



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-AT-021-15
PARTE 1 DE 3

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DESEMPEÑO (IRI, FWD Y GRIP)

PROYECTO: RUTA NACIONAL NO.4 SECCIÓN: "BAJOS DE
CHILAMATE – VUELTA DE KOOPER".

Licitación Pública Internacional N° 2011LI-000037-32702

INFORME FINAL

Preparado por:

Unidad de Auditoría Técnica

San José, Costa Rica
Diciembre, 2015



Documento generado con base en el Art. 6, inciso b) de la Ley 8114 y lo señalado en el Capít.7, Art. 68 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

1. Informe Informe Final de Auditoría Técnica LM-PI-AT-021-15	2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO (IRI, FWD Y GRIP) DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO.4 SECCIÓN: BAJOS DE CHILAMATE – VUELTA DE KOOPER. (PARTE 1 DE 3)." ---**--	4. Fecha del Informe Diciembre 2015	
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 El objetivo general es realizar una evaluación de los parámetros de desempeño del proyecto, los cuales permiten determinar el estado funcional y estructural del proyecto a lo largo del tiempo. Por lo cual se evaluó el índice de regularidad internacional (IRI) parámetro contractual y se realizó un análisis de retro cálculo de módulo para determinar la capacidad estructural de la estructura del pavimento. Adicionalmente, se evaluó la condición de fricción del pavimento, la cual está relacionada con la seguridad vial del proyecto. A continuación se resumen los principales hallazgos y observaciones del informe: IRI en secciones de base asfáltica: Los valores de regularidad superficial de base asfáltica entre los estacionamientos 16+600 y 20+800 se encuentran dentro de un rango de 3,0m/km. Se analizaron tres tramos en cada una de las direcciones de circulación y se obtuvieron valores entre 2,7 a 3,4 m/km. En 4 de las 5 secciones analizadas se obtuvo un porcentaje de 100% por encima del límite recomendado para media móvil y para valores individuales los porcentajes varía entre 12,5% a 100%. IRI en secciones de la superficie de ruedo: El valor de IRI calculado en secciones del proyecto a nivel de la superficie de ruedo es mayor al especificado a nivel contractual tanto para datos individuales (2,0m/km) y para media móvil o promedio consecutivo de cinco datos individuales (1,5m/km). Comparación de IRI en sección de base asfáltica y superficie terminada: Al realizar una comparación de los valores de IRI en una sección del proyecto a nivel de base asfáltica y superficie de ruedo se obtienen porcentajes de mejora inferiores a los esperados. Comparando los datos se obtiene una mejora entre capas de hasta un 13,6% y en dos de los tramos en valor de IRI aumenta en la superficie de ruedo. Análisis estructural del pavimento (FWD): Al realizar un análisis mediante el retrocálculo de módulos, se determina que la estructura colocada en el proyecto (en las secciones ensayadas) cumple satisfactoriamente con la capacidad de soporte para la cual fue diseñada. Asimismo, se indica que el uso de ensayos no destructivos como complemento a los ensayos de control de calidad tradicionales son importantes para garantizar un proceso constructivo adecuado así como un desempeño satisfactorio durante la vida útil del proyecto. Análisis de la condición de fricción: Los resultados obtenidos muestran un nivel de rozamiento entre regular y bueno para los 5,9 kilómetros que se ensayaron utilizando el Griptester. Este parámetro se considera de relevancia en la seguridad vial de una carretera, ya que diversos estudios relacionan bajos niveles de rozamiento de un tramo vial con índices elevados de ocurrencia de accidentes, por lo que es importante conocer la condición de fricción de este proyecto para alertar sobre cualquier tramo que pueda presentar problemas de este tipo.		
10. Palabras clave FWD, retro cálculo de módulos, IRI, GRIP	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 93

INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA

"Evaluación de los parámetros de desempeño (IRI, FWD Y GRIP) del proyecto de Construcción de la Ruta Nacional No.4 Sección: Bajos de Chilamate – Vuelta de Kooper. Licitación Pública Internacional #2011LI-000037-32702 (Parte 1 de 3)".

Departamento encargado del proyecto: División de Obras Públicas, MOPT a través de la Unidad Ejecutora de Chilamate-Vuelta de Kooper

Empresa responsable del Diseño: CACISA

Empresa responsable de la Supervisión: Vieto y Asociados S.A.

Empresa contratista responsable de la Construcción: Sánchez Carvajal

Empresa responsable del control de calidad: OJM Consultores de Calidad y Laboratorios S.A.

Monto original del contrato: ₡25.318.843.141,59

Plazo original de ejecución: 24 meses

Longitud del proyecto: 27,09 km

Coordinador General de Programa de Infraestructura de Transporte, PITRA:

Ing. Luís Guillermo Loría Salazar, PhD.

Coordinadora Unidad de Auditoría Técnica PITRA-LanammeUCR:

Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc.

Audidores:

Ing. Erick Acosta Hernández

Ing. Emilio Corrales Chacón

Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo

Asesor Legal :

Lic. Miguel Chacón Alvarado

Alcance del informe:

A partir de la realización de mediciones en campo y análisis de los resultados, se evalúan los parámetros de desempeño del proyecto, a saber IRI, FWD y GRIP, con el objetivo de determinar el estado funcional y estructural del proyecto a lo largo del tiempo. La condición superficial (IRI) se evalúa a nivel de base asfáltica y superficie terminada, mientras que el análisis estructural del retro cálculo de módulo y la condición de fricción medida con el Griptester se realiza a nivel de la estructura completa. Lo anterior en secciones del proyecto que cumplieran con estas condiciones durante el periodo de la auditoría técnica (Enero a Junio de 2015).

Ubicación de la ruta auditada:



Figura 1. Mediciones realizadas en el proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

Índice de figuras	7
Índice de tablas.....	8
1. Fundamentación.....	10
2. Estructura general del informe.....	10
3. Objetivo y alcance de la auditoría técnica.....	11
3.1 objetvo del informe de auditoría técnica.....	11
3.2 alcance del informe.....	11
4. Integrantes del equipo de auditoría técnica del lanammeucr	12
5. Responsables del proyecto.....	12
6. Metodología del estudio.....	13
7. Antecedentes.....	13
8. Descripción del proyecto.....	15
9. Marco conceptual del informe.....	17
9.1 cálculo del índice de regularidad internacional (IRI)	17
9.2 evaluación estructural del pavimento	21
9.3 evaluación de la condición de fricción del pavimento	24
10. Audiencia a la parte auditada para análisis del informe preliminar	26
11. Resultados de la auditoría técnica.....	27
11.1 Sobre el Índice De Regularidad Internacional (IRI).....	27
11.2 Sobre el Análisis Estructural del Proyecto.....	39
11.3 Sobre el Desempeño Estructural del Proyecto	61
11.4 Sobre la Condición de Fricción del Proyecto	67
12. Conclusiones.....	70
13. Recomendaciones	72
1. Anexo a	76
2. Anexo b	83
3. Anexo c	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mediciones realizadas en el proyecto.	5
Figura 2. Localización del proyecto.	15
Figura 3. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías.	18
Figura 4. Cuenco de deflexiones producido por el equipo FWD.	21
Figura 5. Valores de IRI (m/km) del tramo 1, para valores individuales (a) y media móvil.	30
Figura 6. Valores de IRI (m/km) del tramo 2, para valores individuales (a) y media móvil.	31
Figura 7. Valores de IRI (m/km) del tramo 3, para valores individuales (a) y media móvil.	32
Figura 8. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones E-H.	34
Figura 9. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones F-L.	35
Figura 10. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones G-K.	36
Figura 11. Comparación de datos promedio de IRI por carril, para base asfáltica (BA) y mezcla asfáltica (MAC) entre los estacionamientos 23+050 y 26+100.	38
Figura 12. Estructura de pavimento diseñada proyecto Chilamate - Vuelta de Kooper.	41
Figura 13. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW1.	44
Figura 14. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW2.	46
Figura 15. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW1a.	48
Figura 16. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW2a.	50
Figura 17. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4c.	53
Figura 18. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4d.	54
Figura 19. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4f.	56
Figura 20. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4e.	57
Figura 21. Resumen de módulos promedio de cada material por mes analizado.	59
Figura 22. Evolución del porcentaje de área agrietada -MAC.	64
Figura 23. Evolución del desempeño por deformación permanente.	66
Figura 24. Evaluación de fricción en el proyecto. Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper.	68
Figura 25. Evaluación de fricción en el proyecto. Sentido Vuelta de Kooper- Chilamate.	69
Figura B. 1. Tramos analizados FWD - Diciembre 2014.	84
Figura B.2. Tramos analizados FWD - Febrero 2015.	84
Figura B.3. Tramos analizados FWD - Mayo 2015.	85
Figura B.4. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW1 - Diciembre 2014.	85
Figura B.5. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW1- Diciembre 2014.	86
Figura B.6. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW2 - Diciembre 2014.	86
Figura B.7. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW2 - Diciembre 2014.	86
Figura B.8. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW1a - Febrero 2015.	87
Figura B.9. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW1a - Febrero 2015.	87
Figura B.10. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW2a - Febrero 2015.	87
Figura B.11. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW2a - Febrero 2015.	88
Figura B.12. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4c - Mayo 2015.	88
Figura B. 13. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4c - Mayo 2015.	88
Figura B. 14. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4d - Mayo 2015.	89
Figura B.15. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4d - Mayo 2015.	89

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 7 de 94
---	----------------------------------	----------------

Figura B.16. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4f - Mayo 2015	89
Figura B. 17. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4f - Mayo 2015.....	90
Figura B.18. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4e - Mayo 2015	90
Figura B. 19. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4e - Mayo 2015.....	90
Figura C. 1. Curva maestra la de MAC producida en el proyecto.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de correspondencia durante el proceso de auditoría técnica.....	14
Tabla 2. Sección típica eje principal del proyecto.....	16
Tabla 3. Especificaciones Internacionales de Índice de Regularidad Internacional (IRI) ..	20
Tabla 4. Clasificación internacional del pavimento según el Grip Number.	25
Tabla 5. Cantidad y extensión de pruebas de IRI realizadas en el proyecto	28
Tabla 6. Resumen de porcentajes de datos por encima del valor límite.....	33
Tabla 7. Valores de regularidad superficial medidos en secciones del proyecto a nivel de base asfáltica.....	37
Tabla 8. Valores de regularidad (m/km) medidos en las mismas secciones de base asfáltica y de carpeta.....	38
Tabla 9. Comparación entre datos de IRI para base asfáltica y carpeta asfáltica.....	38
Tabla 10. Cantidad y extensión de pruebas de deflectometría realizadas en el proyecto.	40
Tabla 11. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW1	44
Tabla 12. Resumen de resultados de módulos de material - Diciembre 2014.....	45
Tabla 13. Resumen de resultados de módulos de material - Diciembre 2014.....	47
Tabla 14. Resultados comparativos - Diciembre 2014	47
Tabla 15. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW1a	49
Tabla 16. Resultados comparativos - Tramo FW1a	49
Tabla 17. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW2a	51
Tabla 18. Resultados comparativos - Febrero 2015.....	51
Tabla 19. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4c	53
Tabla 20. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4d	54
Tabla 21. Módulo resiliente característico de las capas del tramo Chilamate - Vuelta de Kooper	55
Tabla 22. Resultados comparativos - Carril Chilamate - Vuelta de Kooper	55
Tabla 23. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4f	56
Tabla 24. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4e	58
Tabla 25. Resultados comparativos - Carril Vuelta de Kooper - Chilamate	58
Tabla 26. Resultados comparativos - Mayo 2015	58
Tabla 27. Características de pavimento: Chilamate - Vuelta de Kooper.....	61
Tabla 28. Módulo resiliente de cada capa y número estructural requerido según el ESAL de diseño	62
Tabla 29. Deformaciones unitarias a diferentes profundidades.....	63
Tabla 30. Límites de falla según porcentajes de área agrietada.....	64
Tabla 31. Límites de falla para la deformación permanente	65
Tabla 32. Cantidad y extensión de pruebas de GRIP realizadas en el proyecto.	67
Tabla A.1. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 1 (Informe I-0741-15).	77

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 8 de 94
---	----------------------------------	----------------

Tabla A.2. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 2 (Informe I-0741-15). 78

Tabla A.3. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 3 (Informe I-0741-15). 79

Tabla A.4. Datos de IRI en base asfáltica para el tramo 1 (Informe I-0741-15). 80

Tabla A.5. Datos de IRI en base asfáltica para el tramo 2 (Informe I-0741-15). 81

Tabla A.6. Datos de IRI en base asfáltica para el Tramo 3 (Informe I-0741-15). 82

Tabla C. 1. Constantes de regresión del modelo constitutivo para material de préstamo. 94

Tabla C.2. Constantes de regresión del modelo constitutivo para material de subrasante 94



INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA ESTUDIO SOBRE LA "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO (IRI, FWD Y GRIP) DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO.4 SECCIÓN: BAJOS DE CHILAMATE – VUELTA DE KOOPER" (PARTE 1 DE 3).

1. FUNDAMENTACIÓN

La auditoría técnica externa a proyectos en ejecución para el sector vial, se realiza de conformidad con las disposiciones del artículo 6 de la Ley N°8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias y su reforma mediante la Ley N°8603, dentro del Programa de Fiscalización de la Calidad de la Red Vial del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica (UCR).

Asimismo, el proceso de auditoría técnica se fundamenta en el pronunciamiento C-087-2002 del 4 de abril del 2002, de la Procuraduría General de la República, que indica:

“...la fiscalización que realiza la Universidad a través del Laboratorio es una fiscalización externa, que trasciende los contratos de mérito, y por ende, obras específicas, para abarcar la totalidad de la red nacional pavimentada (por ende, proyectos ya finiquitados) y que incluso podría considerarse “superior”, en el sentido en que debe fiscalizar también los laboratorios que realizan análisis de calidad, auditar proyectos en ejecución, entre otros aspectos, evaluar la capacidad estructural y determinar los problemas de vulnerabilidad y riesgos de esa red. Lo cual implica una fiscalización a quienes podrían estar fiscalizando proyectos concretos.” (El subrayado no es del texto original).

2. ESTRUCTURA GENERAL DEL INFORME

Este informe corresponde a la primera entrega de un compendio de tres volúmenes que se desarrollaron a raíz de la Auditoría Técnica realizada al proyecto Ruta Nacional No.4 Sección: "Bajos De Chilamate – Vuelta De Kooper". En cada una de las partes se examina un tema específico relacionado con el desarrollo del proyecto, según se detalla a continuación:

- **PRIMERA PARTE: “Evaluación de los parámetros de desempeño (IRI, FWD Y GRIP) del proyecto.”**
- SEGUNDA PARTE: “Evaluación de los materiales de préstamo, base granular y la mezcla para base asfáltica y de la planta de producción de la Constructora Sánchez Carvajal”
- TERCERA PARTE: “Evaluación de los procesos constructivos de la vía e inspección de los puentes del proyecto ”

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 10 de 94
---	----------------------------------	-----------------

3. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA AUDITORÍA TÉCNICA

El propósito de las auditorías técnicas que realiza el LanammeUCR en cumplimiento de las tareas asignadas en la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria”, Ley N° 8114, es el de emitir informes que permitan a las autoridades del país, indicadas en dicha ley, conocer la situación técnica, administrativa y financiera de los proyectos viales durante todas o cada una de las etapas de ejecución: planificación, diseño y especificaciones; cartel y proceso licitatorio; ejecución y finiquito. Asimismo, la finalidad de estas auditorías consiste en que, la Administración, de manera oportuna tome decisiones correctivas y ejerza una adecuada comprobación, monitoreo y control de los contratos de obra, mediante un análisis comprensivo desde la fase de planificación hasta el finiquito del contrato.

3.1 OBJETIVO DEL INFORME DE AUDITORÍA TÉCNICA

El objetivo general del presente informe de Auditoría Técnica es realizar una evaluación del comportamiento estructural y funcional de varias secciones del pavimento del proyecto Chilamate-Vuelta de Kooper, para estimar el desempeño del proyecto.

Objetivos Específicos del Informe de Auditoría Técnica

- Realizar una medición de la condición superficial, mediante el uso del índice de regularidad superficial (IRI) en secciones del proyecto a nivel de la capa de base asfáltica, con el objetivo de determinar el porcentaje de reducción necesario para alcanzar los límites especificados para el proyecto a nivel de la superficie de ruedo. También se realiza un medición del IRI a nivel de superficie de ruedo y se comparan los resultados obtenidos con la especificación contractual.
- Determinar la condición estructural del pavimento del proyecto, realizando el ensayo de FWD de las siglas en inglés *Falling Weight Deflectometer* o ensayo de deflectometría de impacto, y un análisis de retrocálculo de módulos, en las secciones del proyecto donde la estructura de pavimento se encuentra terminada.
- Determinar las condiciones de fricción en la carpeta asfáltica por medio de la medición del Grip Number en secciones del proyecto donde se encuentra la estructura de pavimento completa (a nivel de superficie de ruedo), con el fin de identificar los niveles de rozamiento y su relación con la seguridad vial.

3.2 ALCANCE DEL INFORME DE AUDITORÍA TÉCNICA

El alcance del presente estudio se centró en la evaluación funcional y estructural de secciones de pavimento utilizando los parámetros de desempeño IRI (parámetro contractual), FWD (retrocálculo de módulos) y GRIP (condición de fricción).

Este informe se efectuó siguiendo los procedimientos de auditoría técnica, mediante la revisión de la documentación del proyecto, la verificación del proceso constructivo mediante visitas al sitio, la realización de ensayos y análisis de datos (IRI, FWD y GRIP).

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 11 de 94
---	----------------------------------	-----------------

4. INTEGRANTES DEL EQUIPO DE AUDITORÍA TÉCNICA DEL LANAMMEUCR

A continuación se describe el equipo auditor que desarrolló la primera entrega del informe LM-PI-AT-021-2015 (Parte 1 de 3)

Unidad de Auditoría Técnica

- Ing. Ana Hidalgo Arroyo, Auditora Técnica Líder
- Ing. Erick Acosta Hernández, Auditor Técnico
- Ing. Emilio Corrales Chacón, Auditor Técnico
- Ing. Wendy Sequeira Rojas, Coordinadora Unidad de Auditoría Técnica

Asesor Legal

- Lic. Miguel Chacón Alvarado

5. RESPONSABLES DEL PROYECTO

a) Responsables por parte de la Administración:

- Entidad ejecutora del contrato: Unidad Ejecutora, MOPT : Ing. María del Carmen Gallardo, Gerente Unidad Ejecutora
- Supervisión, por parte de la Administración: la verificación de calidad está a cargo de la empresa Vieto y Asociados, que es el organismo de ensayo encargado de efectuar los ensayos de verificación de calidad a los materiales y procesos constructivos que realiza el Contratista en este proyecto.

b) Responsables por parte de la empresa constructora:

- Contratista: La empresa Contratista la Constructora Sánchez Carvajal, adjudicataria de la Licitación Pública Internacional No. 2011LI-000037-32702” para la construcción del proyecto en la Ruta Nacional No.4 Sección: Bajos de Chilamate – Vuelta de Kooper.
- Laboratorio de Autocontrol de Calidad: el laboratorio de autocontrol es OJM Consultores de Calidad y Laboratorios S.A., que es la empresa encargada de efectuar los ensayos de control de calidad a los materiales y procesos constructivos que realiza el Contratista en este proyecto.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 12 de 94
---	----------------------------------	-----------------

6. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La fiscalización que realiza la Auditoría Técnica del LanammeUCR es un proceso independiente, basado en normas y procedimientos establecidos, aplicando criterios objetivos en procura de lograr el cumplimiento del alcance y los objetivos definidos para cada uno de los estudios desarrollados. Este proceso no limita a que algunas actividades puedan realizarse en conjunto con el auditado.

Es importante aclarar que la toma de muestras por parte de la Auditoría Técnica dentro del proceso de fiscalización, no tiene como finalidad cumplir la función del autocontrol ni la verificación de calidad, por lo que la información aportada no constituye un dictamen final de la calidad, sino un insumo para que la Administración analice los resultados obtenidos por el LanammeUCR y tenga una referencia en el orden de magnitud de los parámetros analizados

Este informe de Auditoría Técnica se efectuó siguiendo los procedimientos de auditoría técnica, mediante la revisión documental, ensayos de laboratorio y de campo, análisis de la información y visitas técnicas al sitio. Durante el proceso de auditoría realizado por la Auditoría Técnica del LanammeUCR se realizaron mediciones de perfil longitudinal (IRI), Deflectometría de impacto (FWD) y ficción (GRIP).

7. ANTECEDENTES

A manera de antecedentes del proyecto se describe a continuación una serie de procesos y comunicaciones que se mantuvieron con la Administración durante el desarrollo de este informe de auditoría técnica externa.

Se realizó una medición de IRI, el martes 20 de mayo de 2014 en las dos direcciones, cerca de la localidad de Vuelta de Kooper en 2,5 km, aproximadamente cerca del estacionamiento 26+100, correspondiente a los datos del informe de laboratorio I-0763-14. Posteriormente, se realizó un análisis de los datos del IRI en la capa de base asfáltica, y se presentó a la Administración mediante el oficio LM-AT-101-14 del 12 de septiembre de 2014. Adjunto a este oficio se envió a la Administración el análisis de retro cálculo de módulos realizado en la misma sección del proyecto. Se realizó una reunión el 03 de octubre de 2014, donde se trataron los temas del oficio mencionado anteriormente.

El 12 de febrero de 2015, se realizó una medición de IRI en la sección del proyecto que se encontraba a nivel de superficie de ruedo entre los estacionamientos 26+100 a 23+050, esto con el objetivo de comparar los datos obtenidos con la especificación del cartel. Los datos analizados se reportan en el oficio LM-AT-074-15 de 12 de mayo de 2015 y corresponden al informe de laboratorio I-188-15. Adicionalmente, se realizó la medición de FWD y GRIP, solamente en la sección del proyecto que se encontraba completa la estructura de pavimento.

Por último, se realizó una medición tanto en las secciones de base asfáltica como de mezcla el 25 de mayo de 2015 entre los estacionamiento 23+550 a 16+500, los resultados

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 13 de 94
---	----------------------------------	-----------------

del ensayo fueron remitidos a la Administración para su análisis vía correo electrónico el día 02 de junio de 2015 a la gerente del proyecto la Ing. María del Carmen Gallardo. Al igual que en los casos anteriores se realizó de forma complementaria la medición de FWD en las secciones del proyecto a nivel de mezcla asfáltica.

Por otro lado, es importante mencionar que a solicitud de la Administración se realizó en las instalaciones del LanammeUCR, los días 17 de noviembre de 2014 y 27 de marzo de 2015, una capacitación de dos días sobre análisis de retro cálculo de módulos y el ensayo de deflectometría de impacto (FWD) que estuvo a cargo de los ingenieros Ing. Luis Guillermo Loría PhD., coordinador del PITRA-LanammeUCR, Ing. José Pablo Aguiar PhD coordinador de la Unidad de Materiales y Pavimentos y la Ing. Paulina Leiva de la Unidad de Materiales y Pavimentos, también de PITRA-LanammeUCR.

A continuación se presenta la Tabla 1, donde se resumen las principales comunicaciones y oficios durante el periodo de la auditoría técnica.

Tabla 1. Resumen de correspondencia durante el proceso de auditoría técnica

Número de Oficio	Fecha	Asunto	Respuesta de la Administración
LM-AT-101-14	12/09/2014	Reporte de IRI en la base asfáltica y retro calculo de módulo	UBCK-707-2014 (02/10/2014)
LM-AT-119-14	30/10/2014	Defectos sobre la base granular	UBCK-764-2014 (3/11/2014)
LM-AT-131-14	15/12/2014	Parámetro volumétricos de la mezcla asfáltica	UCBK-63-2015 (26/01/2015)
LM-AT-017-15	23/01/2015	Resultado de calidad de sub rasante, préstamo y base granular (año 2014)	-
LM-AT-018-15	23/01/2015	Solicitud de información del mezcla asfáltica	UCBK-025-2015 (28/01/2015)
LM-AT-019-15	23/01/2015	Solicitud de información de puentes y paso a desnivel	UCBK-091-2015 (12/02/2015)
LM-AT-040-15	10/03/2015	Observaciones sobre puentes	-
LM-AT-043-15	05/03/2015	Respuesta UCBK-0123-2015	UCBK-0123-2015
LM-AT-058-15	07/04/2015	Solicitud de información de calidad de materiales	UCBK-0305-2015 (20/04/2015)
LM-AT-072-15	12/05/2015	Resultados de base asfáltica	-
LM-AT-070-15	03/06/2015	Solicitud de información de la planta de mezcla asfáltica	UBCK-462-2015 (20/06/2015) y UBCK-479-2015 (29/06/2015)
LM-AT-073-15	12/05/2015	Resultado de IRI en capa superficie de ruedo	-

- No se solicita respuesta por parte de la Administración

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 14 de 94
---	----------------------------------	-----------------

8. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en la construcción de un tramo de 27,09 kilómetros de la Ruta Nacional N° 4, en una sección localizada entre las Provincias: de Alajuela y Heredia; en los cantones San Carlos y Sarapiquí, respectivamente. Dicha sección inicia en la Ruta Nacional N° 4 en el poblado de Bajos de Chilamate (Estación 0+000), finalizando en la intersección de la Ruta Nacional N° 4 con la Ruta Nacional N° 751 (Estación 27+090) cerca del poblado de Vuelta de Kooper, según se muestra en la Figura 1.

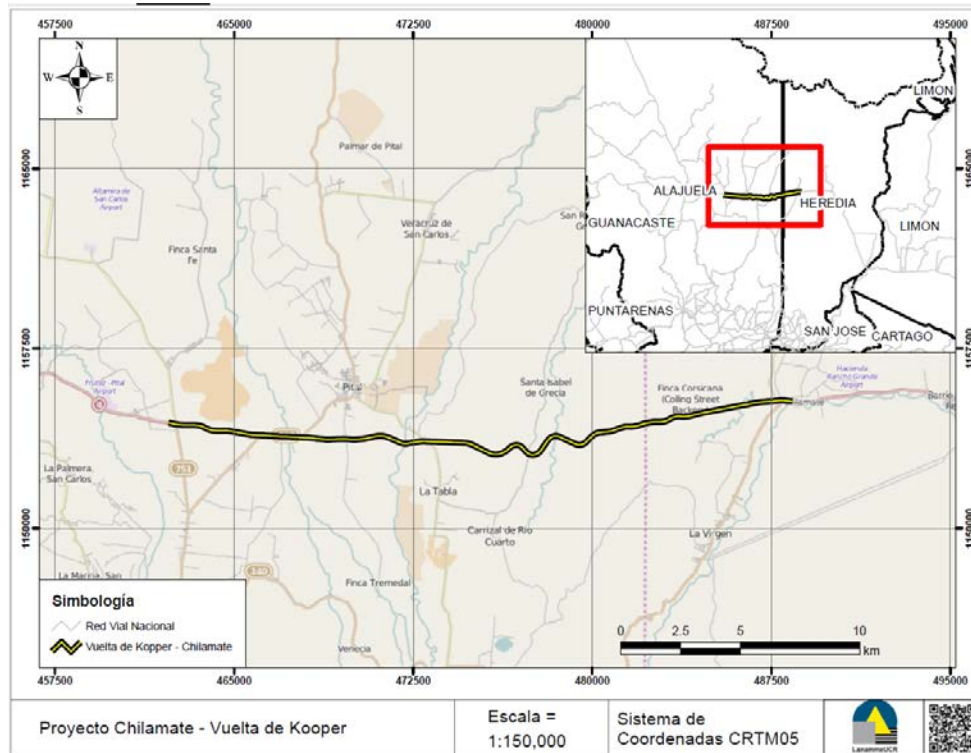


Figura 2. Localización del proyecto.

