80.2	56.8	40.4	31.6	23.8	3457.8	845.9	206.6	47.5	-0.16
200027	129.7	112.0	98.3	81.1	65.1	42.6	28.4	24.7	20.6	3462.0	990.2	88.4	161.2	0.00
220026	126.3	113.9	102.9	83.6	70.3	49.1	34.5	23.9	18.6	3470.0	1330.2	188.2	41.5	-0.22
260026	144.1	131.5	118.7	100.5	83.1	59.5	45.9	35.0	28.0	3458.9	1221.5	91.1	105.4	-0.01
270031	153.9	134.7	121.7	99.6	81.1	53.1	35.4	25.6	16.9	3447.1	996.6	163.7	23.7	-0.33
290034	135.5	115.4	103.0	86.3	76.3	53.4	39.4	29.5	23.1	3444.0	735.5	403.7	39.8	-0.20
310025	155.6	134.9	120.5	99.6	81.0	56.5	39.5	28.7	22.2	3442.4	820.6	168.4	42.9	-0.19
330025	156.7	136.2	121.0	100.4	80.8	57.0	39.3	30.2	23.4	3441.8	810.2	145.9	53.9	-0.14
350030	160.4	137.2	122.0	100.1	82.1	55.6	38.0	29.1	22.1	3439.9	739.7	162.7	44.0	-0.19
370033	155.9	133.2	119.5	95.8	76.9	51.2	35.4	25.8	20.5	3440.7	794.0	121.6	58.7	-0.15
394029	165.0	142.0	126.1	103.7	83.5	56.6	40.2	30.0	23.5	3438.8	742.9	123.7	57.4	-0.13
420042	152.9	124.1	108.4	85.6	67.5	42.6	27.5	21.3	17.7	3436.4	594.1	159.7	57.7	-0.19
440030	154.1	137.6	123.5	100.4	79.5	51.3	35.8	27.5	21.7	3442.2	967.0	54.4	119.8	-0.03
460024	175.1	151.8	135.8	110.7	88.8	58.3	40.4	28.9	22.7	3430.2	785.2	46.1	124.6	-0.01
480036	160.6	152.2	138.3	114.3	91.2	60.0	41.2	28.4	20.8	3458.6	1405.5	49.8	45.9	-0.19
498026	170.9	147.8	130.3	104.4	83.8	56.2	39.4	30.3	23.6	3397.4	694.3	84.0	85.5	-0.07
540024	167.1	141.8	124.7	100.1	80.6	54.8	38.1	29.3	21.9	3395.7	634.9	133.2	59.3	-0.13
560032	176.7	145.2	127.2	102.9	82.1	53.4	36.4	25.7	19.8	3393.3	515.5	188.6	32.1	-0.26
580028	175.3	145.1	126.9	99.4	76.1	45.0	27.4	15.9	12.2	3394.7	599.8	176.2	13.0	-0.51
599029	179.3	148.2	130.2	104.5	81.9	54.4	35.6	26.5	19.7	3393.0	531.6	158.9	35.4	-0.24
620063	186.8	158.3	139.8	112.0	89.5	58.0	40.3	27.8	22.0	3393.7	592.9	116.8	39.3	-0.21
640034	171.0	143.1	124.5	96.6	73.7	42.2	26.5	18.9	16.4	3391.9	609.7	43.8	143.7	-0.06
660041	175.2	158.8	140.1	112.3	87.1	52.8	34.7	22.6	16.4	3390.5	941.2	53.6	41.3	-0.25
680028	187.4	154.8	135.5	107.2	83.5	52.6	34.2	22.6	17.8	3370.7	518.4	147.3	25.9	-0.32
700030	198.8	165.0	148.1	121.8	96.6	63.5	43.7	30.9	22.9	3371.0	528.3	159.9	24.2	-0.28
720024	201.7	171.2	149.7	119.4	94.5	59.2	38.7	25.4	18.8	3371.1	551.1	123.9	21.0	-0.34
740020	184.1	163.4	142.5	113.0	87.8	52.7	33.5	24.0	18.6	3374.2	741.9	50.1	59.4	-0.17
760024	210.5	175.7	154.0	127.9	101.9	67.2	44.5	30.4	22.2	3364.8	450.6	205.3	14.5	-0.38
780028	203.4	170.8	149.1	117.7	92.5	59.2	44.7	31.1	23.6	3364.6	481.5	82.1	64.5	-0.10
800031	206.5	171.0	149.8	119.6	93.7	60.0	37.7	24.7	17.7	3365.3	458.0	176.8	14.2	-0.42
820038	214.0	178.7	155.6	123.5	96.7	63.6	42.1	33.2	25.0	3364.4	447.6	84.5	54.0	-0.13
840024	237.6	201.4	178.1	142.9	112.8	74.4	47.9	33.6	25.3	3364.8	457.2	100.4	21.9	-0.28
860026	211.1	182.1	160.2	127.2	101.7	66.9	46.7	31.7	25.3	3366.3	539.2	85.2	40.8	-0.17
880030	182.3	159.7	139.4	108.4	82.3	50.5	37.2	24.4	18.5	3367.7	638.9	54.6	82.2	-0.11
940031	188.7	162.8	142.4	111.4	86.8	51.8	34.4	27.5	22.5	3362.8	582.5	45.1	116.2	-0.04
1000034	197.1	179.0	159.1	128.5	105.2	68.1	46.9	31.9	26.4	3369.4	813.5	54.1	49.7	-0.14