Las actividades previstas en el contrato, se resumen a continuación:

- Localizar y de ser necesario replantear las referencias, tanto altimétricas, como planimétricas de línea de centro del proyecto.
- Realizar la limpieza y corte de la capa vegetal, los cortes y los rellenos necesarios para construir las secciones típicas definidas en los planos constructivos del proyecto de acuerdo con el diseño horizontal y vertical de la carretera.
- Construir los sistemas de drenaje menor y mayor, así como las respectivas obras de arte, de acuerdo con ubicación, niveles, materiales, forma y dimensiones definidas en los planos constructivos del proyecto y que cumpla con la normativa técnica vigente.
- Construir los puentes viales de acuerdo con ubicación, niveles, materiales, dimensiones y sistema estructural definidos en los planos constructivos del proyecto y que cumpla con la normativa técnica vigente.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 15 de 94
---	----------------------------------	-----------------

- Construir las intersecciones de acuerdo con la ubicación, forma y dimensiones definidas en los planos constructivos del proyecto.
- Construir los componentes para la seguridad peatonal (aceras, bahías para autobuses, etc.) en la ubicación, forma, dimensiones y materiales definidos en los planos constructivos del proyecto o en los anexos al presente Cartel.
- Construcción de dos puentes peatonales de acuerdo con los requisitos y especificaciones que se encuentran en el Anexo No. 4, así como un plano “tipo” de de puente construido por el CONAVI en varias rutas nacionales, como ejemplo y con carácter meramente referencial.
- Construir la estructura de pavimento mostrada en los planos constructivos del proyecto.
- Suministrar y colocar el señalamiento vertical y horizontal definido en los planos constructivos del proyecto.
- Cercar los límites del derecho de vía, a lo largo de todo el proyecto.
- Acatar y aplicar las medidas de prevención, mitigación y de contingencia, todo de conformidad con lo estipulado en la Resolución de Viabilidad Ambiental del Proyecto emitida por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), según Resolución con No 914-2011-SETENA de fecha 26 de abril del 2011 y consignada en el expediente No. 1301-2007-SETENA

De los planos del proyecto se detalla la sección típica la cual se desglosa en la siguiente tabla.

Tabla 2. Sección típica eje principal del proyecto

Estructura de pavimento	Descripción	Espaldones	Descripción
Carpeta Asfáltica 8 cm	Clase B (Ítem CR402.01)	Carpeta Asfáltica 8 a 5 cm	Clase B (CR402.01)
Base Asfáltica 15 cm	Graduación A (Ítem CR406.01)	-	-
Base Granular 24 cm	Graduación A (Ítem CR301.03)	Base Granular 39 cm	Graduación A (CR301.03)
Préstamo 50 cm	Préstamo grava de río (CR204.07)	Préstamo 50 cm	Préstamo grava de río (CR204.07)

(-) En el espaldón no se incorpora base asfáltica

9. MARCO CONCEPTUAL DEL INFORME.

9.1 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

En la norma de ensayo ASTM E867-06 "Terminología Estándar relativa a Vehículos para Sistemas de Pavimentos" (*Standard Terminology Relating to Vehicle Pavement Systems*), se define el concepto de Rugosidad ("Roughness") como: "desviación de una determinada superficie respecto a una superficie plana teórica, con dimensiones que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de manejo, cargas dinámicas y el drenaje, por ejemplo, el perfil longitudinal y el perfil transversal."

El índice es denominado Índice de Regularidad Internacional o IRI, por sus siglas, pero a nivel práctico se utiliza el MRI, que es el promedio de los datos de IRI de la huella izquierda y la huella derecha (mediciones realizadas por el láser izquierdo y derecho). A lo largo del informe se hace referencia al IRI como nombre genérico, pero es importante recalcar que la medición aplicada es el promedio denominado como MRI (m/km).

De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades, la medición de IRI se expresa en metros por kilómetro (m/km). Estas unidades indican la sumatoria del movimiento vertical de una masa suspendida sobre un amortiguador y suspensión (con características determinadas), producto de las irregularidades de la superficie del pavimento (perfil longitudinal), las cuales se expresan en metros por kilómetro.

El cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI) involucra la utilización de herramientas matemáticas, estadísticas y computacionales que permiten derivar la medida de regularidad asociada al camino; lo cual contempla etapas claramente diferenciadas y ajustadas a un desarrollo sistemático.

El Índice de Regularidad Internacional (IRI) como indicador estadístico de la irregularidad superficial de pavimento representa la diferencia entre el perfil longitudinal teórico (recta o parábola continua perfecta, $IRI = 0$) y el perfil longitudinal real existente en el instante de la medida.

El perfil ideal de una carretera recién construida tiene un estado cero, pero se define por su IRI inicial mayor a cero, debido principalmente a que alcanzar valores de $IRI = 0$ es sumamente difícil desde el punto de vista constructivo. Una vez puesta en servicio, la regularidad del pavimento se modifica lentamente en función del paso del tránsito.

La longitud del tramo a medir es importante para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI). Es necesario establecer un intervalo de longitud, ya que intervalos de longitudes mayores ocultan niveles altos de regularidad superficial en los pavimentos, obteniendo de una manera inadecuada valores de Índice de Regularidad Internacional (IRI) satisfactorios. Por otra parte, la utilización de intervalos de longitudes menores para la determinación del Índice de Regularidad Internacional (IRI) puede detectar niveles altos de regularidad, contribuyendo a obtener pavimentos con mejores niveles de seguridad y confort.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 17 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Consideraciones e implicaciones de la medición del Índice de Regularidad Superficial

Las consideraciones más importantes sobre el Índice de Regularidad Internacional Superficial son:

- El IRI se determina mediante un cálculo matemático realizado con las ordenadas o cotas de una línea de perfil longitudinal cuyo resultado es independiente de la técnica o equipo utilizado para obtener el perfil.
- Es importante considerar para el cálculo del IRI la representatividad de las ordenadas que se introducen, es decir, la confiabilidad de la técnica o equipo con el que se obtiene el perfil y la frecuencia del muestreo utilizado.

El cálculo matemático del IRI relaciona la acumulación de desplazamientos del sistema de suspensión de un vehículo modelo, dividida entre la distancia recorrida por el vehículo a una velocidad de 80 km/hora, y se expresa en mm/m o m/km. Para caminos pavimentados el rango de la escala del IRI es de 0 a 12 m/km, donde 0 (cero) representa una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable; para vías no pavimentadas la escala se extiende hasta el valor de 20. A partir del estudio realizado por el Banco Mundial, se propuso una escala de medición de la regularidad superficial para diferentes tipos de vías (ver Figura 2).

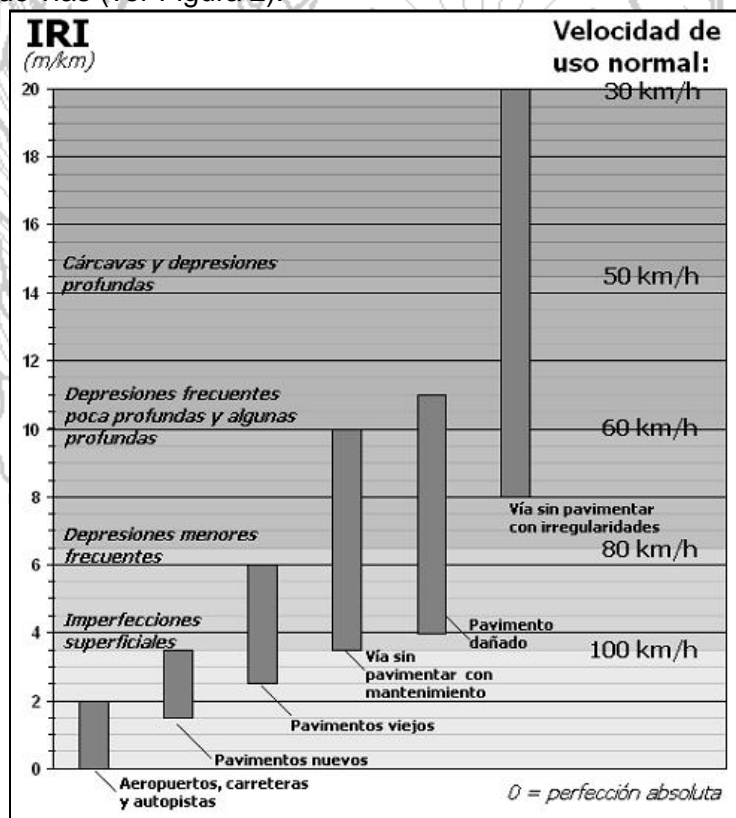


Figura 3. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías. Fuente: Unidad de Investigación, LanammeUCR. “Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI”, Costa Rica, 2008.

Especificaciones de IRI empleadas en otros países

Actualmente, a nivel internacional se están llevando a cabo proyectos para afinar aún más el valor del Índice de Regularidad Internacional inicial en la construcción de pavimentos. Las investigaciones tienen como objetivo proponer nuevos valores iniciales del Índice de Regularidad Internacional para la recepción de pavimentos, proponer acciones de mantenimiento efectivas y recomendar especificaciones para controlar el Índice de Regularidad Internacional durante el proceso constructivo.

En el contexto latinoamericano países como Chile y México, utilizan el valor de Índice de Regularidad Internacional como uno de los parámetros de aceptación de proyectos de obra vial. En el contexto centroamericano, El Salvador especifica que el valor de Índice de Regularidad Internacional medido en tramos de 100m, no debe sobrepasar los 2,5 m/km. para pavimentos de concreto hidráulico de vías interurbanas.

A continuación se presentan en la Tabla 3, algunas de las especificaciones de Índice de Regularidad Internacional empleadas en otros países, así como el intervalo de medición empleado en cada uno.



Tabla 3. Especificaciones Internacionales de Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Lugar	Procedimiento general	Requerimientos de IRI según tipo de pavimento o superficie																
		Asfalto	Hidráulico	Tratamiento superficial														
Ministerio de Obras Públicas de Chile	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 2.0 m/km Promedio Individual ≤ 2.8 m/km		Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 3.0 m/km Promedio Individual ≤ 4.0 m/km														
	Recepción de Obra Nueva																	
	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 1.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.3 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 2.8 m/km, en el 99% de los datos	IRI ≤ 2.4 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.9 m/km, en el 85% de los datos IRI ≤ 3.4 m/km, en el 99% de los datos														
CR-2002	IRI obtenido en 5 tramos consecutivos con un intervalo de medición de 200 m	Promedio de 5 tramos consecutivos ≤ 2.0 m/km Promedio Individual ≤ 3.0 m/km		----														
Ministerio de Fomento de España	IRI obtenido en tramos con un intervalo de medición de 100 m	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.0 m/km, en el 80% de los tramos del proyecto IRI ≤ 2.5 m/km, en el 100% de los tramos del proyecto																
WisDOT, Wisconsin Estados Unidos	IRI obtenido en tramos de 1.609 km (1 milla)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>IRI m/km</th> <th>Tiempo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 1.1</td> <td>Pav. Nuevo</td> </tr> <tr> <td>< 1.17</td> <td>1 Año</td> </tr> <tr> <td>< 1.29</td> <td>2 Años</td> </tr> <tr> <td>< 1.33</td> <td>3 Años</td> </tr> <tr> <td>< 1.37</td> <td>4 Años</td> </tr> <tr> <td>< 1.45</td> <td>5 Años</td> </tr> </tbody> </table>	IRI m/km	Tiempo	< 1.1	Pav. Nuevo	< 1.17	1 Año	< 1.29	2 Años	< 1.33	3 Años	< 1.37	4 Años	< 1.45	5 Años	----	----
IRI m/km	Tiempo																	
< 1.1	Pav. Nuevo																	
< 1.17	1 Año																	
< 1.29	2 Años																	
< 1.33	3 Años																	
< 1.37	4 Años																	
< 1.45	5 Años																	
Suecia	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 200 m	IRI ≤ 1.4 m/km IRI ≤ 2.4 m/km		----														
Ministerio de Obras Públicas de El Salvador	Caminos Rurales																	
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 3.0 m/km	----	----														
Quebec, Canadá	Vías Interurbana																	
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 2.0 m/km	IRI ≤ 2.5 m/km	----														
Eslovenia	Carreteras de alto tránsito																	
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	2.0 \leq IRI \leq 2.6 m/km 1.2 \leq IRI \leq 1.8 m/km	----	----														
Portugal	Carreteras de bajo tránsito																	
	IRI obtenido en tramos de 20 m IRI obtenido en tramos de 100 m	4.0 \leq IRI \leq 4.6 m/km 3.0 \leq IRI \leq 3.8 m/km	----	----														
	No se indica el intervalo de medición	IRI ≤ 1.5 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 80% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 90% de los datos	IRI ≤ 2.0 m/km, en el 50% de los datos IRI ≤ 2.5 m/km, en el 75% de los datos IRI ≤ 3.0 m/km, en el 100% de los datos	----														

Fuente: Informe UI-03-08, Unidad de Investigación, LanammeUCR. "Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo del IRI", Costa Rica, 2008.

9.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO

La evaluación estructural del pavimento consta de varias etapas que permiten garantizar un acertado diagnóstico del desempeño actual y futuro del proyecto, el cual se basa en las deflexiones que experimenta el pavimento al ser sometido al peso de los vehículos. Dichas deflexiones son un indicador muy importante del comportamiento de los pavimentos y se asocian directamente con la ocurrencia de agrietamientos por fatiga y deformaciones permanentes en la capa de rodamiento, tales como roderas; lo cual reduce la vida útil del pavimento.

Existen actualmente diversas técnicas para obtener dichas deflexiones, las cuales se basan en la teoría del pavimento como una estructura multicapa, cuyo comportamiento sigue la teoría de elasticidad. El equipo utilizado en el LanammeUCR para la evaluación de deflexiones en pavimentos, conocido como FWD por sus siglas en inglés (Falling Weight Deflectometer) o simplemente deflectómetro de impacto, utiliza esta metodología.

El deflectómetro de impacto es un equipo de alta tecnología que mide el hundimiento o deflexión instantánea que experimenta el pavimento en un punto, debido al golpe de un peso lanzado desde un mecanismo diseñado específicamente con este propósito, de tal manera que produzca una fuerza de reacción en el pavimento de 40 kN (566 MPa).

Esta carga cae sobre un plato circular cuya área de contacto es similar a la de una llanta de vehículo (300 mm de diámetro en este caso); las deflexiones obtenidas son registradas por 9 sensores, el primero directamente en el plato de carga, y los demás dispuestos en un arreglo lineal con una longitud máxima de 180 centímetros. Con esta disposición es posible obtener además la forma y tamaño del cuenco de deflexiones (Figura 3), el cual se relaciona con aspectos como el espesor y rigidez del pavimento, las características de los materiales de las capas subyacentes y la magnitud de la carga aplicada. Es posible, con un procedimiento de cálculo inverso (retrocálculo), determinar los módulos de elasticidad de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento, así como su vida útil remanente.

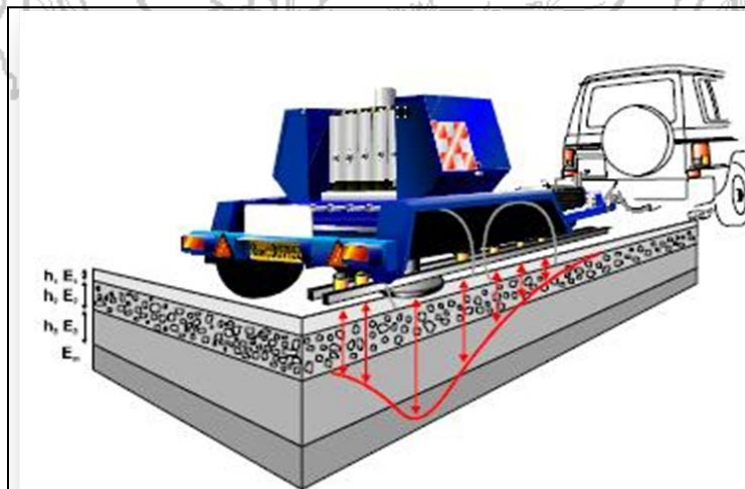


Figura 4. Cuenco de deflexiones producido por el equipo FWD

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 21 de 94
---	----------------------------------	-----------------

En la primera etapa de la evaluación estructural se realizan las mediciones a cada 50 metros intercaladas entre ambos carriles. Posteriormente, se realiza un retrocálculo de módulos que es esencialmente una evaluación mecanicista de la deflexión superficial del pavimento generada por el deflectómetro de impacto. El retrocálculo toma una deflexión medida en la superficie e intenta ajustarla con una deflexión teórica generada a partir de una estructura de pavimento con idénticas rigideces de capa (módulos).

Estas deflexiones teóricas son comparadas con las deflexiones medidas y los módulos asumidos son ajustados en un proceso iterativo hasta que las deflexiones teóricas y las medidas se igualen (en un rango aceptable). El proceso suele ser iterativo y normalmente se hace por medio de un software, para la elaboración de este informe se utilizó el software Elmod 6.0 de la compañía Dynatest International. Los módulos derivados de esta forma son considerados representativos de los materiales que conforman las capas de la estructura del pavimento al momento en que las mediciones fueron realizadas y son comparables con los módulos propuestos en el diseño para corroborar si la estructura construida concuerda con la estructura diseñada.

Una vez efectuado el análisis de retrocálculo de módulos es necesario determinar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Para ello se utiliza el parámetro conocido como Error Medio Cuadrático o por sus siglas RMS. Dicho parámetro es una medida estadística del ajuste que se obtiene al comparar las curvas de deflexión medida en campo por medio del FWD y la deflexión calculada durante el análisis. Errores con valores cercanos a cero (0) indican que existe un muy buen ajuste entre las curvas comparadas, por lo que consecuentemente habrá una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos. Sin embargo, la teoría y la experiencia indican que es relativamente difícil conseguir un RMS igual a cero por lo cual un valor menor o igual a 5% se considera como un resultados satisfactorio. A pesar de que el RMS es un valor estadístico que sirve para confiar en los resultados de módulo obtenidos, existe la posibilidad de contar con módulos de capa inadecuados y con un buen RMS o viceversa, por lo que la experiencia se convierte en una herramienta fundamental para aprobar este tipo de análisis.

Teóricamente el proceso de retrocálculo de módulos asume una serie de suposiciones que hacen posible el cálculo de las propiedades mecánicas de cada capa. Supuestos como materiales homogéneos, isotrópicos, continuos, con comportamiento dentro del rango elástico - lineal, todo lo anterior bajo el marco de una superficie semi-infinita son básicos de la teoría de multicapa elástica. Sin embargo, en muchas ocasiones estos supuestos distan de una condición real, por lo que estadísticamente existirá variabilidad en los resultados. En este sentido, para incluir esta variabilidad, en este informe se reportarán los siguientes resultados:

- Módulo retrocalculado promedio
- Desviación estándar
- Percentil 16 del módulo retrocalculado, el cual es el que es considerado como el módulo final característico de cada capa

Para garantizar que la variabilidad de los datos se está tomando en cuenta en el análisis, es necesario saber que la distribución de resultados del programa presenta una tendencia

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 22 de 94
---	----------------------------------	-----------------

de tipo log-normal. Al ser una función de probabilidad con propiedades logarítmicas, los límites de los intervalos de confianza se expresan como una proporción entre la media estadística y la desviación estándar obtenidas.

Cuando la magnitud de la desviación es equivalente a la unidad ($\sigma=1$) se dice que la variabilidad de los datos es nula, por lo que todos los valores obtenidos son iguales a la media. Por otra parte, cuando el valor de desviación estándar es mayor a la unidad ($\sigma>1$) significa que existe variabilidad en los datos, la cual es proporcional a la magnitud desviación obtenida.

En este estudio, tal y como se indica anteriormente, el módulo resiliente reportado corresponde al percentil 16 (P_{16}) de la distribución de resultados obtenidos. Dado que este corresponde al primer límite inferior de confianza, el valor de módulo reportado corresponde al cociente de la media y el valor de la desviación estándar.

Deflectometría de Impacto para caracterizar la calidad de la construcción del pavimento

El uso de materiales adecuados así como buenas prácticas constructivas son vitales para garantizar pavimentos de calidad y duraderos. Las técnicas de control y aseguramiento de la calidad pueden proveer al dueño de la carretera o a la agencia de transportes, los medios para garantizar que estos fines deseados se alcancen. No obstante, existen otras metodologías que pueden brindar resultados confiables sobre la calidad constructiva de un pavimento. Tal es el caso de la Deflectometría de Impacto (FWD), la cual se ha utilizado con éxito para estimar las propiedades de los materiales, principalmente su rigidez a través del módulo resiliente, y las variaciones en cada una de las capas que conforman la estructura.

Aunque las pruebas tradicionales de Control de Calidad y Aseguramiento de la Calidad se han utilizado con éxito en el pasado durante la construcción de pavimentos, estas pruebas tradicionales tienen algunas deficiencias, por ejemplo:

- Los métodos de ensayo consumen un tiempo considerable en laboratorio, y por lo tanto a menudo tienen una frecuencia de muestreo que es inadecuado para los materiales de construcción que presentan mucha variabilidad (tales como los suelos).
- Muchos ensayos solicitados en las especificaciones producen medidas indirectas de calidad de pavimento, que son a su vez, relacionadas con la rigidez o la capacidad soportante de estas capas de pavimento (CBR por ejemplo).

Basándose únicamente en la frecuencia de muestreo, el Deflectómetro de Impacto (FWD) puede proporcionar información más precisa que la que brindan los ensayos tradicionalmente utilizados para realizar el control de calidad durante la construcción del pavimento. Sin embargo, es importante considerar que aunque este tipo de ensayos no destructivos pueden llevarse a cabo rápidamente y con una mayor frecuencia de muestreo que la mayoría pruebas tradicionales; también pueden tener sus propios inconvenientes, por ejemplo en el caso de materiales granulares, los cambios en el

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 23 de 94
---	----------------------------------	-----------------

contenido de humedad u otros factores que ocurren después la construcción puede afectar las deflexiones, y por ende, los resultados y las conclusiones que se extraen del análisis de esos datos.

Por las razones anteriores, un enfoque ideal para el "control total de la calidad" en la construcción de obras nuevas podría ser una combinación de los procedimientos más tradicionales y los más recientes (FWD u otras metodologías de ensayos no destructivos).

9.3 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE FRICCIÓN DEL PAVIMENTO

El elemento de fricción de una carretera se define como el nivel de agarre o rozamiento que experimenta la llanta del vehículo con la carretera, esto quiere decir que a mayor nivel de rozamiento, mayor es la fuerza que trata de oponerse al deslizamiento del vehículo en la superficie de rodamiento. Lo anterior constituye a la fricción como un elemento de relevancia en el nivel de seguridad vial que ofrecerá una carretera, así por ejemplo diversos estudios a nivel internacional relacionan bajos niveles de rozamiento de un tramo vial con índices elevados de ocurrencia de accidentes.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Seguridad Vial, el nivel de fricción que ofrece la carretera está relacionado con el desempeño del vehículo durante su recorrido por el trazado. Específicamente, el efecto del nivel de fricción se acentúa en las secciones de curva y durante el frenado. Esta situación se hace más crítica bajo condiciones de lluvia o con la carretera húmeda, dado que el agua en la superficie de rueda actúa como un lubricante entre la llanta y el pavimento afectando la estabilidad del vehículo en las curvas y la distancia de frenado.

La resistencia al deslizamiento cambia con el tiempo. Típicamente, se incrementa en los primeros dos años posteriores a la construcción cuando el ligante asfáltico que cubre los agregados se va desgastando como consecuencia del tránsito, posteriormente decrece durante la vida útil remanente del pavimento debido al efecto de pulimiento o desgaste que experimenta el agregado con el paso del tránsito.

Asimismo, la fricción de la superficie de un pavimento es un parámetro que varía significativamente por cambios estacionales del clima como lo han demostrado a múltiples investigaciones a nivel internacional.

Así por ejemplo, de acuerdo con "*The Little book of Tire Pavement Friction*" (2012), dentro de los factores operacionales que afectan la medición de la fricción, se indica que durante los meses de verano, la resistencia al deslizamiento es menor que en otros momentos del año, "*este efecto puede deberse a la acumulación de partículas pulidas del pavimento que decrecen la microtextura y macrotextura o puede deberse también a contaminación provocada por los vehículos debido a derrames de aceite o grasa*".

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 24 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Por otra parte, según el Instituto Mexicano del Transporte en su publicación técnica No. 340 "Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado" (2010), indica que "generalmente hay una disminución del coeficiente de fricción en el pavimento debido a cambios estacionales. En el verano se presentan los niveles más bajos de fricción, debido a que el clima seco permite la acumulación de partículas finas y polvo que aceleran el pulido de la superficie del pavimento. En invierno, la lluvia lava las partículas finas y esto da como resultado una microtextura y macrotextura más alta y consecuentemente la superficie del pavimento presenta una fricción alta (Masad et. al., 2009)".

La resistencia al deslizamiento es un valor obtenido en sitio mediante algún instrumento, como por ejemplo el Griptester, que indica un coeficiente adimensional (Grip Number) representativo de las fuerzas de fricción que moviliza el neumático que emplea el equipo.

El coeficiente de fricción o *Grip Number* es medido y clasificado por el LanammeUCR en las evaluaciones bienales de la Red Vial Nacional (RVN) de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación internacional del pavimento según el Grip Number.

GN	Condición	Deslizamiento	Nivel		Tipo de Pavimento característico
			Probabilidad de accidentes	Riesgo medio de accidentabilidad	
< 0,50	Malo	Muy deslizante	Muy alta probabilidad	mayor a 20	Pavimento flexible compuesto de agregado pulimentable ej: calizo
0,50 – 0,60	Regular	Deslizante	Alta probabilidad	16 a 20	Pavimento flexible con alto grado de exudación y pérdida de textura
0,60 – 0,78	Bueno	Poco deslizante	Moderada probabilidad	10 a 16	Pavimento rígido y flexible con buena textura
> 0,78	Muy Bueno	No deslizante	Poca probabilidad	menor a 10	Pavimento nuevo o sobrecapas

* Número de accidentes por cada millón de vehículos / kilómetro, en función del coeficiente de fricción, obtenidos en Gran Bretaña, según memorias del 5to Simposio de Características Superficiales de Pavimentos, Toronto, Canadá, 2004. Tabla modificada LanammeUCR 2013.

Fuente: Informe de Evaluación de la RVN pavimentada años 2014-2015, LanammeUCR.

De acuerdo con esta clasificación, los pavimentos con valores de *Grip Number* por debajo de 0,5 presentarán una baja resistencia a la fricción y su condición deslizante representa un alto riesgo para la seguridad vial de los usuarios.



10. AUDIENCIA A LA PARTE AUDITADA PARA ANÁLISIS DEL INFORME PRELIMINAR LM-PI-AT-021B-15.

Como parte de los procedimientos de auditoría técnica, mediante oficio LM-AT-128-15 del 05 de octubre del 2015 se envía el informe preliminar LM-PI-AT-021B-15, partes 1, 2 y 3 a la parte auditada para que sea analizado y de requerirse, se proceda a esclarecer aspectos que no hayan sido considerados durante el proceso de ejecución de la auditoría, por lo que se otorga un plazo de 15 días hábiles posteriores al recibo de dicho informe para el envío de comentarios al informe preliminar.

Posterior al envío del informe preliminar se le brinda audiencia a la parte auditada para que se refiera al informe preliminar, el día 19 de octubre del 2015 a las 9:00am en las instalaciones del LanammeUCR en donde se realizó la presentación del informe LM-PI-AT-021B-15 en su versión preliminar y en la que participaron los ingenieros Ing. María del Carmen Gallardo, el Ing. Francisco Mata Montero, Ing. David Mesén Agüero por parte del MOPT. También se presentaron los representantes de la empresa encargada de la Supervisión del proyecto, Vieto y Asociados S.A. los ingenieros: Ing. Denis Fernández Mesen, Ing. Carolina Gomez y el Ing. Miguel Rojas Salas. Así como los auditores encargados del informe Ing. Erick Acosta, Ing. Emilio Corrales, Ing. Victor Cervantes, el Ing. Francisco Fonseca y la Ing. Ana Elena Hidalgo, la coordinadora de la Unidad de Auditoría Técnica-PITRA LanammeUCR, Ing. Wendy Sequeira Rojas.

El día 20 de octubre de 2015, se recibe el oficio UBCK-821-2015, remitido por la gerente del proyecto Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper, Ing. María del Carmen Gallardo, en el cual se solicita una prórroga al plazo de entrega del documento de descargo del informe preliminar LM-PI-AT-021B-15, hasta el 30 de octubre del 2015.

La prórroga es concedida por parte de la Unidad de Auditoría Técnica del PITRA-LanammeUCR, considerando la importancia que tiene para el proceso de auditoría técnica. El 03 de noviembre del 2015, se recibe el oficio UBCK-849-2015, donde la gerente del proyecto y la supervisión del proyecto en cuestión remiten las observaciones generadas a partir de la presentación y entrega del informe LM-PI-AT-021B-15.

Por lo tanto, en cumplimiento de los procedimientos de auditoría técnica, una vez analizado el documento en mención y considerando la evidencia presentada, se procede a emitir el informe LM-PI-AT-021-15 en su versión final para ser enviado a las instituciones que indica la ley.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 26 de 94
---	----------------------------------	-----------------

11. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA TÉCNICA

Todos los hallazgos y observaciones declarados por el equipo de auditoría técnica en este informe de auditoría técnica se fundamentan en evidencias representativas, veraces y objetivas, respaldadas en la experiencia técnica de los profesionales de auditoría técnica, el propio testimonio del auditado, el estudio de los resultados de las mediciones realizadas y la recolección y análisis de evidencias.

Se entiende como hallazgo de auditoría técnica, un hecho que hace referencia a una normativa, informes anteriores de auditoría técnica, principios, disposiciones y buenas prácticas de ingeniería o bien, hace alusión a otros documentos técnicos y/o legales de orden contractual, ya sea por su cumplimiento o su incumplimiento.

Por otra parte, una observación de auditoría técnica se fundamenta en normativas o especificaciones que no son necesariamente de carácter contractual, pero que obedecen a las buenas prácticas de la ingeniería, principios generales, medidas basadas en experiencia internacional o nacional, y que tienen la misma relevancia técnica que un hallazgo.

Por lo tanto, las recomendaciones que se derivan del análisis de los hallazgos y observaciones deben ser atendidas planteando acciones correctivas y preventivas, que minimicen el riesgo potencial de incumplimiento.

11.1 SOBRE EL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Tal como se indicó en la sección de Antecedentes, durante el desarrollo de esta auditoría técnica se realizaron 2 mediciones de IRI a nivel de base asfáltica y 2 mediciones a nivel de superficie de ruedo. En la siguiente tabla se detalla la información general de cada ensayo. (Ver Tabla 5)

Las observaciones y hallazgos incluidos en esta sección muestran los resultados de analizar los datos de IRI con respecto a la especificación contractual, así como una comparación entre los datos de IRI obtenidos en la base asfáltica y los obtenidos a nivel de superficie de ruedo con el fin de presentar el porcentaje de mejora.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 27 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Tabla 5. Cantidad y extensión de pruebas de IRI realizadas en el proyecto

Fecha	Nivel de rasante	Tramo	Carril	Punto inicial	Punto final	Total (km)	
Mayo 2014 Informe I-0763-14	Base asfáltica	1	A	Vuelta de Kooper - Chilamate	26+100	24+550	2,05
		1	B	Chilamate - Vuelta de Kooper	26+100	24+550	
		2	C	Vuelta de Kooper - Chilamate	23+550	23+050	
		2	D	Chilamate - Vuelta de Kooper	23+550	23+050	
Febrero 2015 Informe I-0249-15	Capa asfáltica	1	A	Vuelta de Kooper - Chilamate	26+100	24+550	2,05
		1	B	Chilamate - Vuelta de Kooper	26+100	24+550	
		2	C	Vuelta de Kooper - Chilamate	23+550	23+050	
		2	D	Chilamate - Vuelta de Kooper	23+550	23+050	
Mayo 2015 Informe I-0741-15	Base asfáltica	1	E	Chilamate - Vuelta de Kooper	20+300	20+800	6,00
		2	F	Chilamate - Vuelta de Kooper	17+500	19+300	
		3	G	Chilamate - Vuelta de Kooper	16+600	17+300	
		1	H	Vuelta de Kooper - Chilamate	20+300	20+800	
		2	L	Vuelta de Kooper - Chilamate	17+500	19+300	
		3	K	Vuelta de Kooper - Chilamate	16+600	17+300	
Mayo 2015 Informe I-0741-15	Capa asfáltica	1	A	Chilamate - Vuelta de Kooper	23+550	25+500	8,50
		1	D	Vuelta de Kooper - Chilamate	23+550	25+500	
		2	B	Chilamate - Vuelta de Kooper	25+500	26+100	
		2	C	Vuelta de Kooper - Chilamate	25+500	26+100	
		3	E	Vuelta de Kooper - Chilamate	14+800	16+500	
		3	F	Chilamate - Vuelta de Kooper	14+800	16+500	

Hallazgo 1: El valor de IRI calculado en secciones del proyecto a nivel de la superficie de ruedo es mayor al especificado a nivel contractual.

Este análisis realizado por Auditoría Técnica tiene como objetivo determinar el valor del índice de Regularidad Internacional de la superficie de ruedo del proyecto en cuestión, y comparar los resultados obtenidos con la especificación descrita en el Cartel de Licitación, en la sección EE007 Control de Rugosidad (IRI) en Carpeta de Mezcla Asfáltica, donde se menciona:

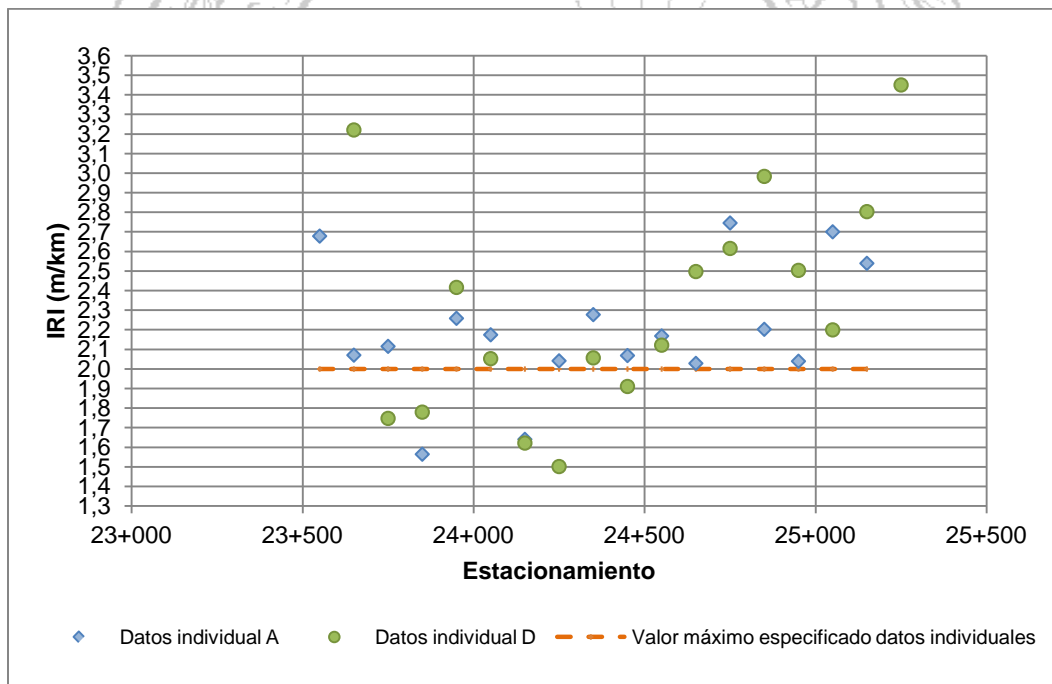
"(...)Se medirá en forma continua en tramos de 100 metros, o fracción en caso de que el último tramo de un sector homogéneo no alcance a los 100 m. Se informará el IRI (m/Km.) con un decimal. La evaluación del IRI se realizará por tractos de cinco tramos consecutivos. Se entenderá que la superficie del pavimento tiene una rugosidad aceptable si todos los promedios consecutivos de cinco valores de IRI tienen un valor igual o inferior a 1,5 m/km., y ninguno de los valores individuales supera 2,0 m/Km. Cualquier incumplimiento individual en tramos de 100 metros será sujeto de reparación o sustitución de las capas que amerite, a cuenta del Contratista..."

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 28 de 94
---	----------------------------------	-----------------

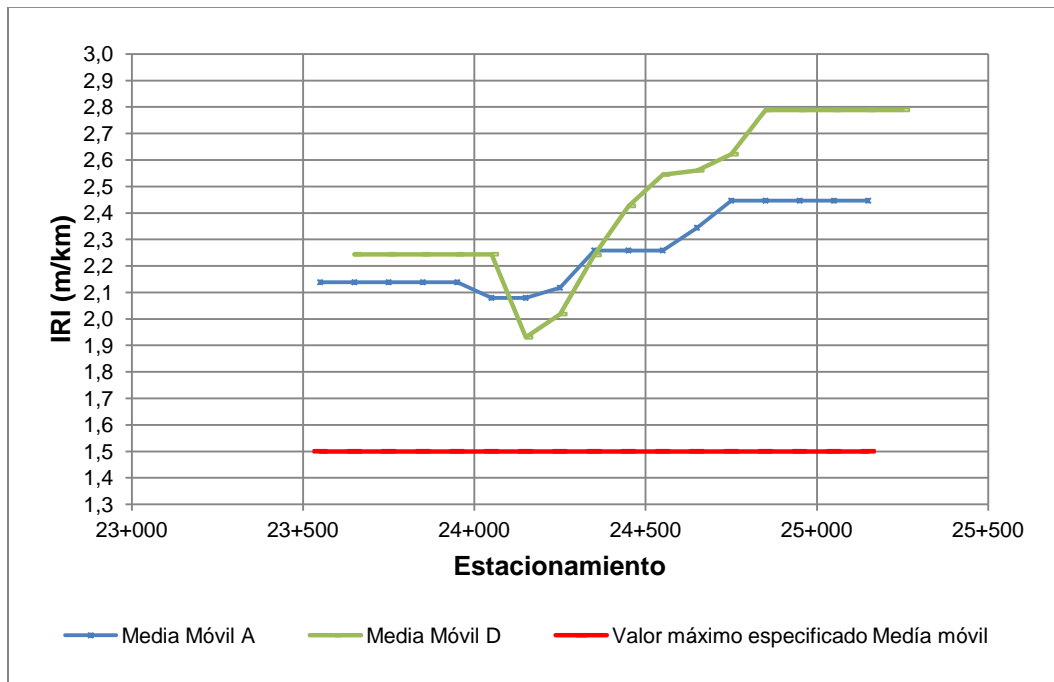
Tal y como lo menciona la especificación, se realizó un análisis tanto para valores individuales como para el promedio de cinco valores individuales consecutivos (media móvil) con los resultados obtenidos en el ensayo realizado en el mes de mayo de 2015 sobre la carpeta. Este análisis se realizó tanto para las tres secciones ensayadas como para cada carril (sentido de circulación), según se muestra a continuación.

Para el tramo 1, se muestran los datos en la Figura 4, los valores obtenidos del ensayo para el tramo 2 se resumen en la Figura 5 y por último los datos analizados del tramo 3, se pueden observar en la Figura 6. Los datos puntuales que sustentan estos gráficos se presentan en las Tablas A.1, A.2 y A.3 del Anexo A.

Las líneas continuas en ambos gráficos indican el límite máximo establecido en la especificación cartelaria, tal y como se observa en la Figura 4b, el 100% de los datos obtenidos de IRI para el promedio consecutivo de cinco valores está por encima del valor especificado de 1,5m/km para el sentido A y D. En el caso de datos individuales (Figura 4a) se cuenta con 88,2% y 70,6% por encima del límite de 2,0m/km para A y D, respectivamente.



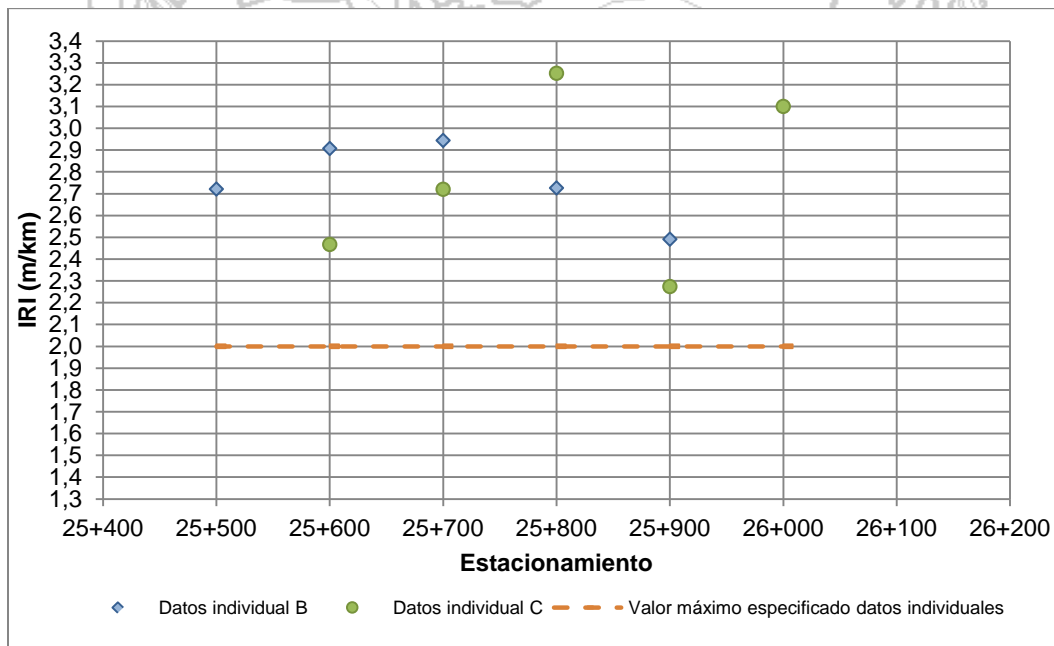
(a)



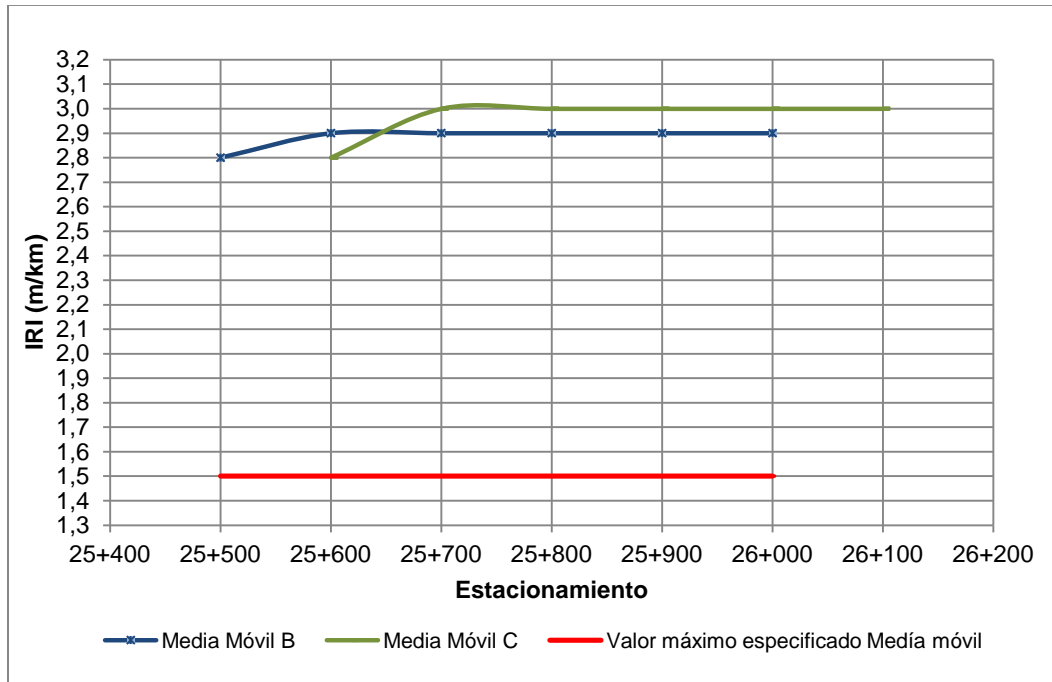
(b)

Figura 5. Valores de IRI (m/km) del tramo 1, para valores individuales (a) y media móvil (b).

En el caso del tramo 2, tanto para los valores individuales como para la media móvil el 100% de los valores obtenidos se encuentran por encima de los límites respectivos (Figura 5).



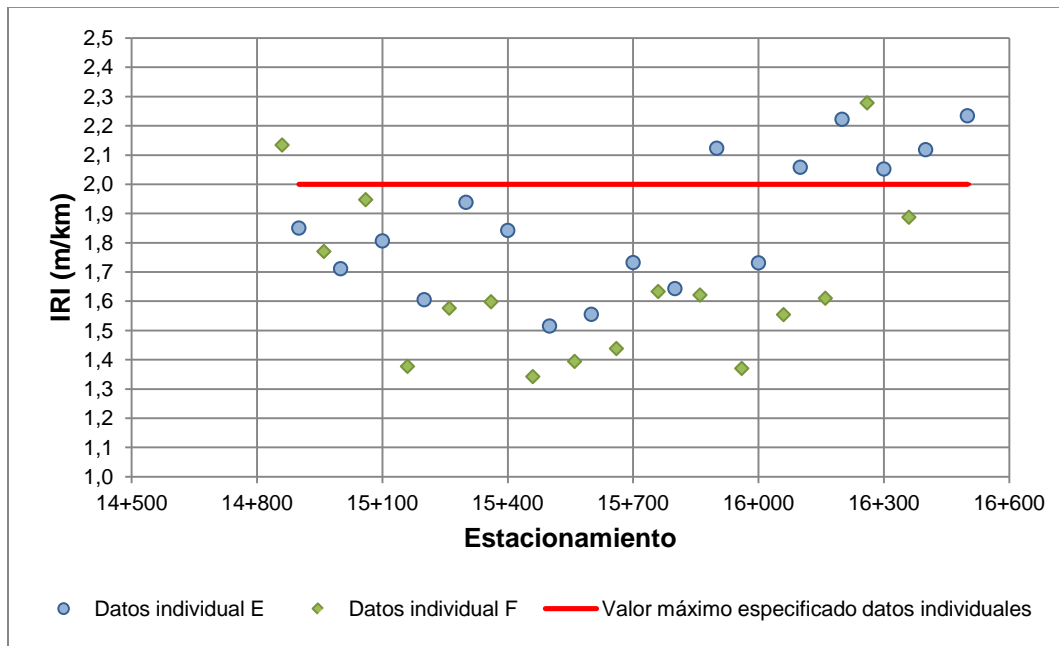
(a)



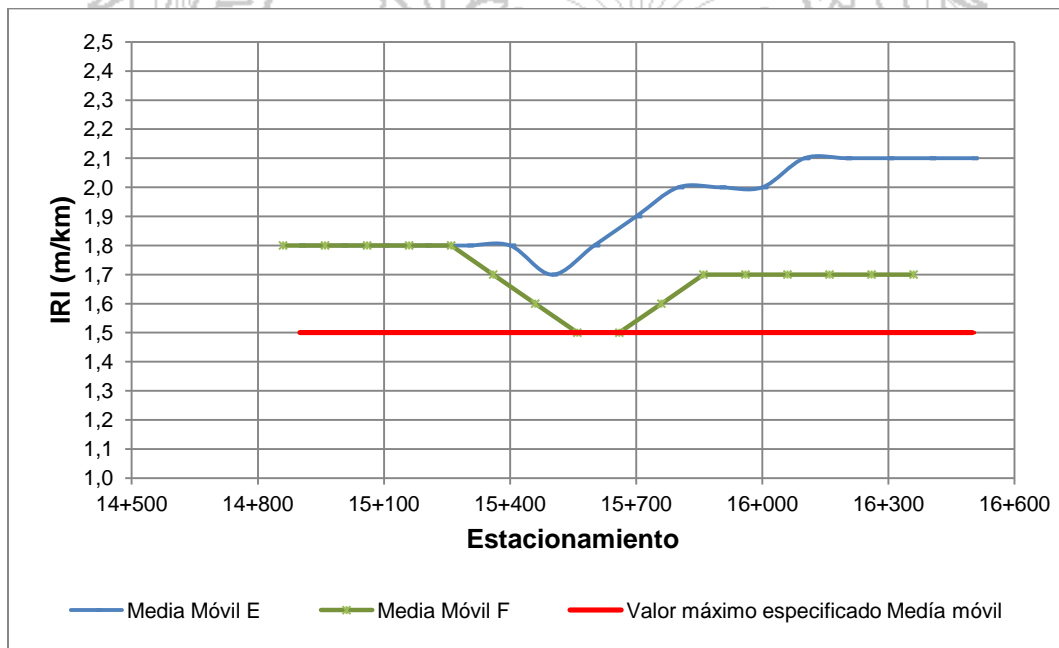
(b)

Figura 6. Valores de IRI (m/km) del tramo 2, para valores individuales (a) y media móvil (b).

Por último, en las Figuras 6a y 6b se muestra la sección E del tramo 3, la cual presenta un porcentaje de datos individuales por encima de 2,0m/km de 35,3% y un 100% de los datos por encima de 1,5m/km en el caso de media móvil. La sección F del tramo 3 presenta el menor porcentaje de datos por encima de los límites establecidos por el Cartel de Licitación, en este caso para datos individuales se tiene un porcentaje de 12,5% de los datos por encima de 2,0m/km y un 9,4% por encima de 1,5m/km en el caso de la media móvil.



(a)



(b)

Figura 7. Valores de IRI (m/km) del tramo 3, para valores individuales (a) y media móvil (b)

Tal y como se puede observar a manera general en los resultados expuestos anteriormente, en 5 de 6 tramos analizados el 100% de los datos está por encima del valor máximo establecido para la media móvil (1,5m/km). El tramo F es el que presenta menores valores de IRI para una condición superficial cercana a los valores establecidos por la especificación, pero en términos generales ninguno de los tramos presenta los valores requeridos en el Cartel sección EE007.

Es importante mencionar que un incremento en el IRI repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos, además afecta las condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de la vía, aumenta el deterioro del pavimento debido al incremento dinámico de las cargas de tránsito. Diferentes investigaciones realizadas, revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento, afectando la velocidad de circulación, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible.

Tabla 6. Resumen de porcentajes de datos por encima del valor límite para secciones de carpeta.

Tramo	Sección	Porcentaje de datos fuera de los límites de la especificación (%)	
		Media móvil ($\leq 1,5\text{m/km}$)	Individual ($\leq 2,0\text{ m/km}$)
1	A	100,0	88,2
	D	100,0	70,6
2	B	100,0	100,0
	C	100,0	100,0
3	E	100,0	35,3
	F	9,4	12,5

Según el oficio UBCK-849-2015, la Administración en coordinación con la Verificación de Calidad y la empresa Contratista se encuentran implementando medidas correctivas y preventivas para mejorar los valores de regularidad superficial en el proyecto y velar por el cumplimiento de este parámetro.

Observación 1: Los valores de regularidad superficial de base asfáltica entre los estacionamientos 16+600 y 20+800 se encuentran dentro de un rango de 3,0m/km

Debido a que a nivel nacional no existe una especificación con respecto a la regularidad de la capa de base asfáltica, se realizó un análisis de los datos del IRI obtenidos en mayo de 2015 (informe I-0741-15), calculando un valor promedio para los datos individuales y un valor promedio para el dato de media móvil. Los datos fueron analizados usando como unidad de medición tramos de 100m y se calculó la media móvil utilizando el promedio consecutivo de cinco valores, como lo indica la especificación de IRI descrita en el Cartel de Licitación para la superficie de ruedo.

Para el Tramo 1, en la sección E se obtiene un valor de IRI promedio de 3,2m/km para valores individuales y media móvil. En la sección H se obtiene un valor de IRI promedio de 3,4m/km para ambos casos, tal y como se puede observar en la Figura 7 y la Tabla A.4 del Anexo A.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 33 de 94
---	----------------------------------	-----------------

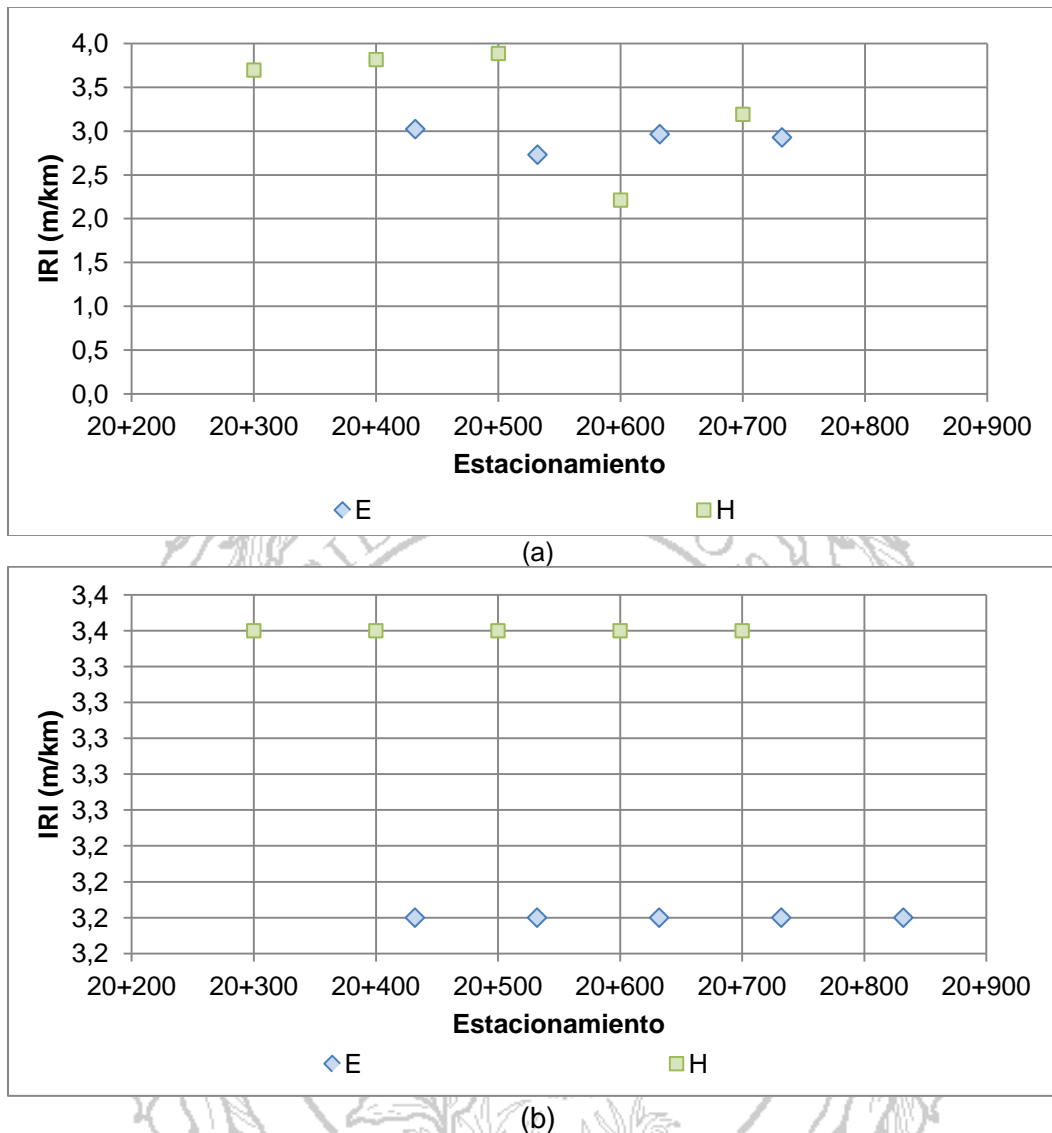


Figura 8. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones E-H.

En el Tramo 2, para la sección F se obtiene un valor promedio de IRI de 2,8m/km de valores individuales y 2,9 m/km en el caso de la media móvil, y la sección L presenta un valor promedio de IRI de 2,7m/km para ambos casos (Ver Figura 8 y Tabla A.5 del Anexo A).

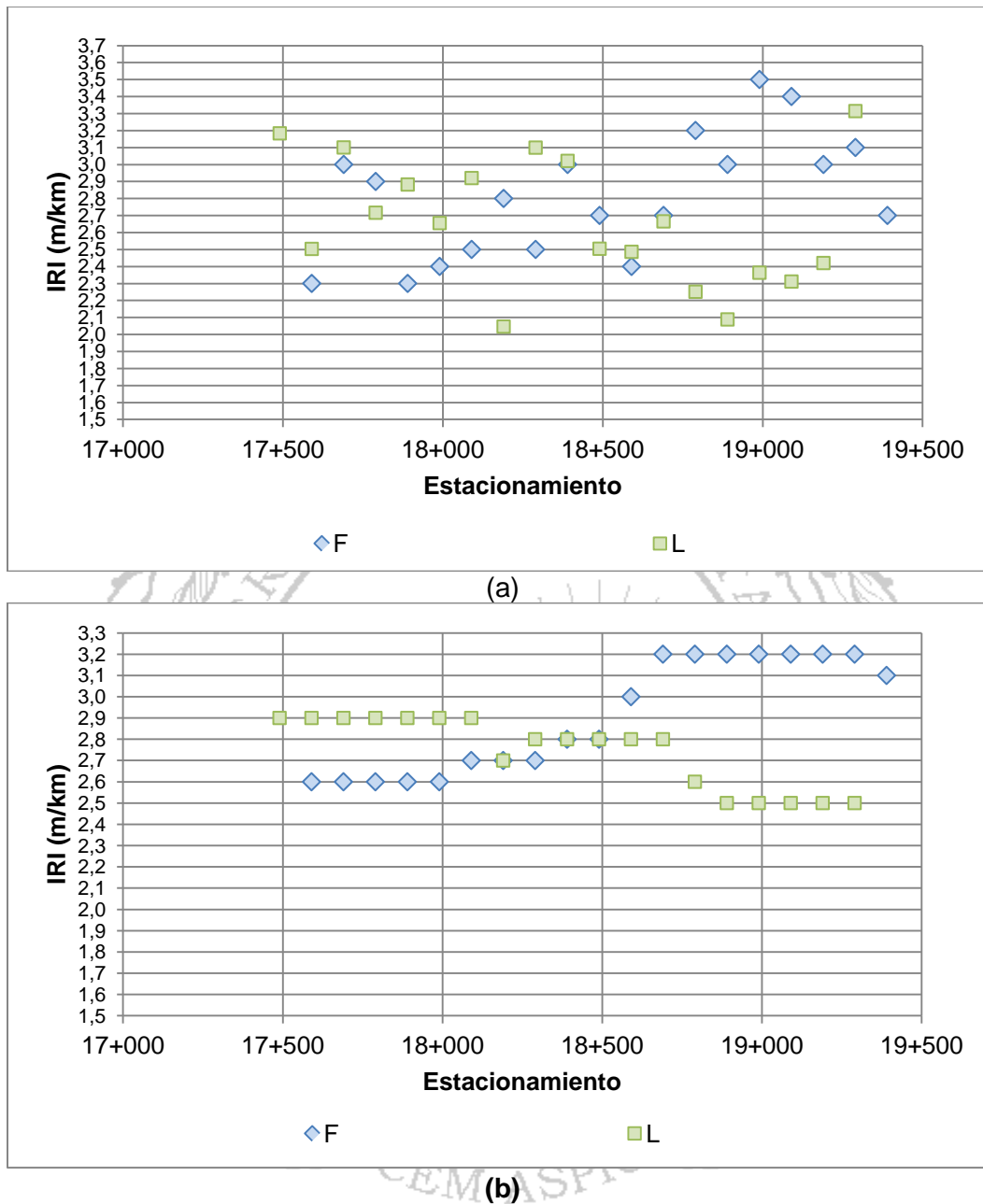


Figura 9. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones F-L.

En el caso de Tramo G-K, para la sección G el valor promedio de IRI para el caso de valores individuales y media móvil es de 2,9m/km y en la sección K es de 3,0 m/km.

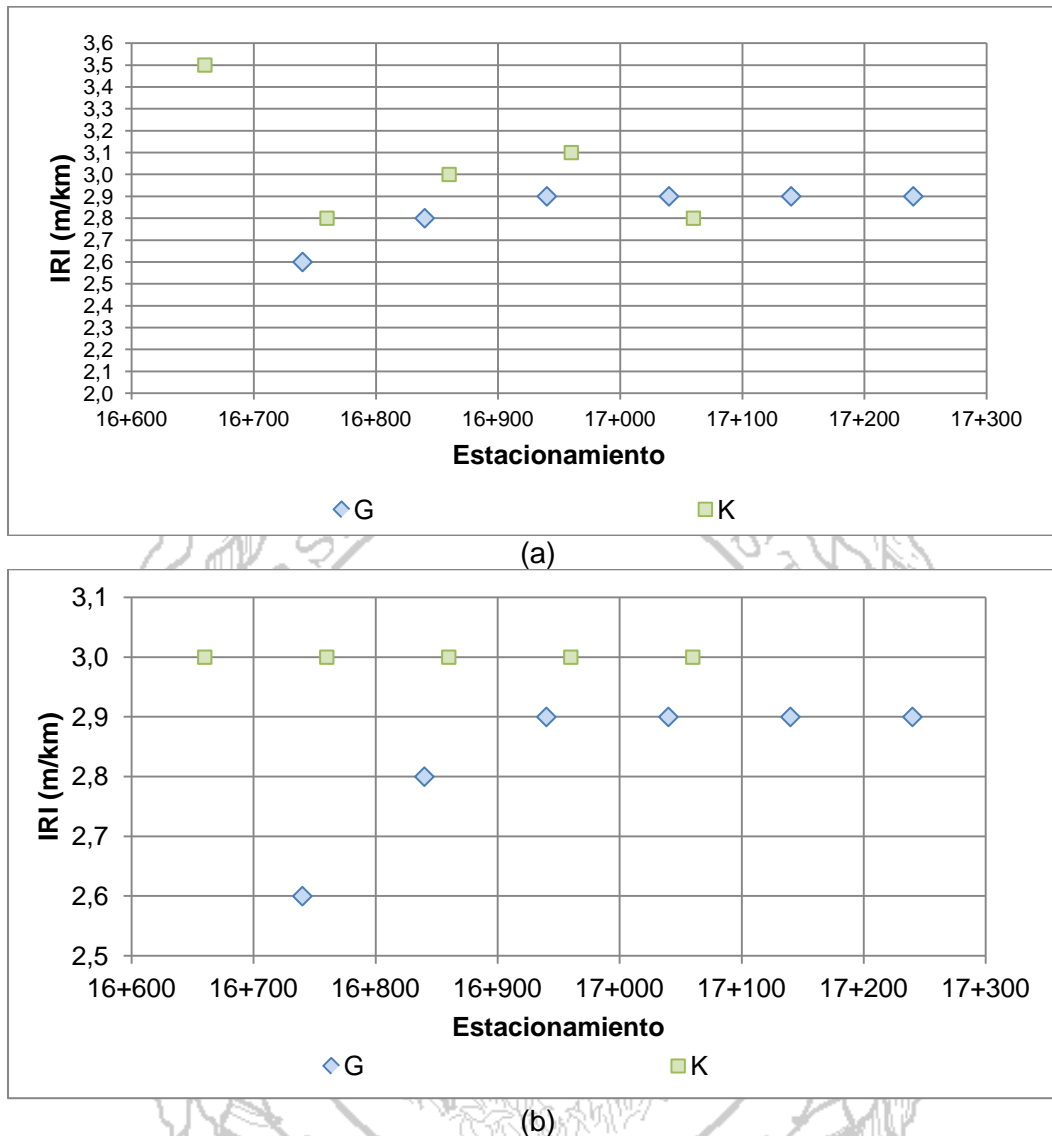


Figura 10. Datos de IRI (m/km) para valores individuales (a) y media móvil (b) del Tramo 1, secciones G-K.

El valor del Índice de Regularidad Internacional calculado a partir de los datos de perfil refleja la regularidad de la superficie de base asfáltica. La calidad de la misma depende de los procesos constructivos que se desarrollen durante el procedimiento de colocación de la capa, a saber, uso de guías o niveles de topografía, técnica de compactación adecuada, flujo continuo de mezcla asfáltica para evitar que la pavimentadora se detenga, entre otras.

Es importante mencionar que en la teoría y las buenas prácticas de la ingeniería se menciona que el valor de IRI en una sección puede mejorar hasta en un 50% entre capas, siempre y cuando se siga un procedimiento constructivo adecuado, como los mencionados anteriormente. La ejecución inadecuada del proceso constructivo impedirá, la obtención de los valores esperados de IRI a nivel de superficie de ruedo, por esta razón es importante realizar un control regular de los valores a nivel de las diferentes capas.

Para este proyecto, el IRI a nivel de superficie de ruedo es establecido como un parámetro contractual tal y como se indicó anteriormente. En general, los datos de IRI en base asfáltica deberían mejorar alrededor de ese 50% para poder alcanzar el valor establecido en la especificación de 1,5m/km para el promedio consecutivo de cinco valores.

Tabla 7. Valores de regularidad superficial medidos en secciones del proyecto a nivel de base asfáltica

Tramo	Sección	Valor de MRI (m/km)	
		Media móvil	Individual
1	E	3,2	3,2
	H	3,4	3,4
2	F	2,8	2,9
	L	2,7	2,7
3	G	2,9	2,9
	K	3,0	3,0

Observación 2: Al realizar una comparación de los valores de IRI en una sección del proyecto a nivel de base asfáltica y superficie de ruedo se obtienen porcentajes de mejora inferiores a los esperados.

Se realizó un análisis de los datos del IRI en la capa de base asfáltica y la superficie de ruedo (entre 23+050 y 26+100) donde se calculó para este análisis una estimación del IRI promedio para el carril (A,B,C o D), ya que los datos medidos en mayo de 2014, debido al avance del proyecto, no fueron suficientes para estimar el promedio de cinco valores consecutivos (media móvil).

Posteriormente, el día 12 de febrero de 2015, se realiza una medición sobre la superficie asfáltica de rodadura. Por medio de un sistema de posicionamiento geográfico (GPS) y un programa de cómputo se ubican los tramos coincidentes entre la medición en la base asfáltica y la carpeta asfáltica para poder comparar los valores de MRI.

A continuación se presenta una tabla que muestra los valores promedio de IRI (m/km) para cada carril, tanto para la medición realizada en base asfáltica como para en la carpeta a nivel de superficie de ruedo y el porcentaje de mejora obtenido.

Tabla 8. Valores de regularidad (m/km) medidos en las mismas secciones de base asfáltica y de carpeta

Base Asfáltica			Carpeta Asfáltica		
Tramo	Sección	MRI (m/km)	Tramo	Sección	MRI (m/km)
1	A	2,5	1	A	2,8
	B	2,3		B	2,9
2	C	2,5	2	C	2,5
	D	2,5		D	2,2

Tabla 9. Comparación entre datos de IRI para base asfáltica y carpeta asfáltica.

Sección	IRI promedio en BA (m/km)	IRI promedio en MAC (m/km)	Porcentaje de mejora (%)
A	2,5	2,8	-10,7
B	2,3	2,9	-20,7
C	2,5	2,2	13,6
D	2,5	2,2	13,6

Acorde con la comparación, se puede observar que en el tramo A pasó de un IRI promedio en la base asfáltica (BA) de 2,5 a 2,8 m/km en la superficie de rueda. En el caso del tramo B paso de 2,3 a 2,9 m/km. Para los tramos C y D se obtiene una mejora ya que se pasa de 2,5 a 2,2 m/km en ambos sentidos (Ver Figura 10).

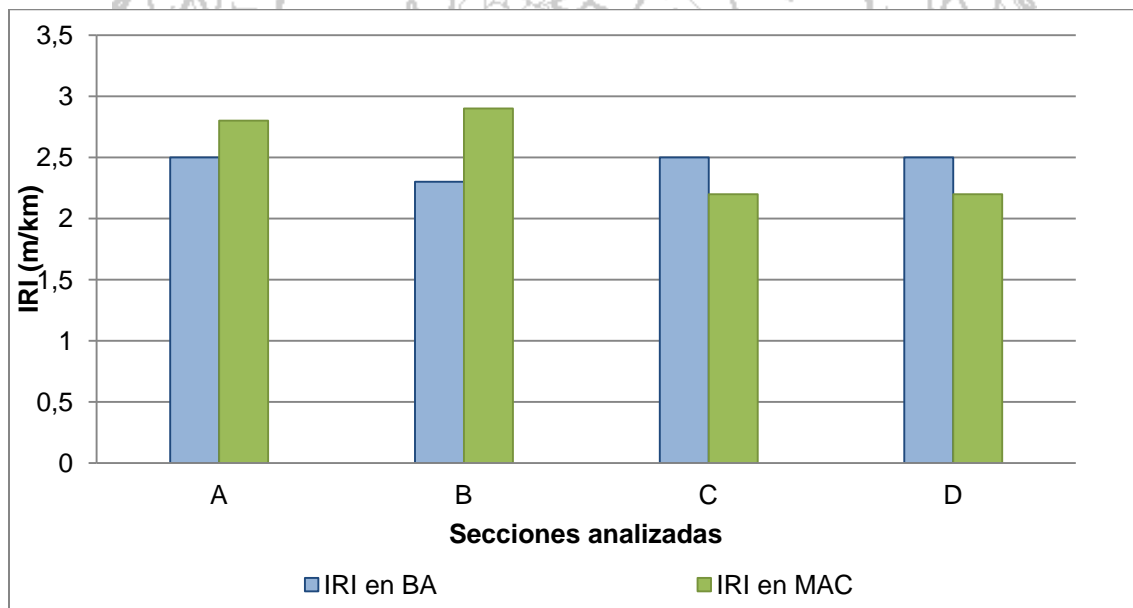


Figura 11. Comparación de datos promedio de IRI por carril, para base asfáltica (BA) y mezcla asfáltica (MAC) entre los estacionamientos 23+050 y 26+100.

Tal y como se observa en la tabla y la figura anteriores, en dos de las secciones A y B, el valor de IRI en lugar de mejorar, aumenta. Y para las secciones C y D del tramo dos el porcentaje de mejora es relativamente bajo (menos del 15%) en comparación al esperado y descrito en la teoría de un 50%.

Cabe recalcar que para estos valores individuales el límite especificado en la normativa para este proyecto, el IRI es establecido como un parámetro contractual, en el Cartel de Licitación Pública Internacional 2011LI-00037-32702, en la sección EE007 Control de Rugosidad (IRI) en Carpeta de Mezcla Asfáltica y es de 2,0 m/km, por lo tanto, el valor obtenido a nivel de la superficie de ruedo para los 4 carriles analizados es mayor al especificado, tal como se indicó en el oficio LM-AT-074-15.

11.2 SOBRE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PROYECTO

Este análisis tiene como objetivo principal determinar los módulos de rigidez de la estructura de pavimento colocada en el proyecto Chilamate - Vuelta de Kooper, por medio de pruebas de deflectometría de impacto (FWD), las cuales establecen las deflexiones medidas en campo en cada tramo analizado.

En este caso se procedió a realizar el análisis y la comparación de los datos de deflectometría realizados en los meses de Diciembre de 2014 (2/12/2014), Febrero de 2015 (24/2/2015) y Mayo de 2015 (25/5/2015), con el objetivo de corroborar la validez de los resultados o bien la consistencia que existe entre cada uno de las pruebas efectuadas, y brindar lo valores del módulo promedio de cada capa de la estructura de pavimento que compone el proyecto en cuestión.

En total se tomaron datos de deflectometría para dos tramos del proyecto donde la estructura total del pavimento ya se encuentra conformada y colocada en su totalidad (Ver Anexo A). En la Tabla 10 se detallan las características y propiedades de cada uno de los tramos donde se realizó la prueba FWD, así como el sentido de carril muestreado y la longitud del segmento respectivo a cada mes.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 39 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Tabla 10. Cantidad y extensión de pruebas de deflectometría realizadas en el proyecto

Fecha	Tramo	Carril	Punto inicial	Punto final	Total (km)
Diciembre 2014	FW 1	Chilamate - Vuelta de Kooper	26+600	23+300	3,300
Informe I-1404-14	FW 2	Vuelta de Kooper - Chilamate	26+600	23+300	2,650
Febrero 2015	FW 1a	Vuelta de Kooper - Chilamate	26+141.3	23+519	2,62
Informe I-0249-15	FW 2a	Chilamate - Vuelta de Kooper	26+141.3	23+519	2,62
	FW4 c	Chilamate - Vuelta de Kooper	24+350	26+050	1,70
Mayo 2015	FW4 f	Vuelta de Kooper - Chilamate	24+350	26+050	1,70
Informe I-0741-15	FW4 d	Chilamate - Vuelta de Kooper	25+550	26+150	0,60
	FW4 e	Vuelta de Kooper - Chilamate	25+550	26+150	0,60

Se puede observar en la tabla anterior que todos los tramos presentan una longitud similar entre sí y se realizaron sobre el mismo tramo con el objetivo de controlar las posibles variaciones en los módulos, los cuales generalmente son afectados por factores estacionales, como el clima y el tránsito. Los sondeos presentan ligeras variaciones entre las longitudes cubiertas del tramo analizado, sin embargo los resultados obtenidos son comparables entre sí, ya que como se indicó comparten las mismas secciones del tramo y además presentan diferencias longitudinales poco significativas, lo cual influye poco en el resultado de los módulos promedio.

Observación 3: Los materiales colocados entre los estacionamientos 23+300 y 26+600 presentan mejores características mecánicas que las supuestas en el diseño estructural.

Tal y como se indicó previamente, el objetivo del análisis estructural es obtener el módulo promedio de cada tramo para cada capa de material que compone el paquete estructural del pavimento del proyecto y comparar los resultados obtenidos con los valores indicados en el diseño estructural. Esta comparación permite determinar el desempeño que tendrá esta estructura de pavimento en el futuro.

El paquete estructural del proyecto está compuesto por 5 capas de material, las cuales se detallan en la siguiente figura:

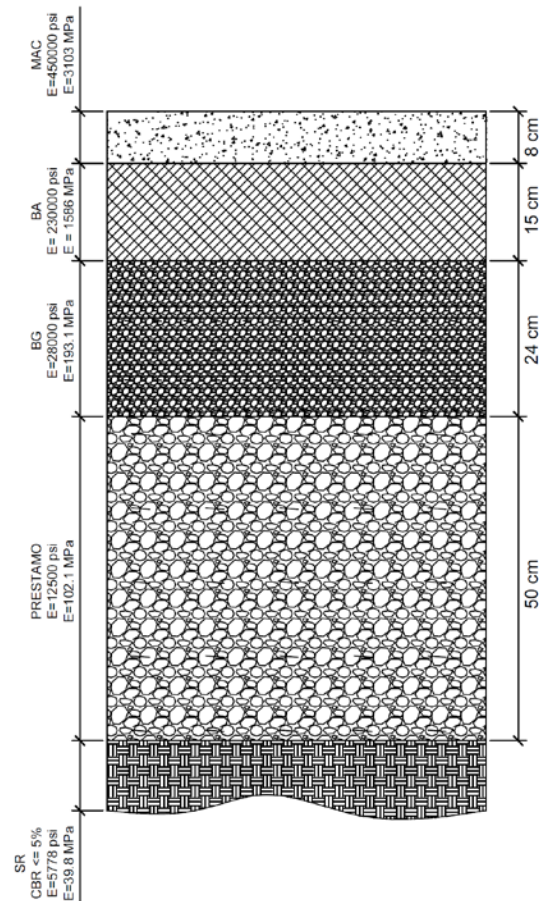


Figura 12. Estructura de pavimento diseñada proyecto Chilamate - Vuelta de Kooper.
Fuente: Oficio UBCK-314-2014

Para efectos del modelado de la estructura en el software ELMOD 6.0©, se introduce el concepto de módulo de capa. Dicho concepto se refiere al módulo de un material producto de los estudios de campo llevados a cabo con el deflectómetro de impacto (FWD). Este indica de una manera más realista el comportamiento *in situ* de los materiales que componen la estructura de pavimento. De modo que para simplificar el modelo es posible realizar combinaciones de materiales, en donde el resultado retrocalculado será referido a un módulo de capa compuesto o módulo equivalente. Lo anterior es ventajoso para los casos en donde la estructura estudiada presenta más de 5 capas. Al poderse realizar una combinación de materiales, se reduce el número de capas lo que facilita el modelado del pavimento, el análisis de retrocálculo y disminuye la incertidumbre de los resultados obtenidos.

El programa utilizado solo posibilita modelar un total de 5 capas, lo cual en muchas ocasiones es una limitación. A pesar de esto, la estructura analizada cuenta con un máximo de 5 capas, lo cual en este caso no genera problemas con el programa. Sin

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 41 de 94
---	----------------------------------	-----------------

embargo, modelar dicha estructura genera una mayor incertidumbre en los resultados conseguidos a través del análisis de retrocálculo. Adicionalmente, es conocido que para este proyecto el material de préstamo y base granular (BG) presentan propiedades mecánicas muy similares entre sí, por lo que para el presente estudio se decide combinar dichos materiales en una sola capa que en adelante se denominará como capa de "Soporte".

Es importante indicar que los resultados finalmente obtenidos es este estudio son considerados como adecuados y se aceptan como módulos representativos de la condición estructural de cada capa, ya que para cada uno de los sondeos analizados obtuvo un RMS menor o igual a 5. Además presentan resultados dentro del rango normal o esperado.

A nivel general, en todos los análisis efectuados para el proyecto se observa que el material de la subrasante presenta un comportamiento no lineal. La no linealidad de los materiales granulares y suelos es una propiedad que se caracteriza por presentar un módulo resiliente variable, el cual es función de la magnitud de las cargas aplicadas y también de los esfuerzos de confinamiento al que está sometido el material. Estos presentan una rigidez superficial aparentemente mayor en contaste con el módulo cuando es calculado a partir de la aplicación de cargas directas sobre la capa de subrasante.

Esta condición particular da como resultado un módulo resiliente de subrasante sobreestimado, que debe ser equilibrado mediante una disminución del módulo resiliente del material granular que se coloca por encima. De esta forma las curvas de deflexión obtenidas se ajustan adecuadamente a la curva de deflexión registrada en campo, sin embargo para estos casos los resultados son incorrectos. Para cubrir esta condición, se utiliza el programa ELMOD 6.0©, el cual contempla el fenómeno de la no linealidad de la subrasante. Por esta razón todos los módulos resilientes del proyecto cuentan con la debida corrección por el fenómeno de la no linealidad de la subrasante.

Resultados de Retrocálculo de Módulos

Tal como se indicó anteriormente, se analizan los resultados de tres sondeos efectuados en los meses de Diciembre de 2014 y Febrero y Mayo del año 2015, a lo largo de los tramos indicados en la **Tabla 10**.

La temperatura del pavimento no fue tomada en campo dado que el procedimiento para contar con la totalidad de los datos necesarios es muy lento. Para conocer la temperatura aproximada de los materiales bituminosos a la mitad de la capa se utiliza el algoritmo de Bells. Esta metodología es empleada por el programa utilizado y se ha comprobado que sus resultados son muy confiables en cuanto a la predicción de las temperaturas requeridas. La ecuación solicita como datos de entrada lo siguiente: la temperatura superficial (tomada por el FWD), la hora del día en la que se realiza cada muestreo, el espesor de la capa del pavimento y la temperatura del día anterior a la fecha en la que se realiza la recolección de información.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 42 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Es importante indicar que el módulo resiliente de la subrasante obtenido a partir del proceso de retrocálculo, se reporta tal y como resulta del análisis ya que al ser datos de campo el módulo es representativo de las condiciones reales de cada material los cuales se ven influenciados en la mayoría de las ocasiones por aspectos como el estado de esfuerzos y el confinamiento. Esto quiere decir que no se aplicará el factor de correlación a los resultados obtenidos.

A continuación se presentan los resultados de retrocálculo para los meses considerados, que serán finalmente comparados para determinar la validez de los resultados y verificar si estos son consecuentes con los módulos asumidos para el diseño (ver Figura 11).

Resultados FWD Diciembre 2014

Tal y como se observa en la Figura B.1, la prueba de deflectometría del mes de Diciembre se realiza en dos carriles: uno en sentido este - oeste (FW1) y en sentido oeste - este (FW2). El módulo final del tramo analizado consistirá en obtener el percentil 16 (P_{16}) de cada capa de material. En los apartados siguientes se detallan los resultados obtenidos.

Sondeo tramo FW1: Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper

A continuación se muestran las deflexiones registradas en campo por el FWD en cada punto muestreado. Se nota una tendencia relativamente estable entre los datos registrados por cada geófono lo cual indica que no existen condiciones particulares que estén afectando el muestreo, tal como la presencia de un estrato de roca rígido que influya directamente en los resultados. El Anexo B muestra el registro de las deflexiones para el carril analizado.

En este caso al realizar la comparación directa entre las deflexiones registradas y las calculadas se consigue un ajuste que se considera como satisfactorio entre los resultados, dado que el valor de RMS es de 3,0%.

En la Figura 12 es posible apreciar valor del módulo resiliente obtenido del proceso de retrocálculo, por cada capa y por estación analizada. Se observa cierta variabilidad en los resultados, la cual se toma en cuenta para brindar el resultado final del módulo de cada capa considerada (P_{16}).

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 43 de 94
---	----------------------------------	-----------------

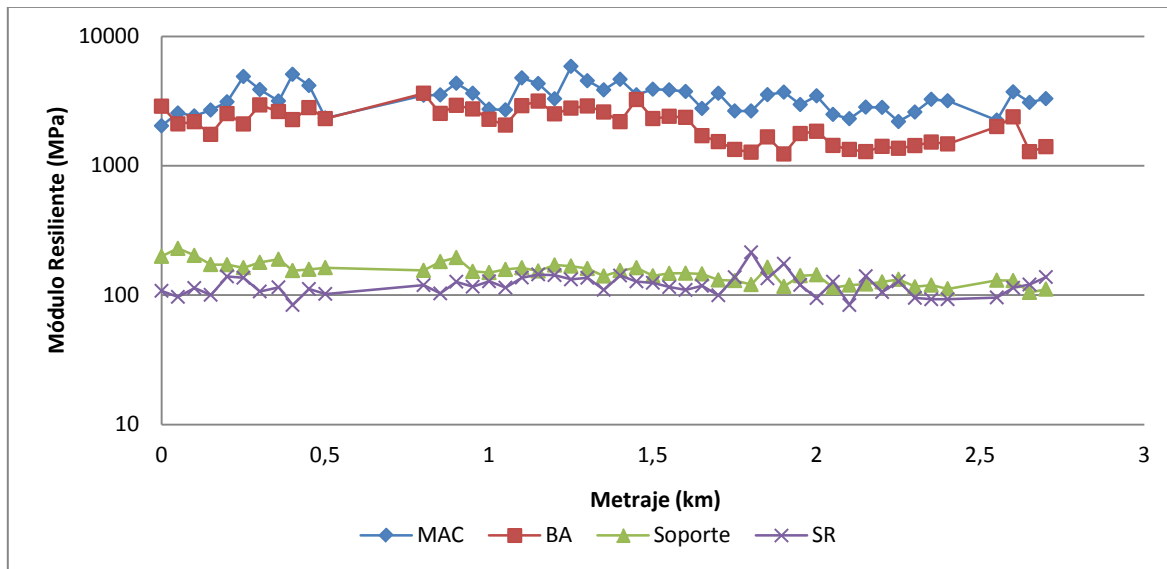


Figura 13. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW1

En el Tabla 11 se muestran los valores del módulo promedio del tramo así como también el módulo resiliente, que representa de manera conservadora las características mecánicas definitivas de los materiales que componen la estructura de los pavimentos.

Tabla 11. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW1

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Módulo promedio (psi)	Desv. Est.
MAC *	373.075	476.581	1,28
BA *	218.460	296.814	1,36
Soporte	17.949	21.449	1,19
SR	14.311	17.129	1,20

* Módulos a una temperatura de 25°C y frecuencia de 5,45 Hz

Se observa que en todos los casos existe una gran variabilidad en los resultados ($\sigma > 1$). Esto es de esperar debido a que el proceso de muestreo está sujeto a numerosas situaciones que pueden causar un aumento en la variabilidad. Dichas condiciones afectan la calidad de los resultados y para ser conservadores se realiza una disminución del módulo promedio, llamado Módulo Resiliente. Se nota en los resultados que la mayor variabilidad se presenta en las capas superiores, lo cual hace que el valor del módulo reportado tenga que disminuirse en aproximadamente un 22% para la MAC y 26% para la BA.

Seguidamente, el Tabla 12 muestra las diferencias que presentan los módulos retrocalculados con los valores asumidos durante la etapa de diseño de la estructura.

Tabla 12. Resumen de resultados de módulos de material - Diciembre 2014

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Diseño psi	% Δ
MAC *	373.075	450.000	17,1%
BA *	218.460	230.000	5,0%
Soporte	17.949	28.000	35,9%
		12.500	-43,6%
SR	14.311	5.778	-147,7%

* Módulos a una temperatura de 25°C y frecuencia de 5.45 Hz

Sondeo tramo FW2: Sentido Vuelta de Kooper - Chilamate

Este tramo corresponde al carril con sentido Vuelta de Kooper - Chilamate, el cual presenta datos de deflectometría a lo largo de 2,20 km de longitud. El procedimiento seguido para determinar los módulos de cada capa es similar al anterior, sin embargo se detallan a continuación las particularidades encontradas para este carril.

Las deflexiones obtenidas siguen una tendencia similar al del tramo FW1, considerando que el punto inicial de toma de muestras en el tramo o carril FW2 es el punto final de la toma de datos del carril FW1. Por tanto, era de esperar este comportamiento, así como también se esperan valores de módulo muy similares entre ambos carriles. En el Anexo B se muestra el gráfico en donde se puede observar lo comentado anteriormente.

Al realizar la comparación directa entre las deflexiones registradas en campo y las obtenidas mediante el proceso de retrocálculo, es posible concluir que los resultados son satisfactorios. Esto por cuanto el valor del RMS para este tramo es de 3,55%.

Paralelamente, se muestra la Figura 13 la cual presenta la variación que existe en módulo de cada capa y para cada estación. Del gráfico se concluye que existe una variabilidad importante en el resultado de módulo de la BA, que parece estar siendo afectado por una particularidad encontrada a después del primer kilómetro de medición.

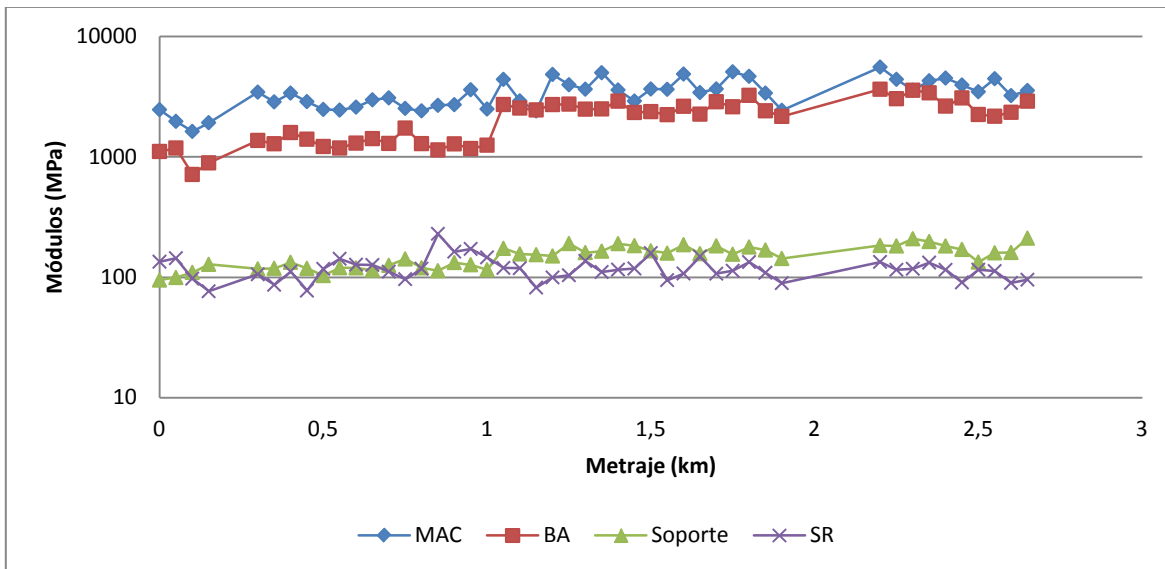


Figura 14. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW2

El cuadro siguiente sintetiza los valores promedio y percentil 16 de los resultados obtenidos para este carril.

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	359.122	474.859	1,32
BA	186.358	282.210	1,51
Soporte	17.267	21.322	1,23
SR	13.555	16.793	1,24

Tal y como se indicó anteriormente, la mayor desviación en los resultados se presenta en la BA. Esta situación hace que el módulo reportado sea disminuido considerablemente, de manera que el resultado es relativamente conservador. Dicha disminución en el módulo promedio es de aproximadamente un 34%, situación que produce una importante diferencia respecto al módulo de la BA si se compara con el obtenido para el tramo FW1. La Tabla 13 muestra el porcentaje de diferencia que resulta de comparar los módulos retrocalculados respecto a aquellos que fueron considerados en la etapa de diseño.

Tabla 13. Resumen de resultados de módulos de material - Diciembre 2014

Material	Módulo Resiliente Psi (P ₁₆)	Diseño psi	%Δ
MAC	359.122	450.000	20,2%
BA	186.358	230.000	19,0%
BG	17.267	28.000	38,3%
Préstamo	17.267	12.500	-38,1%
SR	13.555	5.778	-134,6%

Finalmente, para caracterizar toda la sección incluyendo los dos tramos analizados, se presenta el promedio de los módulos resilientes reportados para los tramos FW1 y FW2. A su vez, se muestra también el porcentaje de diferencia existente entre este módulo resiliente general y el módulo de diseño para cada material. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 14. Resultados comparativos - Diciembre 2014

Material	Módulo Resiliente Psi (P ₁₆)	Diseño psi	%Δ
MAC	366.099	450.000	18,6%
BA	202.409	230.000	12,0%
BG	17.608	28.000	37,1%
Préstamo	17.608	12.500	-40,9%
SR	13.933	5.778	-141,1%

Según los resultados presentados todos los materiales, a excepción de la SR y el material de préstamo, cuentan con un módulo resiliente menor al supuesto para el diseño de la estructura, por lo que en primer instancia no cumplen con lo esperado. Se recuerda que el módulo resiliente es una propiedad mecánica dependiente de las condiciones encontradas en el sitio al momento de realizar la prueba de FWD, por lo que en este sentido brinda información de una condición puntual que se da dentro del marco histórico del proyecto y que a su vez es afectado por diversas variables externas tales como cargas, clima y aspectos constructivos. Por otro lado, al observar los valores promedio obtenidos se nota que la rigidez de los materiales logra alcanzar e inclusive en algunos casos superar los módulos asumidos en la etapa de diseño.

Resultados FWD Febrero 2015

En la Figura B.2 del Anexo B se aprecia la ubicación de estaciones que fueron analizadas con el fin de determinar el módulo de cada uno de las materiales que componen la estructura de pavimento del proyecto. En este caso en particular, para el mes de febrero se realizó la prueba a lo largo de un total de 2,60 km de longitud (ver Tabla 10). A continuación se muestra el procedimiento y los resultados obtenidos para los casos estudiados.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 47 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Sondeo tramo FW1a: Sentido Vuelta de Kooper - Chilamate

El Anexo B presenta el gráfico de las deflexiones registradas en campo por el deflectómetro de impacto para el carril con sentido Vuelta de Kooper - Chilamate. Se observa un comportamiento relativamente estable entre los datos de cada geófono. Sin embargo, se observa también una marcada variabilidad en los datos de los materiales de MAC y BA en comparación con los materiales del Soporte y SR, por lo que se espera una mayor disminución del módulo reportado en el caso de los materiales bituminosos.

El error medio cuadrado (RMS) de este análisis demuestra que el ajuste entre las deflexiones medidas y obtenidas del retrocálculo es satisfactorio. El RMS conseguido fue de 1,85%. Debe recordarse que este parámetro no indica realmente si los resultados son correctos, por lo que la experiencia juega un papel importante en la elección del resultado final.

En cuanto al resultado del retrocálculo de módulos, la Figura 14 muestra el valor puntal obtenido por estación de cada material que compone el pavimento del tramo analizado.

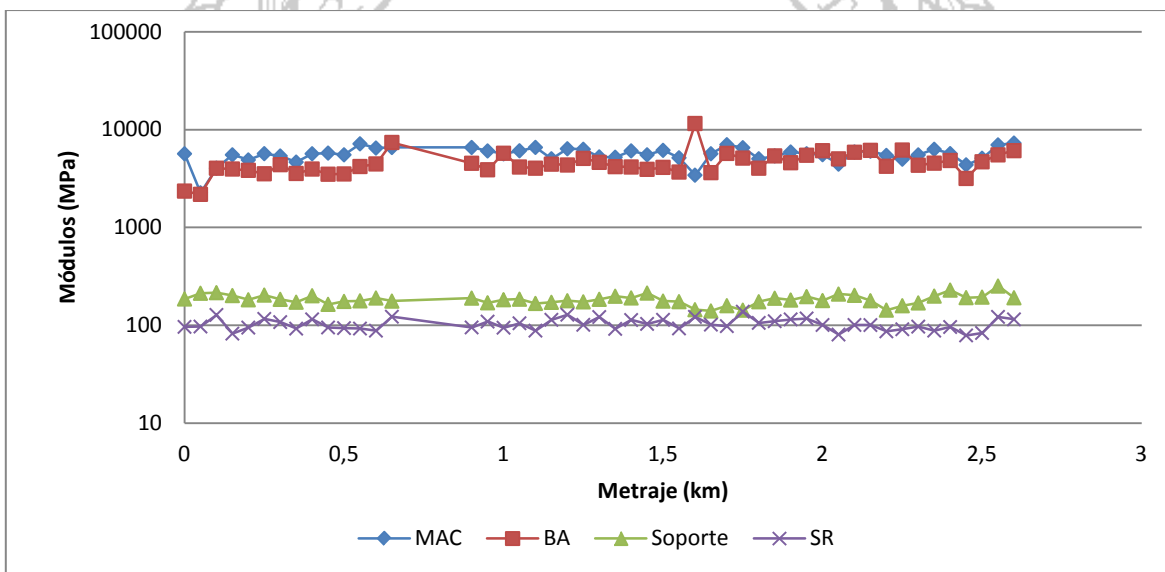


Figura 15. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW1a

Al observar los resultados, es posible afirmar que los materiales granulares cuentan con una baja variabilidad estadística, mientras que los materiales bituminosos, MAC y BA, presentan un comportamiento más disperso en relación al promedio general del módulo. Tal y como se ha indicado la variabilidad en los resultados puede ser causada por los factores externos que afectan consecuentemente la toma de datos.

En la Tabla 15 se muestra la desviación estándar, el módulo promedio y el módulo finalmente reportado para cada capa. Los módulos de los materiales bituminosos están referidos a una temperatura de 25°C y a una frecuencia de 5,45 Hz.

Tabla 15. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW1a

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	660.110	802.521	1,22
BA	498.085	650.618	1,31
Soporte	23.620	26.555	1,12
SR	12.973	14.815	1,14

El módulo resiliente finalmente reportado resulta ser un dato conservador, dada la variabilidad encontrada en los datos. Tal y como se esperaba, el módulo de rigidez final de los materiales granulares se mantiene cerca del valor medio obtenido. Contrario a esto, los módulos de la MAC y la BA se reducen en 18% y 24% respectivamente.

Finalmente, para caracterizar toda la sección incluyendo los dos tramos analizados, se presenta el promedio de los módulos resilientes reportados para los tramos FW1a y FW2a. A su vez, se muestra también el porcentaje de diferencia existente entre este módulo general y el módulo tomado como referencia en la etapa de diseño. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 16. Resultados comparativos - Tramo FW1a

Material	Módulo Resiliente Psi (P_{16})	Diseño psi	% Δ
MAC	660,110	450,000	-46.69%
BA	498,085	230,000	-116.56%
BG	23,620	28,000	15.64%
Préstamo	23,620	12,500	-88.96%
SR	12,973	5,778	-124.52%

En este caso los resultados reflejan un incremento relativo del módulo en comparación con los valores considerados en la etapa de diseño, por lo en este caso es posible afirmar que para las condiciones dadas, los módulos resilientes cumplen satisfactoriamente con los valores esperados. Tal y como se observa en el cuadro anterior, el módulo de la BG y el Préstamo se reporta con un valor único, recordando que esta simplificación se realiza con único el objetivo de mejorar los resultados de la modelación. De los aumentos más importantes se destaca el del valor del módulo resiliente de la BA, sin embargo la MAC y la SR también registran incrementos considerables en el módulo.

Sondeo tramo FW2a: Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper

Este tramo corresponde al carril con sentido Chilamate - Vuelta de Kooper y consta de una longitud total de 2,60 km. Durante la prueba se registraron tanto las temperaturas superficiales como la del aire en cada una de las estaciones donde se realizó la prueba de deflectometría (Ver Anexo B).

Por otra parte, las deflexiones registradas en este tramo durante la prueba se aprecian en el Anexo B. Al comparar las deflexiones medidas en campo contra las estimadas a partir del análisis de retrocálculo se obtiene el valor de RMS, que para este caso también resulta estar por debajo del límite recomendado. El RMS obtenido es de 2,15%, lo cual indica que el ajuste entre las curvas de deflexión es adecuado.

A partir de la información de las deflexiones es posible obtener, por medio del análisis de retrocálculo los módulos resilientes de cada capa de la estructura de pavimento del proyecto. Los resultados obtenidos para este tramo se aprecian en la figura siguiente.

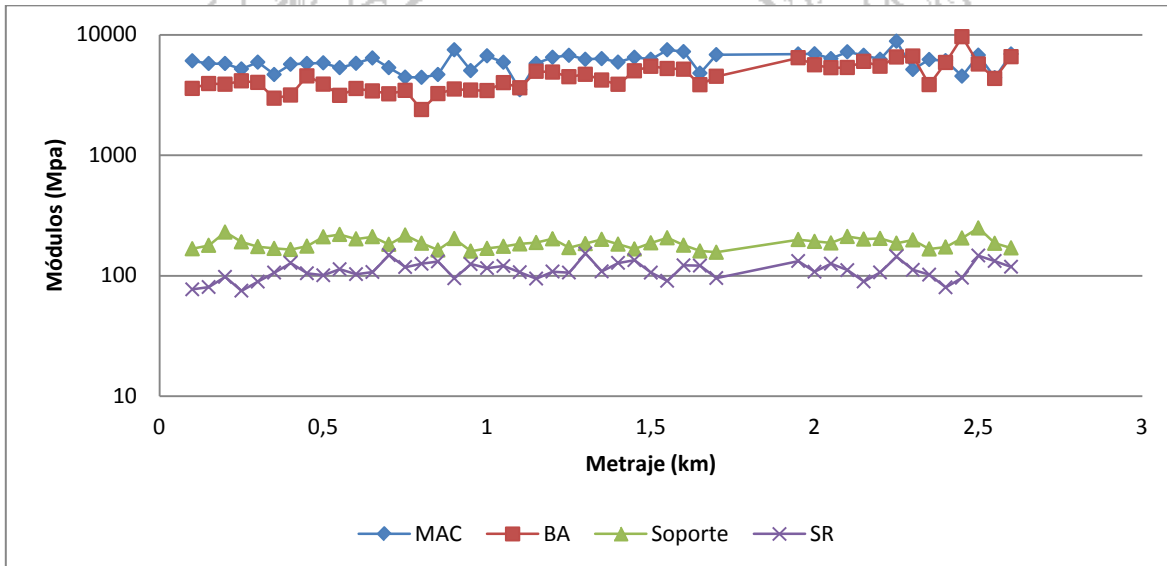


Figura 16. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW2a

La Tabla 17 muestra los módulos resilientes obtenidos para cada capa considerada como parte de la estructura de pavimento del tramo analizado. De la Figura 12 se observa que la mayor variabilidad la presenta el material de BA, lo cual es consecuente con los resultados mostrados en el cuadro siguiente. Por otro lado, si bien es cierto que las capas MAC y granulares presentan una menor variabilidad se debe resaltar que las desviaciones observados cuentan con una magnitud considerable que inciden directamente sobre el módulo finalmente reportado.

Tabla 17. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW2a

Material	Módulo Resiliente (psi) (P ₁₆)	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	719.417	856.947	1,19
BA	488.222	638.121	1,31
Soporte	24.486	27.171	1,11
SR	13.435	15.949	1,19

En este caso, el módulo resiliente de la BA es el resultado que presenta mayor variabilidad, seguido de la MAC y la SR. El resultado del material denominado como Soporte es el que menor desviación presenta, por lo que el valor reportado se mantiene muy cercano al valor medio obtenido. Con el fin de ser conservadores, el módulo de la BA muestra una reducción de 24%, mientras que el módulo de la MAC se disminuye en un 16% respecto al valor promedio.

A continuación se presenta el módulo de rigidez promedio de cada capa para el tramo estudiado. Debe recordarse que estos resultados en parte reflejan condiciones propias de la época en las que se efectúa la prueba, por lo cual es difícil encontrar resultados similares entre las diferentes épocas del año, concepto relacionado con la variación estacional de módulos.

Tabla 18. Resultados comparativos - Febrero 2015

Material	Módulo Resiliente Psi (P ₁₆)	Diseño psi	%Δ
MAC	689,764	450,000	-53.28%
BA	493,154	230,000	-114.41%
BG	24,053	28,000	14.10%
Préstamo	24,053	12,500	-92.42%
SR	13,204	5,778	-128.52%

Tal y como se observa en el cuadro anterior, todos los materiales registran un módulo de rigidez por encima del valor empleado para proyectar el diseño del paquete estructural. Por lo tanto, se indica que en principio la estructura de rueda será capaz de sobrellevar adecuadamente las cargas que se esperan durante la vida útil del proyecto. Se debe aclarar que para los materiales de BG y Préstamo se reporta un mismo valor, ya que el modelado de la estructura se simplificó para contar con una menor incertidumbre en el proceso de retrocálculo.

Resultados FWD Mayo 2015

La prueba de deflectometría del mes de Mayo considera el mismo tramo de análisis que el contemplado para los meses de Diciembre y Febrero. Sin embargo, en este caso los datos de campo fueron tomados de manera diferente, ya que los tramos del sector oeste se tomaron de manera separada a los tramos del sector este (ver Anexo B), por lo que sus resultados se presentan de manera separada. A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos para cada tramo.

Sondeo tramo FW4c: Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper

Este tramo corresponde al carril ubicado en el sector oeste (ver Anexo B), el cual canaliza el flujo vehicular con sentido Chilamate - Vuelta de Kooper. También en el Anexo B se aprecian los valores de deflexiones registrados en cada estación mediante la prueba de deflectometría de impacto.

Del análisis de las deflexiones se observa que estas que mantienen un comportamiento similar a las deflexiones registradas en la prueba del mes de Febrero. Esto quiere decir que también para esta ocasión se espera una variabilidad importante en el módulo de los materiales bituminosos que componen la estructura del pavimento, ya que las deflexiones registradas mantienen una tendencia variable entre cada estación lo cual agrega una desviación en los datos respecto al promedio general de cada módulo de capa. Tomando como referencia lo anterior, se observa que para los materiales granulares y suelos, la desviación esperada será baja respecto al módulo promedio.

Una vez realizado el retrocálculo de módulos es posible realizar la comparación respectiva entre las curvas de deflexión calculada y la registrada en campo. Para este carril, dicha comparación da como resultado un RMS de 1,93%, lo cual indica un ajuste satisfactorio entre las curvas comparadas. Por tanto el resultado obtenido es adecuado para describir las características mecánicas de los materiales del pavimento.

La Figura 16 muestra el módulo obtenido como resultado del retrocálculo para cada capa de material de la estructura. A su vez la Tabla 19 presenta de forma cuantitativa tanto el valor promedio como el valor de módulo correspondiente al percentil 16 (P_{16}), cuyo objetivo es aplicar un factor de seguridad al análisis, dada la variabilidad encontrada en los resultados.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 52 de 94
---	----------------------------------	-----------------

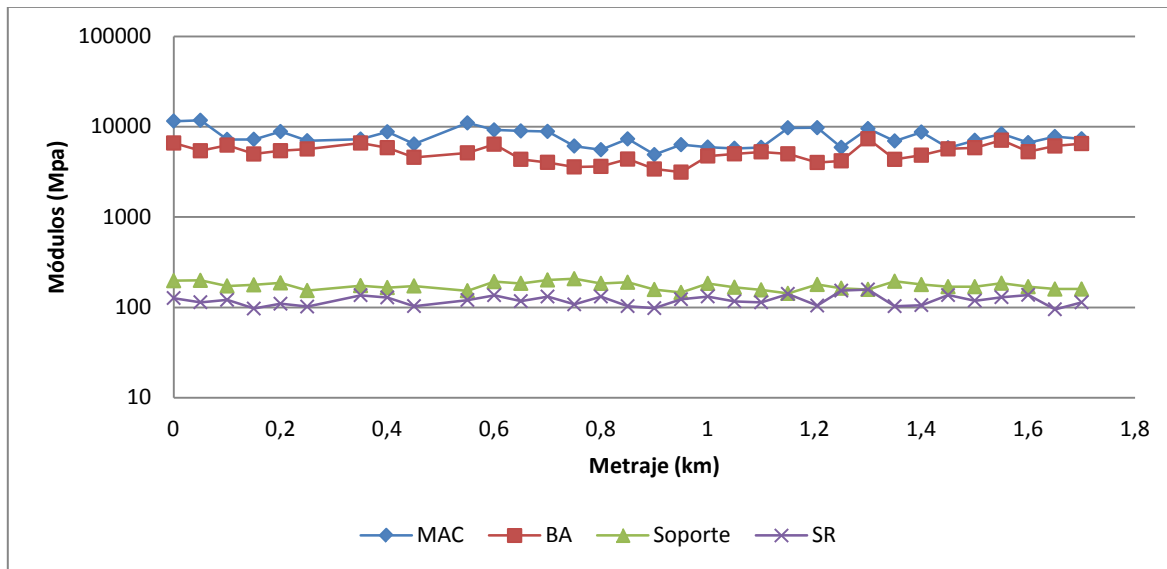


Figura 17. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4c

Tabla 19. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4c

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	875.244	1.095.521	1,25
BA	590.220	733.429	1,24
Soporte	22.882	25.188	1,10
SR	15.147	17.305	1,14

En los resultados se nota un orden lógico en cuanto a la disminución de la capacidad de soporte de los materiales. Tendencia que es la que se ha venido obteniendo en los resultados de meses previos; en donde la MAC es la capa con mayor rigidez y la SR la de menor rigidez. En cuanto a la variabilidad de los datos, en este caso de nuevo se encuentra que los materiales visco-elásticos son los que presentan una mayor reducción en su módulo promedio, es decir su módulo final es 20% menor al promedio reportado.

Sondeo tramo FW4d: Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper

Para continuar con los resultados del carril con sentido Chilamate - Vuelta de Kooper, se presenta a continuación el análisis de los datos correspondientes al tramo de 600 m que completa la longitud del carril cubierta en meses posteriores. En el Anexo B se muestran las deflexiones registradas por el FWD de las estaciones sondeadas. Se observa cierta diferenciación entre las deflexiones de cada geófono, con lo que se permite suponer a priori la presencia de cierta variabilidad en los resultados obtenidos.

Al efectuar la comparación entre las deflexiones registradas in situ y las obtenidas a partir del análisis de retrocálculo, se obtiene un error medio de aproximadamente 2,28%. Lo anterior brinda un escenario favorable para poder intuir que, dado el ajuste porcentual, los resultados de módulo obtenidos serán satisfactorios.

En este sentido, la figura siguiente muestra el módulo promedio obtenido para cada material por punto analizado. La Tabla 20 presenta cuantitativamente los resultados que se observan en la Figura 17.

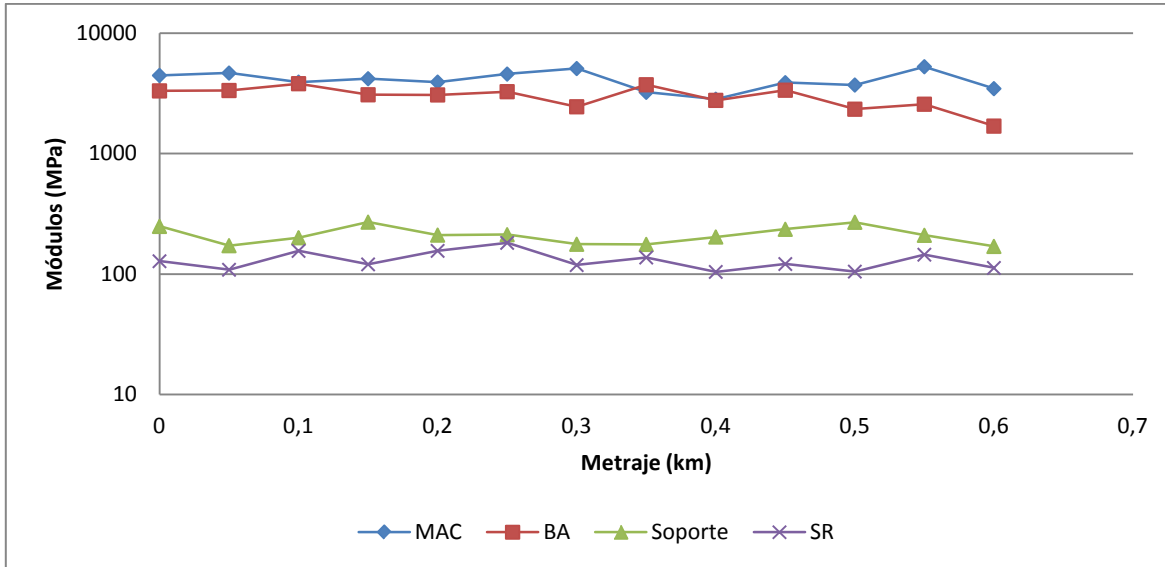


Figura 18. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4d

Tabla 20. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4d

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	1.000.602	1.257.379	1,26
BA	702.199	942.890	1,34
Soporte	25.852	30.396	1,18
SR	15.691	18.647	1,19

Los resultados de este segmento muestran que el módulo reportado mantiene un decrecimiento lógico en cuanto a la capacidad de soporte de cada capa, ya que la rigidez disminuye gradualmente con la profundidad.

Finalmente, la Tabla 21 presenta el módulo resiliente propio de los materiales que componen el carril con sentido Chilamate - Vuelta de Kooper. Comparativamente este resultado muestra los módulos más altos respecto a los registrados en los meses anteriores para este carril.

Tabla 21. Módulo resiliente característico de las capas del tramo Chilamate - Vuelta de Kooper

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	937.923	1.176.450	1,26
BA	646.210	838.160	1,34
Soporte	24.367	27.792	1,18
SR	15.419	17.976	1,19

A continuación se muestra el cuadro comparativo que presenta los porcentajes de diferencia que existen con respecto a los módulos supuestos durante la etapa de diseño de la estructura de pavimentos del proyecto.

Tabla 22. Resultados comparativos - Carril Chilamate - Vuelta de Kooper

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Diseño (psi)	% Δ
MAC	937.923	450.000	-108,43%
BA	646.210	230.000	-180,96%
BG	24.367	28.000	12,98%
Préstamo	24.367	12.500	-94,93%
SR	15.419	5.778	-166,85%

Los resultados muestran que para el mes de mayo del año 2015, los módulos de todas las capas cuentan con una capacidad de soporte mayor a la inicialmente esperada. Por lo que en primer instancia, desde la perspectiva de mecánica de materiales, la capacidad de soporte no será una deficiencia importante en la estructura. Al observar los porcentajes de diferencia obtenidos, se observa que el material de BA es el que mayor diferencia registra, seguido de la MAC y la SR. El material granular es el que menor variación presenta, sin embargo dicha variación también resulta importante.

Sondeo tramo FW4f: Sentido Vuelta de Kooper - Chilamate

El siguiente análisis tiene como fin determinar el módulo resiliente de los materiales que componen el tramo con sentido Vuelta de Kooper - Chilamate, cuyo primer tramo consta de una longitud total de 1,70 km (FW4f) y 0,6 km en el segundo tramo (FW4e). Los resultados se muestran segregados, debido a que los datos fueron recopilados de esta manera.

Las deflexiones obtenidas del proceso de retrocálculo se muestran en el Anexo B. Al ser comparadas con las deflexiones registradas en campo se obtiene que el error medio cuadrado (RMS) de 2.11%, el cual cumple con el valor mínimo de aceptación de los resultados (RMS < 5). De igual forma, la tendencia de las deflexiones es tal que existe la posibilidad de encontrar una variabilidad importante en los valores promedio de módulo resiliente de los materiales que componen la estructura del carril analizado.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 55 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Una vez conocidas las deflexiones in situ, se utiliza esta información como dato de entrada para iniciar con el proceso de retrocálculo de módulos y así poder predecir el comportamiento mecánico de los materiales de la estructura. En la Figura 18, se muestra el valor de módulo de cada material por cada punto muestreado con el FWD.

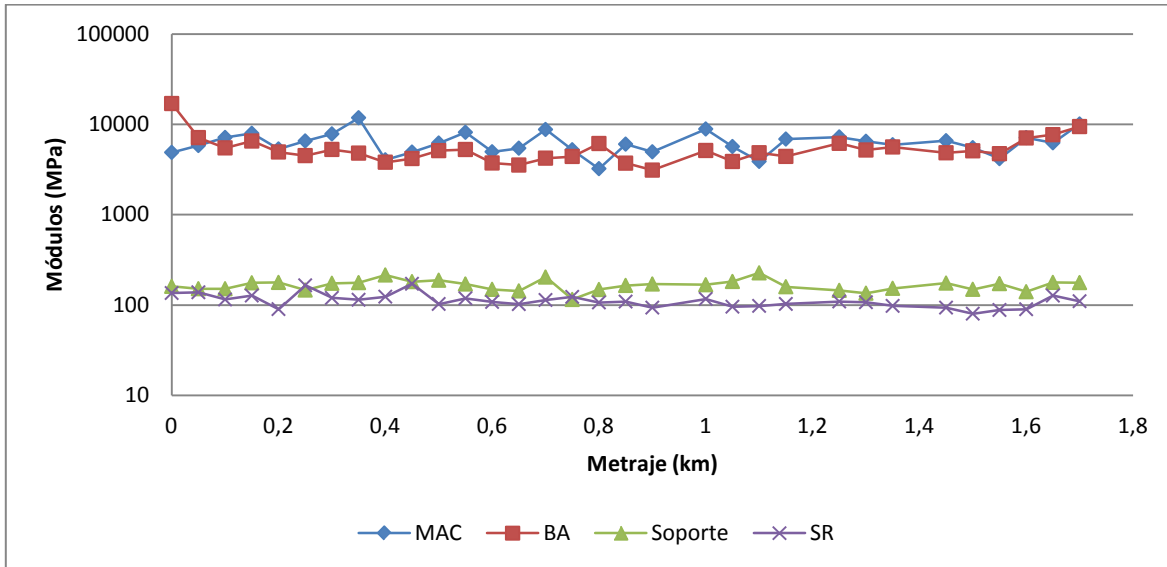


Figura 19. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4f

Por otro lado, en la Tabla 23 se aprecian los resultados obtenidos para el tramo en cuestión luego de haber realizado el respectivo análisis de retrocálculo de módulos.

Tabla 23. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4f

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	671.321	889.760	1,32
BA	546.319	754.437	1,38
Soporte	20.859	23.939	1,15
SR	13.558	16.070	1,18

Es posible observar que la mayor variabilidad es propia de los materiales bituminosos, esto sucede al igual que en los casos anteriormente analizados. Al contemplar la desviación de los resultados respecto al valor promedio obtenido, el módulo de la MAC disminuye en un 24% mientras que el de la BA se ve reducido en un 28% aproximadamente. Se recuerda que la disminución del módulo promedio corresponde al estadístico percentil 16, el cual busca cubrir la variabilidad de los datos de una manera segura.

Sondeo tramo FW4e: Sentido Vuelta de Kooper - Chilamate

Este tramo del carril con sentido Vuelta de Kooper - Chilamate consta de 600 m de evaluación y se ubica en el sector oeste del tramo analizado. En el Anexo B se muestran las deflexiones registradas durante la prueba de deflectometría.

Tal y como se observa en la Figura 19, las deflexiones registradas presentan un comportamiento normal, en donde las menores deflexiones son registradas por las capas inferiores de la estructura. A su vez, se nota que al comparar las deflexiones de cada estación es posible encontrar una desviación significativa del módulo de la MAC y la BA respecto al valor promedio obtenido del retrocálculo.

Una vez obtenidas las deflexiones mediante el FWD, mediante el análisis de retrocálculo es posible obtener el módulo resiliente promedio de cada estación estudiada. En la figura que se muestra a continuación, se observan los resultados obtenidos para este segmento de carril.

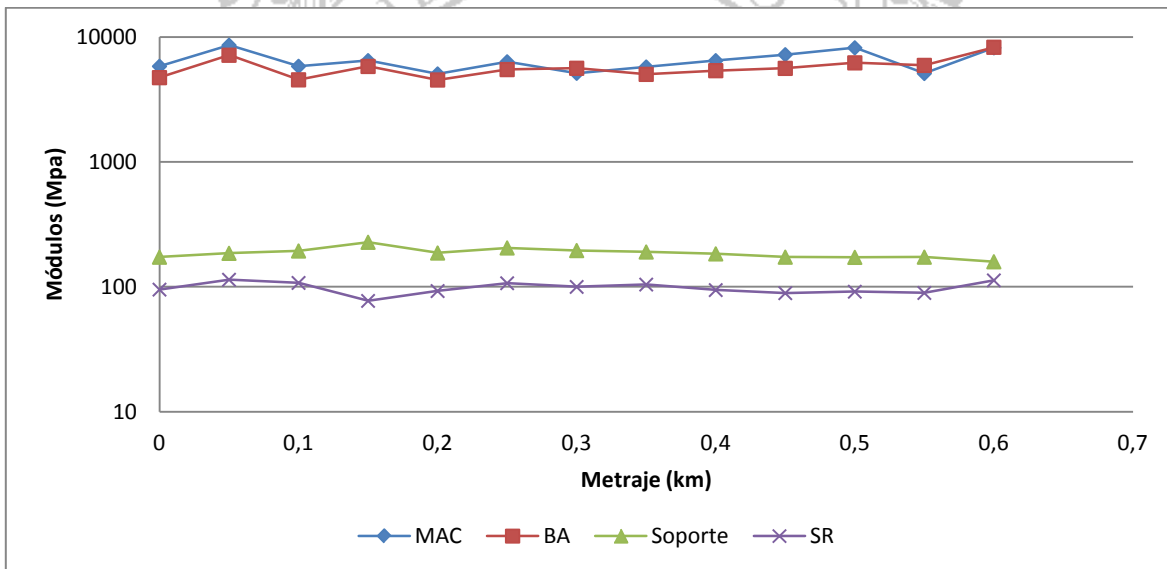


Figura 20. Comportamiento del módulo de materiales por estación - Tramo FW4e

Se observa de la tendencia mostrada que los módulos de MAC y BA resultan ser similares en magnitud, sin embargo el módulo resiliente de la BA es menor que el de la capa superficial, lo cual es de esperar para un diseño correcto de una estructura de pavimento. De igual manera los módulos obtenidos disminuyen adecuadamente con la profundidad del pavimento.

En relación a la variabilidad de los resultados, al observar los resultados de la Tabla 24 se nota que la magnitud de la desviación respecto al promedio es relativamente baja, esto si se compara con los resultados de otros meses e incluso con los de los demás tramos analizados para el mes de mayo. Lo anterior hace que la disminución en el módulo reportado de la MAC y de la BA sea de aproximadamente un 17% y 15% respectivamente. La exactitud de los módulos resiliente de los materiales granulares es tal que el módulo reportado es muy similar al módulo promedio.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 57 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Tabla 24. Módulo resiliente característico de las capas del tramo FW4e

Material	Módulo Resiliente (psi) (P_{16})	Promedio (psi)	Desv Est.
MAC	769.307	924.993	1,20
BA	688.150	817.984	1,19
Soporte	24.537	26.896	1,10
SR	12.665	14.153	1,12

Seguidamente, la Tabla 25 presenta el módulo reportado para el carril con sentido Vuelta de Kooper - Chilamate. De los resultados obtenidos se debe destacar que el módulo final de las capas bituminosas presentan un resultado similar al esperado al considerar los módulos estimados a 25°C.

Los porcentajes de diferencia obtenidos indican que los módulos de capa obtenidos cumplen y superan de la manera satisfactoria los valores que inicialmente fueron supuestos en la etapa de diseño. Por lo que en principio se indica que la estructura no es deficiente respecto al tema de capacidad de soporte, en relación con las cargas de tránsito proyectadas para su vida útil total.

Tabla 25. Resultados comparativos - Carril Vuelta de Kooper - Chilamate

Material	Módulo Resiliente psi (P_{16})	Diseño psi	% Δ
MAC	720.314	450.000	-60,07%
BA	617.235	230.000	-168,36%
BG	22.698	28.000	18,94%
Préstamo	22.698	12.500	-81,58%
SR	13.112	5.778	-126,92%

Finalmente, el módulo de capa reportado para el tramo analizado durante el mes de mayo del año 2015 se muestra en el cuadro siguiente.

Tabla 26. Resultados comparativos - Mayo 2015

Material	Módulo Resiliente psi (P_{16})	Diseño psi	% Δ
MAC	829.074	450.000	-84,24%
BA	631.689	230.000	-174,65%
BG	23.531	28.000	15,96%
Préstamo	23.531	12.500	-88,25%
SR	14.264	5.778	-146,87%

En general, se nota que los módulos de capa reportados a partir de las pruebas de campo realizadas cumplen con los valores utilizados durante el diseño de la estructura del proyecto. El único material que en teoría no cumple con lo anterior es la BG, sin embargo se recuerda que para efectos de simplificar la simulación, en el programa ELMOD se introdujo un sistema de 4 capas para disminuir la incertidumbre de la solución obtenida. A

pesar de que la BG no cumple, el módulo del préstamo es 88% mayor al valor supuesto en el diseño, lo cual compensa la deficiencia detectada. A pesar de esto, los resultados obtenidos son satisfactorios y permiten afirmar que el paquete estructural es lo suficientemente adecuado para sobre llevar las cargas que se estimaron para el proyecto.

La Figura 20 presenta un resumen detallado de los resultados obtenidos a partir del análisis de retrocálculo. A su vez se incluye la información de los módulos asumidos en la etapa de diseño con el fin de permitir una mejor visualización de las diferencias encontradas.

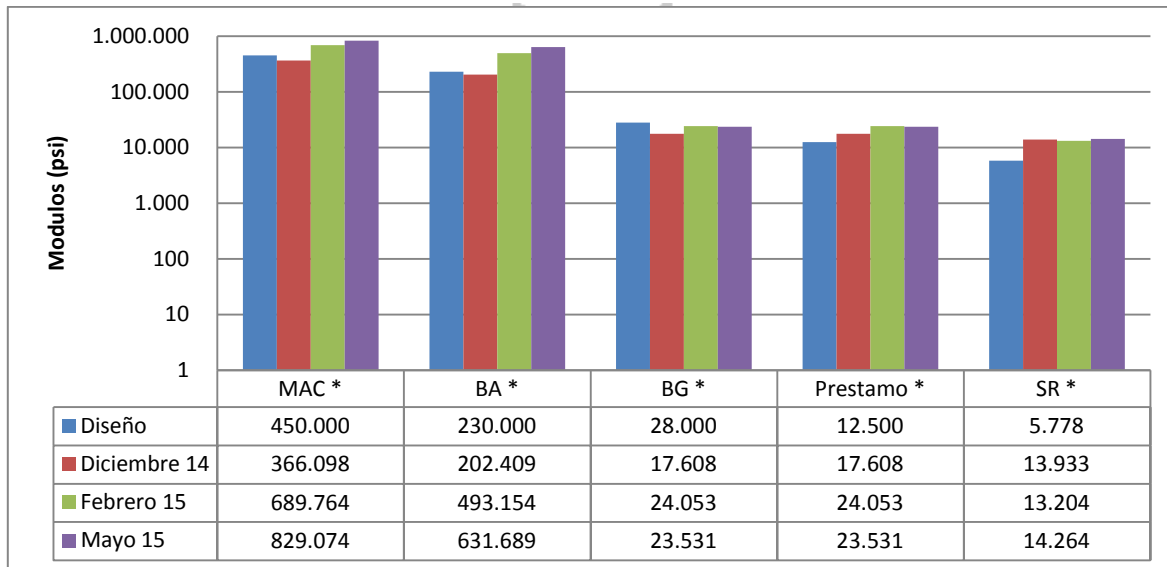


Figura 21. Resumen de módulos promedio de cada material por mes analizado

En cada uno de los análisis se revisó de manera detallada la información del módulo superficial, el cual es un parámetro que facilita la detección de la influencia del un estrato de capa rígida real o aparente sobre el comportamiento del módulo general de la estructura. En este sentido se logra descartar la presencia de un estrato de capa rígida, pero se logra detectar en todos los casos que la subrasante presenta un comportamiento no lineal, por lo que cada uno de los análisis efectuados considera dicha condición.

Al realizar la comparación directa entre el cuenco de deflexión registrado a partir de las pruebas de deflectometría contra las curvas de deflexión obtenidas a partir de las aproximaciones del análisis de retrocálculo se concluye que los resultados presentados para los meses de Diciembre de 2014, Febrero y Mayo de 2015 son satisfactorios ya que todos cuentan con un error medio cuadrado (RMS) menor a un 5%. Este valor es el máximo recomendado para determinar si el ajuste entre las curvas es adecuado. A pesar de cumplir con el RMS, se recuerda este es solamente un indicador que necesariamente debe apoyarse en la experiencia para poder definir correctamente cuales son los módulos de resiliencia de las capas analizadas.

En los resultados se presentan dos valores de módulos para cada capa: el módulo promedio retrocalculado y el módulo reportado para cada material. Este último

corresponde al percentil 16 el cual incluye en cada material la variabilidad obtenida en cada análisis. Dicho valor se considera como el módulo resiliente definitivo por ser un valor más conservador.

Mediante la comparación directa entre los módulos obtenidos y los supuestos inicialmente para el diseño de la estructura, se concluye que los materiales colocados presentan características mecánicas mejores que las esperadas. Por lo tanto, se indica que la estructura cumple satisfactoriamente con capacidad de soporte para la cual fue diseñada.

Al comparar los resultados conseguidos, es posible afirmar que la existencia de diversos factores estén causando el incremento detectado en la rigidez de la MAC para los meses de Febrero y Mayo. Situaciones como cambios en los componentes de la mezcla asfáltica (tamaño, forma y rugosidad del agregado) o en su volumetría, pueden explicar la variabilidad existente entre los resultados de los meses de Diciembre a Mayo.

Los valores obtenidos compensan los resultados obtenidos en el informe previo sobre el diseño de la estructura del proyecto (LM-PI-AT-051-13). Este llamaba la atención sobre la posibilidad de que la estructura de pavimento no cumpliera con el criterio de deformación permanente, encontrando que el pavimento fallaría por ahuellamiento antes de la finalización de su vida útil (12 años). Sin embargo, el análisis anterior corresponde a una caracterización de materiales basado en pruebas de campo y que esta influenciados por condiciones propias del sitio, por lo que a partir de esta información no se puede afirmar con certeza cuál será el desempeño de la estructura durante la vida útil para la cual fue proyectada.

Para brindar un criterio adecuado sobre el comportamiento futuro de la estructura, debe efectuarse un análisis mecanicista que permita conocer cuál será el desempeño general esperado del pavimento en términos de daños, dados los posibles deterioros por agrietamiento o por deformación permanente. Este análisis se efectúa considerando datos de entrada como el TPDA del proyecto, los espesores de las capas de la estructura, el módulo resiliente reportado en cada caso, entre otros.

A pesar de cumplir con los módulos supuestos en la etapa de diseño, es importante mencionar que una rigidez excesiva puede afectar negativamente el desempeño de la estructura durante su vida útil. Esto se debe al incremento en la fragilidad de la carpeta asfáltica con lo cual aumenta la susceptibilidad la estructura a presentar fallas por agrietamientos debido a la fatiga. Esta situación es aún más crítica debido a que el módulo obtenido para la base estabilizada con asfalto (BA) también registra un aumento relativo en el valor del módulo retrocalculado.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 60 de 94
---	----------------------------------	-----------------

11.3 SOBRE EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DEL PROYECTO

A continuación se presentará el análisis de capacidad y desempeño del pavimento colocado en el proyecto, contemplando las variables de tránsito promedio diario anual (TPDA), espesores utilizados y los módulos de resiliencia retrocalculados de los materiales colocados. El desempeño evaluado se enfoca en el daño por fatiga y la deformación permanente acumulada, utilizando los criterios de la Guía Mecánico - Empírica de Diseño de Pavimentos de AASHTO (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG) (2004).

Respecto a los valores utilizados para el análisis de capacidad de soporte, el TPDA utilizado es obtenido del oficio UBCK-314-2014 donde se muestra la memoria de diseño del pavimento del proyecto. Los valores de Factor Camión, Distribución Vehicular y demás valores utilizados para el diseño se utilizan tal cual se indican en dicha memoria de cálculo.

Por otro lado, es de particular interés determinar el desempeño del proyecto según las capacidades reales de los materiales colocados en sitio. Para determinar estas características mecánicas, se realizó una serie de ensayos de deflectometría (FWD) entre las estaciones 24+350 y 26+150.

Es importante especificar que los resultados generados utilizan los módulos a una temperatura promedio de la capa de rueda, que en este caso se definió en 37,01 °C según los registros tomados en campo el día en que se realizaron las pruebas de deflectometría de impacto (FWD). Los módulos a esta temperatura representan mejor las condiciones normales de operación del proyecto, porque resulta útil conocer el desempeño bajo dichas condiciones.

Se generó un modelo simplificado de la estructura para poder obtener con mayor confiabilidad, en donde se consideraron 4 capas, uniendo la capa de base granular con la de material de préstamo. A esta capa se le llamó "Soporte".

El diseño modelado consta de una capa de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), seguido por una de Base estabilizada con Asfalto (BA) que se coloca sobre una capa de "Soporte". A continuación se presenta un resumen de las características de la estructura estudiada.

Tabla 27. Características de pavimento: Chilamate - Vuelta de Kooper.

Capa	Espesor (cm)	Módulo (psi)
MAC *	8	384,842
BA *	15	268,263
Soporte	74	21,731
SR	-	13,734

* Módulos a temperatura promedio de operación (37,01 °C)

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 61 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Observación 4: La capacidad de soporte del pavimento es significativamente mayor respecto a la que fue calculada en la etapa de diseño. Esto al considerar los módulos que se obtienen del análisis de retrocálculo de módulos.

Para la evaluar si la estructura colocada en el proyecto es la adecuada para soportar las cargas que se proyectan para la vida útil del proyecto, se procede a realizar una revisión del diseño de la misma. El objetivo principal es verificar si el número estructural (SN) obtenido es mayor al SN requerido según el número de ejes equivalentes (ESAL). El SN es un indicador de la capacidad estructural que posee cada capa, el cual es función del espesor de capa, las condiciones de drenaje supuestas y el módulo resiliente.

El TPDA utilizado por el diseñador (ver oficio UBCK-314-2014) es de 7302 vehículos/año. Dada la diversa composición de la tipología vehicular es necesario convertir cada tipo de vehículos en ejes equivalentes de 18000 lbs. En el TPDA, la vida útil del proyecto (12 años) , la composición vehicular que transitará por el proyecto y los factores camión utilizados, se logra obtener la cantidad de ejes equivalentes a ejes 18000 lbs que generaran los deterioros a la estructura durante la vida útil estimada.

Al emplear la metodología AASHTO 93 se obtiene un ESAL total de 16,588,831 ejes durante los 12 años que el diseño define como la vida útil de la estructura. Seguidamente, se continua con el proceso de revisión de la capacidad de soporte requerida por la estructura. Para los módulos obtenidos del análisis de retrocálculo (Tabla 27) el número estructural total requerido es de 4,34. El detalle de los SN de cada capa se muestran en el cuadro siguiente.

Tabla 28. Módulo resiliente de cada capa y número estructural requerido según el ESAL de diseño

Capa	MR (psi)	SN REQUERIDO
Carpeta Asfáltica	384,842	0,96
Base Asfáltica	268,263	3,55
Soporte	21,731	4,34
Subrasante	13,734	-

Al considerar los módulos mostrados, junto con los espesores colocados en el proyecto se obtiene que el SN real de la estructura es de 6,71. Para afirmar que la estructura cumple para las condiciones de diseño supuestas basta con comparar el SN requerido contra el SN real, en donde se observa que la capacidad de la estructura colocada supera en un 54% el diseño que realmente se requiere para el proyecto.

Observación 5: Según los resultados obtenidos, la estructura presenta un desempeño adecuado respecto a la fatiga y así como también ante el fenómeno de deformación permanente.

Análisis de Fatiga

El análisis de desempeño del pavimento considera los modelos desarrollados en la MEPDG los cuales son expuestos por Arias Barrantes (2014) en la publicación especial LM-PI-GM-22-14. Dichos modelos analizan el agrietamiento por fatiga de las capas asfálticas así como también la deformación permanente promedio de cada capa dada la aplicación de una llanta que en este caso representa una carga puntual de 9000 lbs con 100 psi de presión.

Para obtener las respuestas del pavimento, esto es esfuerzos, deformaciones y deflexiones en diferentes puntos de la estructura, se utiliza el programa 3D Move v2.1. Al modelar un sistema multicapa compuesto por MAC, BA, Soporte y SR, se obtienen las siguientes deformaciones unitarias.

Tabla 29. Deformaciones unitarias a diferentes profundidades de la estructura analizada

Punto No	Coord- X (in)	Coord- Y (in)	Coord-Z (in)	Deformación Normal X-X (Micro-Strain)	Deformación Normal Y-Y (Micro-Strain)	Deformación Normal Z-Z (Micro-Strain)
1	5.352	5.352	1.575	0.51948E+02	0.51786E+02	0.95762E+02
2	5.352	5.352	3.151	-0.38733E+02	-0.39268E+02	0.16407E+03
3	5.352	5.352	6.102	-0.93759E+02	-0.94063E+02	0.18082E+03
4	5.352	5.352	9.056	-0.19113E+03	-0.19150E+03	0.23319E+03
5	5.352	5.352	23.622	-0.64654E+02	-0.64674E+02	0.16953E+03
6	5.352	5.352	38.189	-0.49181E+02	-0.49188E+02	0.99154E+02
7	5.352	5.352	38.191	-0.49180E+02	-0.49187E+02	0.11140E+03
8	5.352	5.352	44.191	-0.40038E+02	-0.40042E+02	0.90557E+02

A continuación se enlistan los puntos de evaluación de interés y que corresponden a los indicados en el cuadro anterior:

1. Punto a la mitad de la capa de MAC
2. Punto en la fibra última de la capa de MAC
3. Punto a la mitad de la capa de BA
4. Punto en la fibra última de la capa de BA
5. Punto a la mitad de la capa de Soporte
6. Punto en la fibra última de la capa de Soporte
7. Punto a la profundidad Z= 0 in en la SR
8. Punto a la profundidad Z= 6 in en la SR

Para realizar el análisis de desempeño a la fatiga por agrietamiento interesa conocer la deformación unitaria a tensión tanto en la fibra última de la capa (agrietamiento transversal) de MAC como en la fibra superior (agrietamiento longitudinal). Esto se realiza

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 63 de 94
---	----------------------------------	-----------------

debido a que por sus características visco elásticas dicha capa es susceptible a desarrollar problemas de desempeño por fatiga.

El modelo de fatiga busca predecir el porcentaje de área agrietada del proyecto suponiendo que las características mecánicas de este sean homogéneas en todo su extensión. Cuando el porcentaje de área agrietada supera cierto valor, se considera que el pavimento falla. Los umbrales de máximos de falla, que se muestran en la tabla siguiente y varían en función de la cantidad de ESALes esperados para el proyecto.

Tabla 30. Límites de falla según porcentajes de área agrietada

<i>Ejes equivalentes de periodo de diseño</i>	<i>% área agrietada antes de la falla</i>
< 3 millones	75%
3-15 millones	50%
> 15 millones	20%

Fuente: Arias Barrantes, 2014

Dado que la cantidad de ESALes esperados durante los 12 años de vida útil del proyecto supera los 15 millones de ESALes, en este caso el porcentaje máximo de área agrietada aceptable antes de la falla es de 20%.

Al emplear la metodología del MEPDG para determinar el porcentaje de agrietamiento de la MAC, se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente figura.

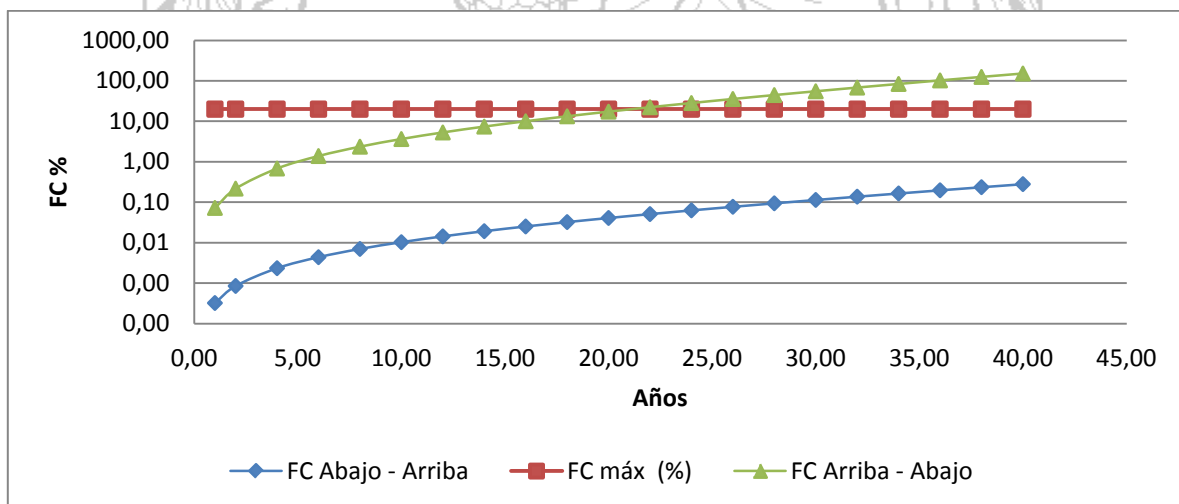


Figura 22. Evolución del porcentaje de área agrietada -MAC

Se destaca que el eje de las ordenadas se muestra en escala logarítmica debido a que los porcentajes de deformación obtenidos del análisis de agrietamiento transversal son menores al 1%, incluso para un análisis que alcanza los 40 años. Por tanto, se puede afirmar en este caso que la capa de MAC no tendrá problemas severos de agrietamiento de abajo hacia arriba.

Por su parte, al analizar el caso del desempeño de la MAC a la fatiga por grietas longitudinales, es decir de arriba hacia abajo, se observa que al término de los 12 años de vida útil esperada, el porcentaje de área agrietada será de aproximadamente 5.31 mm. Dados los resultados obtenidos, es posible afirmar que la capa mezcla asfáltica no fallará por agrietamiento por fatiga.

Análisis de Deformación Permanente

Para realizar el análisis de deformación permanente del pavimento, se recurre también a la metodología del MEPDG (2004) la cual se especifica en el informe especial elaborado por Arias Barrantes (2014). Dicho modelo permite estimar la deformación permanente acumulada en cada capa de la estructura de pavimento.

Según indica la guía existen diferentes límites de ahuellamientos permitidos en función de la cantidad de cargas o ESALes que se esperan durante el periodo de diseño. En el cuadro siguiente se especifica la información indicada.

Tabla 31. Límites de falla para la deformación permanente

Ejes equivalentes de periodo de diseño	Ahuellamiento máximo permisible
< 3 millones	25,0 mm
3-15 millones	20,0 mm
> 15 millones	12,7 mm

Fuente: Arias Barrantes, 2014

Tal y como se ha verificado previamente, la cantidad de ESALes del proyecto es mayor a los 15 millones de ejes equivalentes, por lo que la deformación máxima permitida en este caso será de 12,7 mm.

El modelo empleado determina la deformación promedio de cada capa de pavimento. Estas ecuaciones varían en función del material evaluado, por lo que las ecuaciones de los materiales bituminosos difieren de las de los materiales granulares y suelos. Estos modelos dependen de la deformación unitaria vertical promedio, es decir aquella deformación que se registra a la mitad de la capa de material analizado.

Al obtener la deformación plástica de cada capa, se procede a realizar la sumatoria de estas para determinar la deformación permanente acumulada total. Es importante recordar que para el cálculo de las deformaciones se utiliza el programa 3D Move. Los resultados de deformación vertical promedio de cada capa se muestra en la Tabla 29, mientras que los resultados de deformación permanente acumulada por año, se muestran en la figura siguiente.

Al observar los resultados individuales se observa que ninguno de los materiales subyacentes, incluida la base asfáltica, presentan deformaciones plásticas mayores a la deformación máxima permisible para la cantidad de ejes equivalentes que transitarán por el proyecto.

Por otro lado, al observar el desempeño de la capa de MAC ante este tipo de falla se nota que el material absorbe casi la totalidad de la deformación permanente acumulada. De manera que al año 12 la capa presentará una deformación total estimada de 13,59 mm. Desde el punto de vista general, al acumular las deformaciones se observa que aproximadamente al año 7, el pavimento alcanzará la deformación máxima permisible establecida por la metodología.

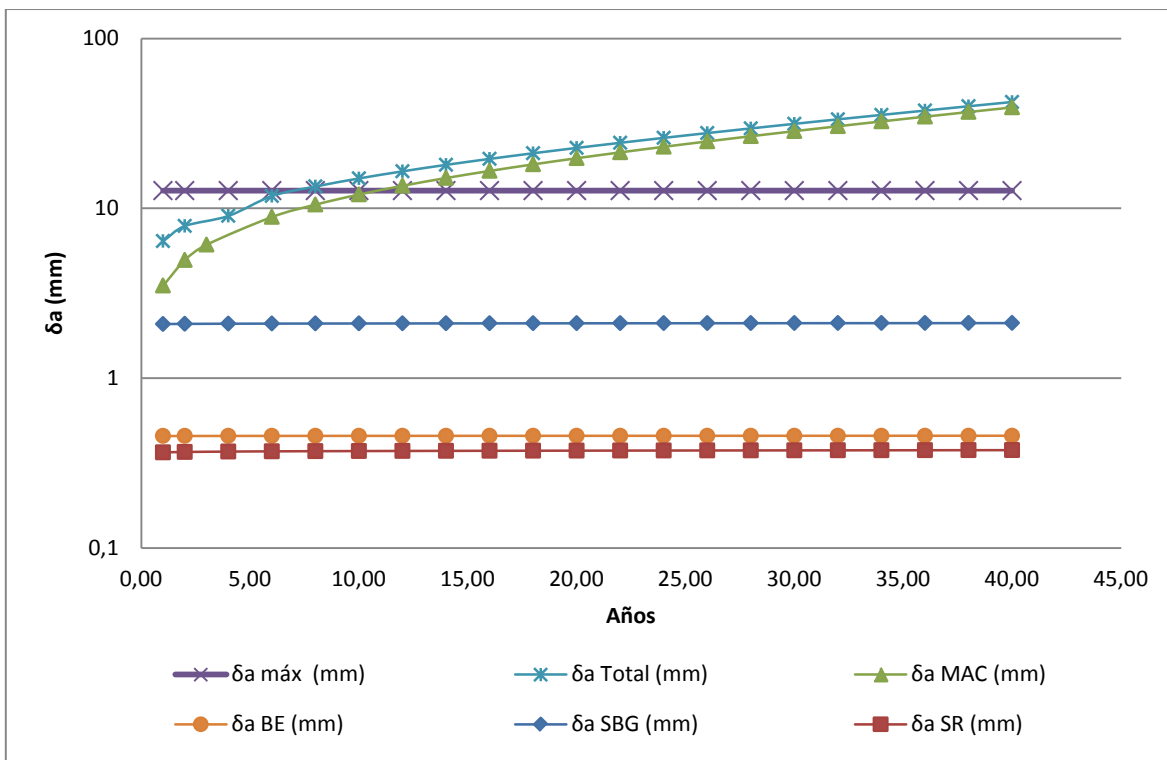


Figura 23. Evolución del desempeño por deformación permanente

Se debe indicar que el modelo empleado para el análisis de la deformación en las capas no es 100% aplicable a las condiciones que afectan normalmente a las capas de mezcla asfáltica, debido a que el efecto de oxidación de la mezcla no se encuentra contemplado en este. Comúnmente, la volatilización de ciertos componentes del asfalto (aromáticos) se produce en los primeros dos o tres años luego de finalizada la colocación de la capa de MAC. Esta pérdida de partículas causa que la mezcla asfáltica aumente de manera significativa su rigidez, mejorando su desempeño frente al deterioro por deformación permanente.

En la práctica, la deformación que se registra en los primeros tres años es considerada como la máxima que soportarán las mezclas asfálticas a lo largo de su periodo de vida útil. Basado en lo anterior se observa que la MAC del proyecto experimentará en dicho periodo una deformación final que aproximadamente ronda variará entre 4,95 mm y 6,11 mm. Con esto se concluye la capa de ruedo tampoco enfrentará problemas en general, sin embargo se debe tener un completo control del avance de este deterioro en el tiempo.

11.4 SOBRE LA CONDICIÓN DE FRICCIÓN DEL PROYECTO

El análisis presentado a continuación tiene como objetivo evaluar la fricción que presentan algunos tramos del proyecto Bajos de Chilamate - Vuelta de Kooper. Este parámetro no está incluido dentro de las especificaciones contractuales del proyecto, no obstante, se suministran los resultados a la Administración para que los valore durante la ejecución del proyecto.

La medición del nivel de rozamiento se realizó el 24 de Febrero de 2015, en diversos tramos del proyecto, según el detalle que se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32. Cantidad y extensión de pruebas de GRIP realizadas en el proyecto.

Fecha	Nivel de rasante	Tramo	Carril	Punto inicial	Punto final	Total (km)
Febrero 2015 Informe I-0249-15	Capa asfáltica	1	Ambos sentidos	25+600	26+000	0,80
		2	Ambos sentidos	23+700	25+100	2,80
		3	Ambos sentidos	15+200	16+350	2,30

Observación 6: El nivel de fricción de las secciones de pavimento evaluadas en el proyecto presentan una condición entre regular y buena

Se evaluaron un total de 5,9 km, tal como se detalló en la Tabla 34. En la Figura 23 se pueden observar los tres tramos evaluados en el sentido Chilamate - Vuelta de Kooper. Del total de kilómetros evaluados en ese sentido, el 61% corresponde a tramos que se encuentran en una condición buena, es decir, con un Grip Number entre 0,60 y 0,78. Por otra parte, el tramo evaluado entre los estacionamientos 15+200 y 16+350 presenta una condición regular, con valores entre 0,50 y 0,60.

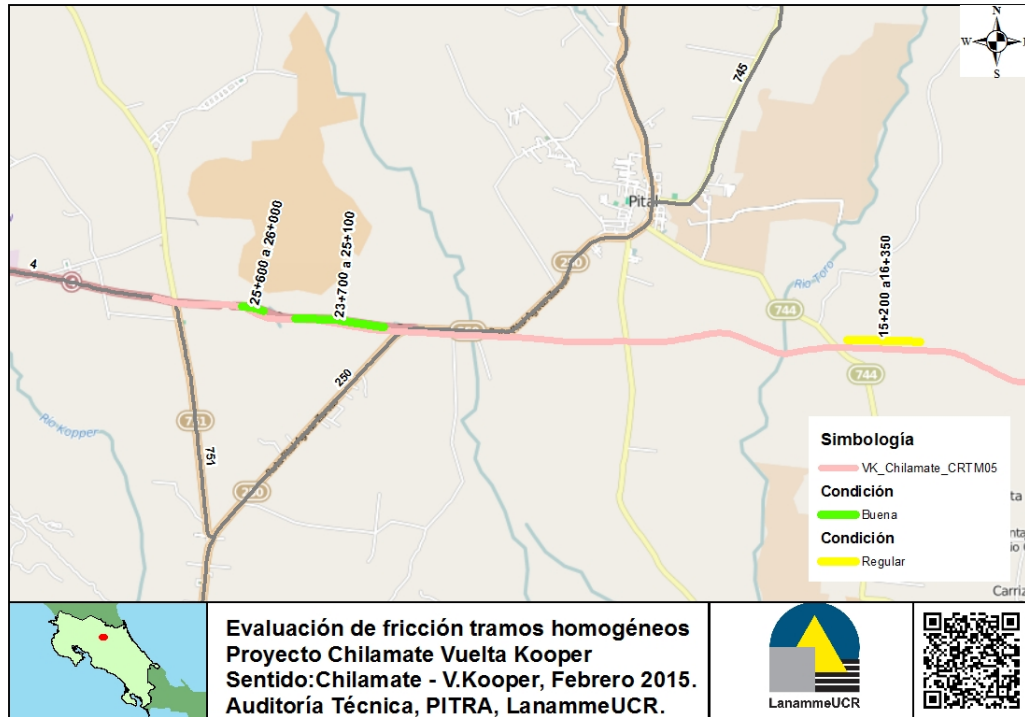


Figura 24. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Chilamate - Vuelta de Kooper.

En el sentido Vuelta de Kooper - Chilamate (Figura 24) se presenta una disminución en el porcentaje en condición buena con respecto al otro sentido. Específicamente, se obtiene un 51% en condición clasificada como buena y un 49% en condición clasificada como regular.

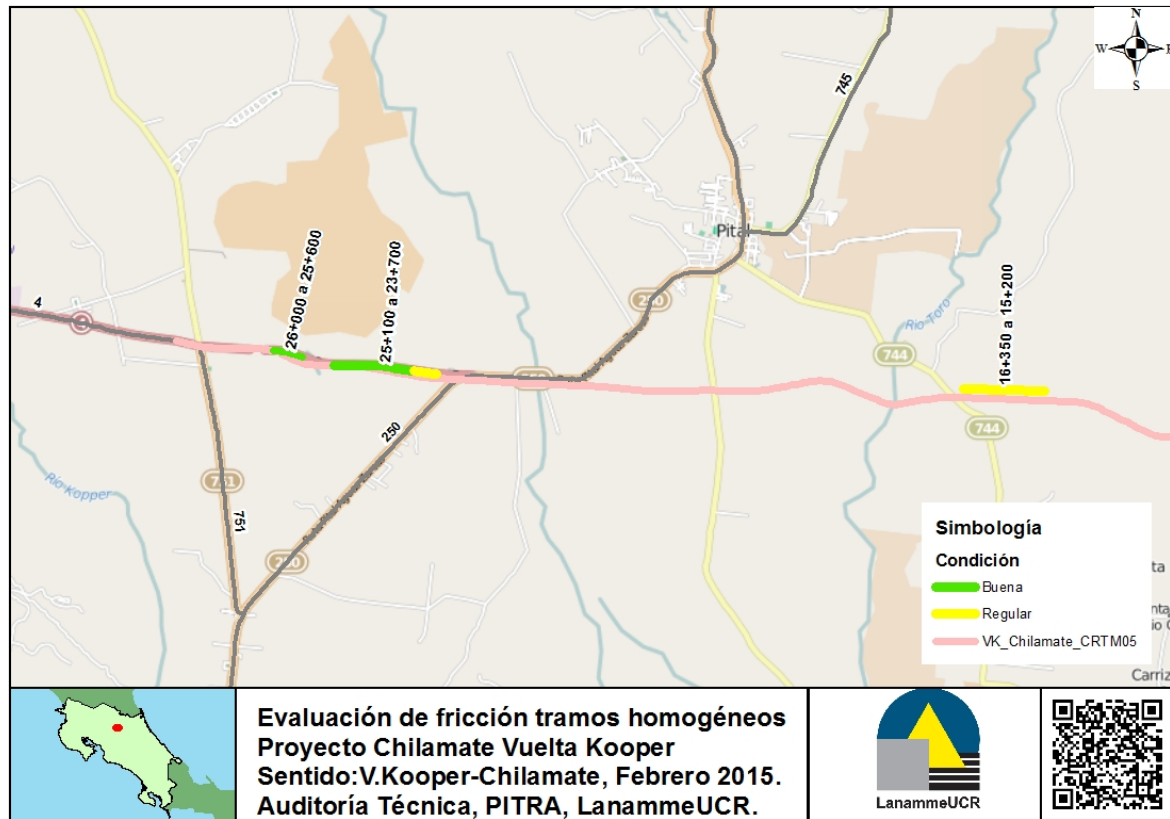


Figura 25. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Vuelta de Kooper- Chilamate.

Es importante aclarar que las mediciones se realizaron en Febrero de este año, lo cual teóricamente se cataloga como la condición crítica, ya que corresponde a la estación seca en donde se acumulan más partículas finas sobre la superficie de rueda así como derrames de aceite que afectan la microtextura y macrotextura del pavimento, produciendo una disminución en la fricción. No obstante, esta condición no se ha dado en el proyecto, debido a que la zona presentó durante los primeros meses del año condiciones climáticas propias de la estación lluviosa, por lo que posiblemente, al momento de la medición, la superficie no presentaba la cantidad de partículas y suciedad que sí se podrían esperar en otras vías en esa misma época.

Es criterio del equipo auditor que cuando entre en operación el proyecto es importante monitorear la condición de fricción del pavimento para evitar alcanzar condiciones inadecuadas desde el punto de vista de seguridad vial, ya que según lo expuesto anteriormente, existen tramos en condición regular que podrían pasar a una condición mala, asociada a pavimentos muy deslizantes y con una probabilidad muy alta de accidentes.

12. CONCLUSIONES

Sobre el Índice de Regularidad Internacional (IRI):

- Al aplicar la normativa cartelaria en cuanto a la regularidad superficial del proyecto en tres tramos, se obtiene en promedio para el Tramo 1 un valor de IRI de 2,3m/km, tanto para datos individuales como para la media móvil; para el Tramo 2 el valor promedio es de 2,9m/km para valores individuales y media móvil y por último para el Tramo 3 es de 1,8m/km en ambas evaluaciones, los cuales son mayores a los indicados en la especificación.
- Un incremento en el IRI repercute en aspectos económicos, relacionados con los costos de operación de los vehículos y el mantenimiento de pavimentos, además afecta las condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de la vía.
- Los valores de IRI obtenidos entre las secciones 16+600 y 20+800 del proyecto a nivel de base asfáltica presentan un promedio de 3,0m/km, por lo que la superficie de ruedo que se coloque en este tramo debe mejorar los valores de regularidad superficial al menos un 50% para lograr cumplir con el requisito especificado en el cartel.
- Los porcentajes de cambio del IRI en una sección analizada en base asfáltica en comparación con los resultados obtenidos a nivel de superficie de ruedo presentaron mejoras que llegan a un 13% como máximo y en algunos tramos se presentaron porcentajes negativos que indican que la regularidad superficial en la superficie de ruedo desmejoró con respecto a la capa de base asfáltica colocada previamente.

Sobre el análisis de la estructura del pavimento (FWD):

- Mediante la comparación directa entre los módulos obtenidos y los supuestos inicialmente para el diseño de la estructura, se concluye que los materiales colocados presentan características mecánicas mejores que las esperadas. Por lo tanto, se indica que la estructura cumple satisfactoriamente con el criterio de capacidad de soporte.
- A pesar de este resultado positivo, es posible afirmar que existe la posibilidad de que la estructura colocada se encuentre sobredimensionada si se consideran las características mecánicas de los materiales colocados en la estructura; ya que al contar con materiales de mejor competencia es normal esperar una reducción en los espesores requeridos, situación que desde el punto de vista económico puede ser visto como un ahorro en el presupuesto general de la obra.
- El análisis de fatiga indica que el espesor de mezcla asfáltica soportará los esfuerzos y deformaciones adecuadamente a lo largo de la vida útil. El porcentaje de agrietamiento máximo alcanzado a los 12 años es de 1,14% en el caso del agrietamiento transversal, mientras que para el agrietamiento longitudinal el porcentaje máximo alcanzado al final de la vida útil de la estructura 18,59%. como se

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 70 de 94
---	----------------------------------	-----------------

aprecia ambos casos resultan menores al umbral máximo permitido de de agrietamiento 20%, sin embargo debe ponerse especial atención al agrietamiento longitudinal.

- Respecto al desempeño del paquete estructural a la deformación permanente, el análisis llevado a cabo mediante el modelo utilizado, indica que teóricamente la estructura presentará desempeño pobre ante este tipo de deterioro, ya que para el año 12 el pavimento alcanzará los 13,45 mm de deformación permanente. Sin embargo, en la práctica la deformación permanente máxima se alcanza en los primeros años de vida útil del pavimento obteniendo de esta forma resultados que no superan el límite máximo recomendado, por lo cual se espera que el desempeño de la estructura frente a este deterioro sea satisfactorio.

Sobre la condición de fricción del proyecto

- Por medio del equipo Griptester se evaluó la condición de fricción de 5,9 kilómetros del proyecto. Los resultados obtenidos muestran un nivel de rozamiento entre regular y bueno. Para un proyecto nuevo se espera una condición entre buena y muy buena en términos de fricción; no obstante, este coeficiente se ve afectado por diversos parámetros tales como la época del año en que se realiza la evaluación y el tiempo de servicio del pavimento, por lo que los niveles de rozamiento presentados en este informe podrían mostrar mejorías en circunstancias diferentes a las dadas durante la realización del ensayo.



Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 71 de 94
---	----------------------------------	-----------------

13. RECOMENDACIONES

Le corresponde a la Administración definir e implementar las medidas correctivas y preventivas pertinentes, que contribuyan subsanar los hallazgos y observaciones planteados en el presente informe. A continuación se indican las recomendaciones derivadas de este informe.

A la Dirección de Ingeniería del MOPT

- Valorar la posibilidad de incluir en este y en futuros proyectos ensayos no tradicionales tales como Deflectometría de Impacto (FWD) y fricción (GRIP) como parámetros de aceptación con el objetivo de garantizar obras de mejor calidad y más durables, así como un uso eficiente de la inversión.
- Valorar solicitar dentro de los requisitos de diseños estructurales de pavimentos, la caracterización detallada de los materiales que se utilizarán, tales como curva maestra de la mezcla asfáltica y ensayos triaxiales de módulo resiliente de materiales granulares, esto con el objetivo de optimizar el diseño y la relación costo/beneficio de los proyectos de gran envergadura como el analizado en el presente informe.
- Valorar solicitar dentro de los ensayos de verificación de calidad ensayos no destructivos tales como el Deflectómetro de Impacto (FWD), los cuales proporcionan resultados confiables sobre la calidad de los materiales y procesos constructivos. Al utilizarse en conjunto con los ensayos tradicionales de control de calidad y como parámetro de aceptación se podría garantizar de forma más eficiente una obra vial con un desempeño satisfactorio durante su vida útil.

A la Unidad Ejecutora proyecto Bajos de Chilamate - Vuelta de Kooper

- Se recomienda a la Unidad Ejecutora del proyecto velar por el cumplimiento de la especificación de IRI en el proyecto, de manera que el producto final este acorde a la normativa establecida.
- Monitorear el proyecto durante el proceso constructivo con el objetivo de prevenir cualquier daño prematuro que se pueda presentar.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 72 de 94
---	----------------------------------	-----------------

14. REFERENCIAS

1. Arriola-Guzmán, R & Hidalgo-Arroyo, A. Unidad de Auditoría Técnica -PITRA, LanammeUCR. (2014). *LM-PI-AT-051-13: Evaluación De Los Estudios Preliminares Y Diseños Para El Proyecto De Construcción De La Ruta Nacional No.4 Sección: Bajos De Chilamate – Vuelta De Kooper*. Licitación Pública Internacional N° 2011LI-000037-32702.
2. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección Nacional de Vialidad (1977). *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica CR-77*. Capitulo No 1 y Capitulo No 3.
3. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección Nacional de Vialidad (2010). *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica CR-2010*.
4. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2002). *Disposiciones para la Construcción y Conservación Vial*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).
5. AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
6. Arias Barrantes, E. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios Mecánico - Empíricos*. Publicación Especial, LanammeUCR, Unidad de Gestión Municipal, San Pedro, Montes de Oca.
7. Barrantes Jiménez, R., & Sanabria Sandino, J. (2015). *Informe De Evaluación De La Red Vial Nacional Pavimentada De Costa Rica, Años 2014 -2015*. LanammeUCR, Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional, San Pedro de Montes de Oca.
8. Dynatest. (2015, Agosto). *Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing*. 106. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.
9. Flintsch, G. W., McGhee, K. K., de León Izeppi, E., & Najafi, S. (2012). *The Little Book of Pavement Friction*. Pavement Surface Properties Consortium.
10. Instituto Mexicano del Transporte (2010). (2010). *Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección Nacional de Vialidad.
11. Masad, E., Arash, R., Arif, C., & Harris, P. (2009). *Prediciting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Report No. 05627-1*. Texas Transportation Institute.
12. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes de Costa Rica, CR-2010*. Dirección Nacional de Vialidad.
13. National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic - Empirical Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures*. National Research Council, Transportation Research Program, Illinois.
14. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2008). *Informe UI-03-08, Determinación de un procedimiento de ensayo para el cálculo de IRI*. LANAMMEUCR, Unidad de Materiales y Pavimentos, San Pedro, Montes de Oca.
15. Arriola-Guzmán, R & Hidalgo-Arroyo, A. Unidad de Auditoría Técnica -PITRA, LanammeUCR. (2012). *LM-PI-AT-042-12: Evaluación del desempeño de la condición superficial de proyectos de reconstrucción vial*.
16. . Arriola-Guzmán, R., Sequeira-Rojas, W. & Hidalgo-Arroyo, A. Unidad de Auditoría Técnica -PITRA, LanammeUCR. (2012). *LM-PI-AT-158-11: Evaluación del Desempeño Estructural del Proyecto: "Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 613. Sección Sabalito-Las Mellizas"*. Licitación Pública No. 2008LN-000001-DI.
17. Arriola-Guzmán, R. & Hidalgo-Arroyo, A. Unidad de Auditoría Técnica -PITRA, LanammeUCR. (2012). *LM-PI-AT-096-10: Evaluación e Regularidad Superficial (IRI) Proyecto: Mejoramiento de la Ruta Nacional No. 34 Sección: Quepos- Barú Licitación Pública Internacional No 003-2007*.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 73 de 94
---	----------------------------------	-----------------

18. Arriola-Guzmán, R. & Hidalgo-Arroyo, A. Unidad de Auditoría Técnica -PITRA, LanammeUCR. (2012). *LM-PI-AT-159-10: Evaluación de Regularidad Superficial (IRI) Proyecto: "Mejoramiento de la Ruta Nacional N° 613. Sección Sabalito-Las Mellizas". Licitación Pública No. 2008LN-000001-*



Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 74 de 94
---	----------------------------------	-----------------

EQUIPO AUDITOR		
<p>Preparado por: Ing. Erick Acosta Hernandez Auditor Técnico</p>	<p>Preparado por: Ing. Emilio Corrales Chacón Auditor Técnico</p>	<p>Preparado por: Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo. Auditora Técnica</p>
<p>Aprobado por: Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc. Coordinadora Unidad de Auditoría Técnica PITRA</p>	<p>Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA</p>	<p>Visto Bueno de Legalidad: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal Externo LanammeUCR</p>



1. ANEXO A

Resultados de Regularidad Superficial (IRI)

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 76 de 94
---	----------------------------------	-----------------

Tabla A.1. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 1 (Informe I-0741-15).

Tramo 1				
Sección	Estacionamiento		IRI Individual [m/km]	Media Móvil
	Inicial	Final		
A	23+550	23+560	2.7	2.1
A	23+650	23+660	2.1	2.1
A	23+750	23+760	2.1	2.1
A	23+850	23+860	1.6	2.1
A	23+950	23+960	2.3	2.1
A	24+050	24+060	2.2	2.1
A	24+150	24+160	1.6	2.1
A	24+250	24+260	2.0	2.1
A	24+350	24+360	2.3	2.3
A	24+450	24+460	2.1	2.3
A	24+550	24+560	2.2	2.3
A	24+650	24+660	2.0	2.3
A	24+750	24+760	2.7	2.4
A	24+850	24+860	2.2	2.4
A	24+950	24+960	2.0	2.4
A	25+050	25+060	2.7	2.4
A	25+150	25+160	2.5	2.4
D	25+250	25+150	3.5	2.8
D	25+150	25+050	2.8	2.8
D	25+050	24+950	2.2	2.8
D	24+950	24+850	2.5	2.8
D	24+850	24+750	3.0	2.8
D	24+750	24+650	2.6	2.6
D	24+650	24+550	2.5	2.6
D	24+550	24+450	2.1	2.5
D	24+450	24+350	1.9	2.4
D	24+350	24+250	2.1	2.2
D	24+250	24+150	1.5	2.0
D	24+150	24+050	1.6	1.9
D	24+050	23+950	2.1	2.2
D	23+950	23+850	2.4	2.2
D	23+850	23+750	1.8	2.2
D	23+750	23+650	1.7	2.2
D	23+650	23+550	3.2	2.2

Tabla A.2. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 2 (Informe I-0741-15).

Tramo 2				
Sección	Estacionamiento		IRI Individual [m/km]	Media Móvil
	Inicial	Final		
B	25+500	25+510	2.7	2.8
B	25+600	25+610	2.9	2.9
B	25+700	25+710	2.9	2.9
B	25+800	25+810	2.7	2.9
B	25+900	25+910	2.5	2.9
B	26+000	26+098	3.7	2.9
C	26+100	26+000	3.5	3.0
C	26+000	25+900	3.1	3.0
C	25+900	25+800	2.3	3.0
C	25+800	25+700	3.3	3.0
C	25+700	25+600	2.7	3.0
C	25+600	25+600	2.5	2.8

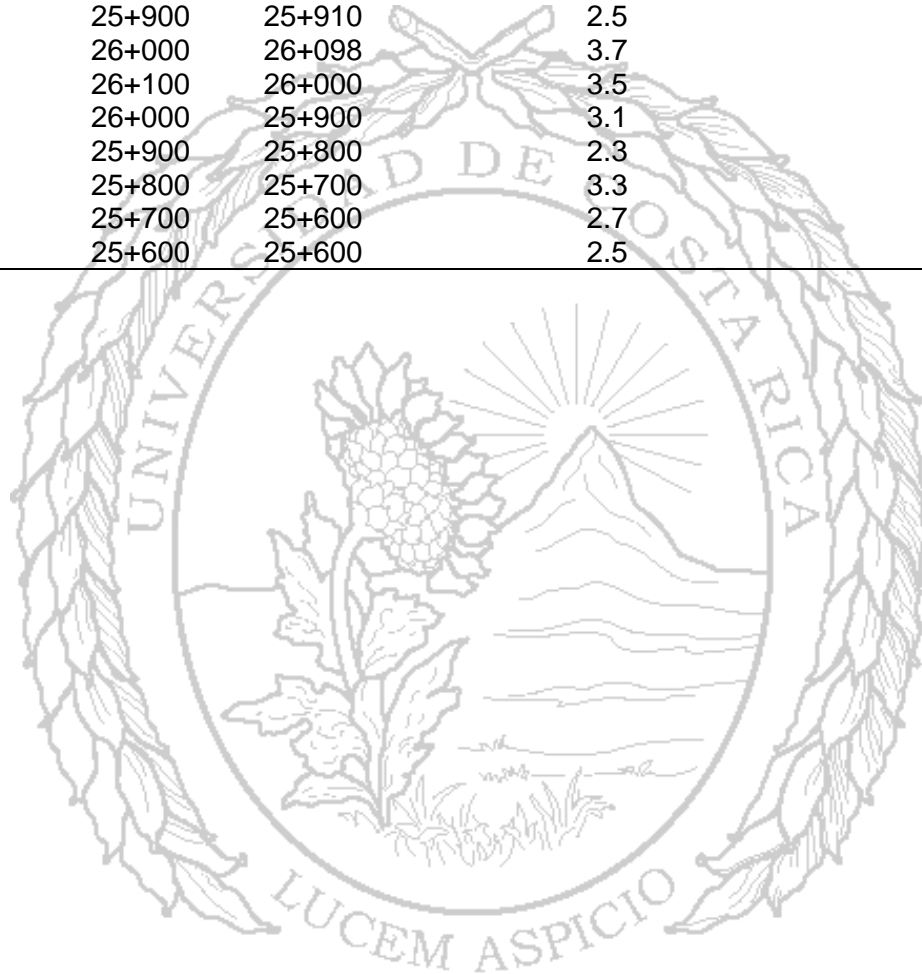


Tabla A.3. Resultados de IRI (m/km) de datos individuales y media móvil en carpeta asfáltica para el tramo 3 (Informe I-0741-15).

Tramo 3				
Sección	Estacionamiento		IRI Individual [m/km]	Media Móvil
	Inicial	Final		
E	16+500	16+400	2.2	2.1
E	16+400	16+300	2.1	2.1
E	16+300	16+200	2.1	2.1
E	16+200	16+100	2.2	2.1
E	16+100	16+000	2.1	2.1
E	16+000	15+900	1.7	2.0
E	15+900	15+800	2.1	2.0
E	15+800	15+700	1.6	2.0
E	15+700	15+600	1.7	1.9
E	15+600	15+500	1.6	1.8
E	15+500	15+400	1.5	1.7
E	15+400	15+300	1.8	1.8
E	15+300	15+200	1.9	1.8
E	15+200	15+100	1.6	1.8
E	15+100	15+000	1.8	1.8
E	15+000	14+900	1.7	1.8
E	14+900	14+800	1.9	1.8
F	14+860	14+870	2.1	1.8
F	14+960	14+970	1.8	1.8
F	15+060	15+070	1.9	1.8
F	15+160	15+170	1.4	1.8
F	15+260	15+270	1.6	1.8
F	15+360	15+370	1.6	1.7
F	15+460	15+470	1.3	1.6
F	15+560	15+570	1.4	1.5
F	15+660	15+670	1.4	1.5
F	15+760	15+770	1.6	1.6
F	15+860	15+870	1.6	1.7
F	15+960	15+970	1.4	1.7
F	16+060	16+070	1.6	1.7
F	16+160	16+170	1.6	1.7
F	16+260	16+270	2.3	1.7
F	16+360	16+460	1.9	1.7

Tabla A.4. Datos de IRI en base asfáltica para el tramo 1 (Informe I-0741-15).

Sección	Estación Inicial	Estación Final	MRI (m/km)	Valor media móvil (m/km)
E	20+832	20+732	4.2	3.2
E	20+732	20+632	2.9	3.2
E	20+632	20+532	3.0	3.2
E	20+532	20+432	2.7	3.2
E	20+432	20+332	3.0	3.2
Promedio			3.2	3.2
H	20+300	20+400	3.7	3.4
H	20+400	20+500	3.8	3.4
H	20+500	20+600	3.9	3.4
H	20+600	20+700	2.2	3.4
H	20+700	20+800	3.2	3.4
Promedio			3.4	3.4

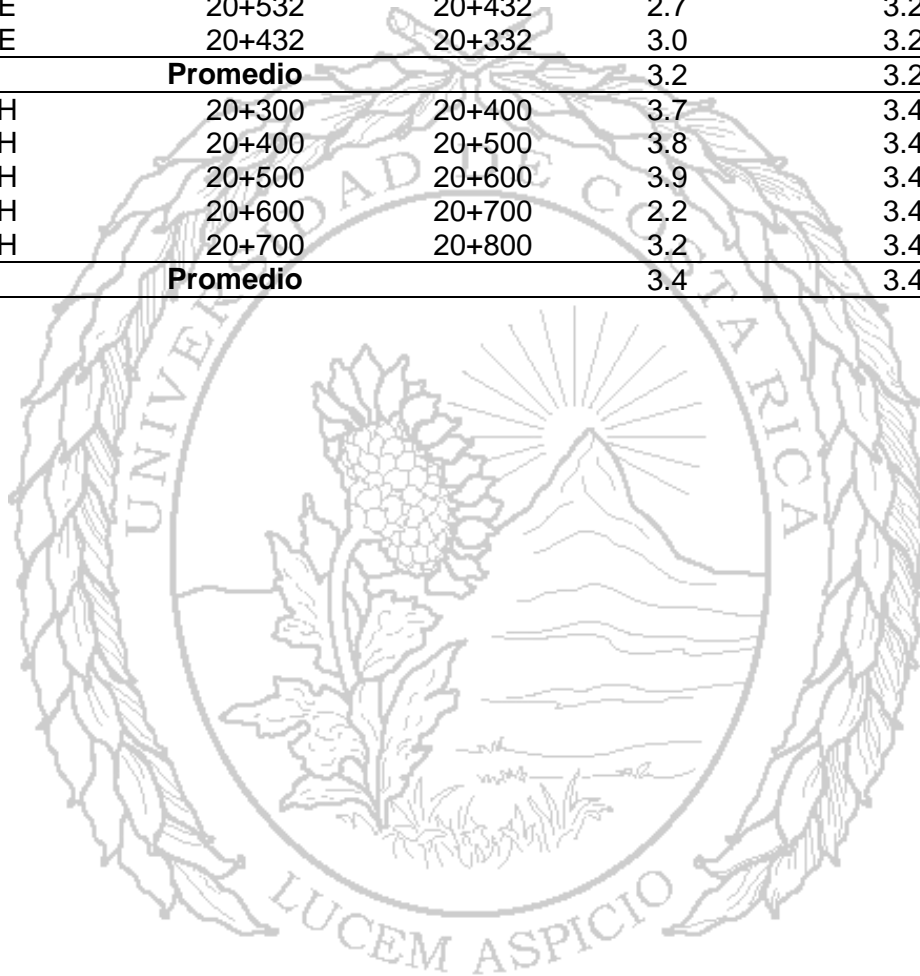
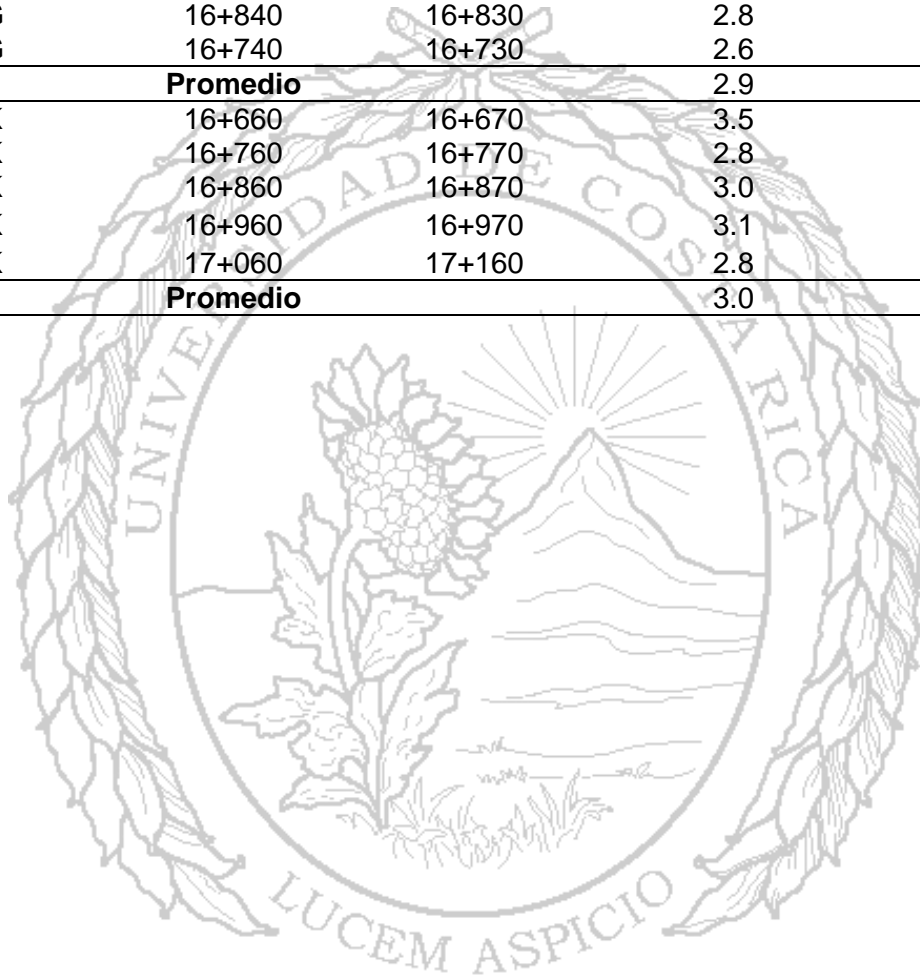


Tabla A.5. Datos de IRI en base asfáltica para el tramo 2 (Informe I-0741-15).

Sección	Estación Inicial	Estación Final	MRI (m/km)	Valor media móvil (m/km)
F	19+390	19+290	2.7	3.1
F	19+290	19+190	3.1	3.2
F	19+190	19+090	3	3.2
F	19+090	18+990	3.4	3.2
F	18+990	18+890	3.5	3.2
F	18+890	18+790	3	3.2
F	18+790	18+690	3.2	3.2
F	18+690	18+590	2.7	3.2
F	18+590	18+490	2.4	3
F	18+490	18+390	2.7	2.8
F	18+390	18+290	3	2.8
F	18+290	18+190	2.5	2.7
F	18+190	18+090	2.8	2.7
F	18+090	17+990	2.5	2.7
F	17+990	17+890	2.4	2.7
F	17+890	17+790	2.3	2.6
F	17+790	17+690	2.9	2.6
F	17+690	17+590	3	2.6
F	17+590	17+490	2.3	2.6
Promedio			2.8	2.9
L	17+490	17+500	3.2	2.9
L	17+590	17+600	2.5	2.9
L	17+690	17+700	3.1	2.9
L	17+790	17+800	2.7	2.9
L	17+890	17+900	2.9	2.9
L	17+990	18+000	2.7	2.9
L	18+090	18+100	2.9	2.9
L	18+190	18+200	2	2.7
L	18+290	18+300	3.1	2.8
L	18+390	18+400	3	2.8
L	18+490	18+500	2.5	2.8
L	18+590	18+600	2.5	2.8
L	18+690	18+700	2.7	2.8
L	18+790	18+800	2.3	2.6
L	18+890	18+900	2.1	2.5
L	18+990	19+000	2.4	2.5
L	19+090	19+100	2.3	2.5
L	19+190	19+200	2.4	2.5
L	19+290	19+300	3.3	2.5
Promedio			2.7	2.7

Tabla A.6. Datos de IRI en base asfáltica para el Tramo 3 (Informe I-0741-15).

Sección	Estación Final	Estación inicial	MRI (m/km)	Valor media móvil (m/km)
G	17+240	17+230	2.9	2.9
G	17+140	17+130	2.9	2.9
G	17+040	17+030	2.9	2.9
G	16+940	16+930	3.3	2.9
G	16+840	16+830	2.8	2.9
G	16+740	16+730	2.6	2.9
Promedio			2.9	2.9
K	16+660	16+670	3.5	3.0
K	16+760	16+770	2.8	3.0
K	16+860	16+870	3.0	3.0
K	16+960	16+970	3.1	3.0
K	17+060	17+160	2.8	3.0
Promedio			3.0	3.0





2. ANEXO B

Resultados de Deflectometría (FWD)

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 83 de 94
---	----------------------------------	-----------------

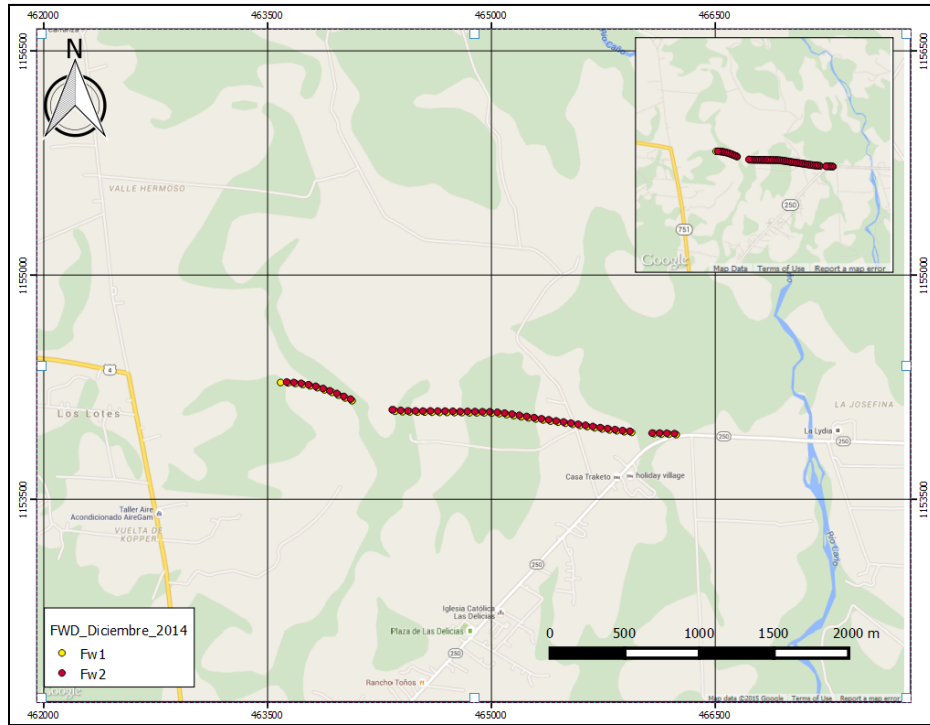


Figura B. 1. Tramos analizados FWD - Diciembre 2014

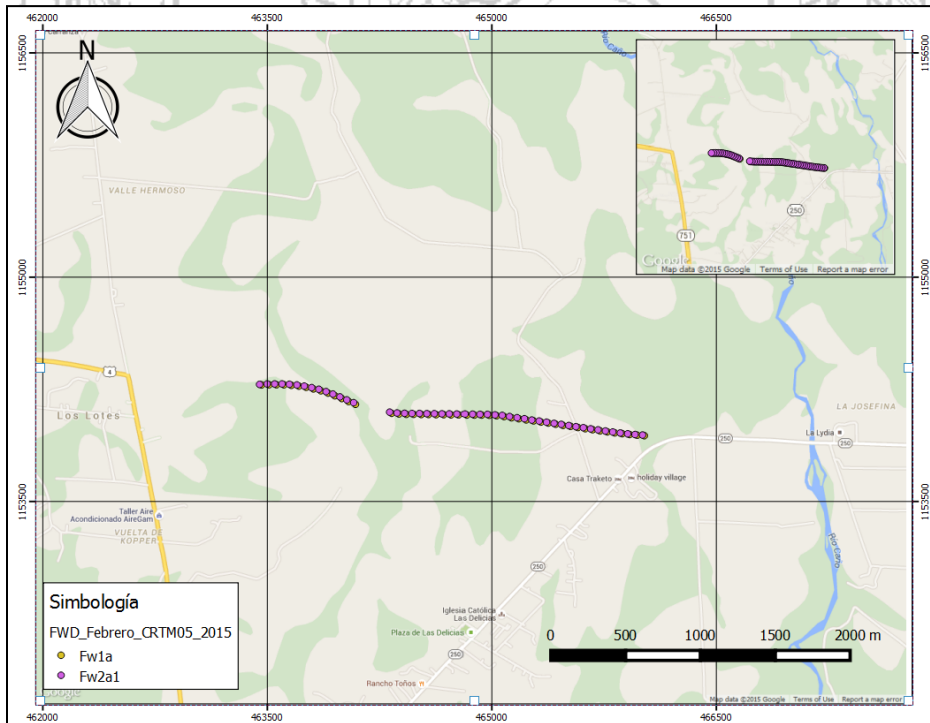


Figura B.2. Tramos analizados FWD - Febrero 2015

<p>Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3</p>	<p>Fecha de emisión: Diciembre 2015</p>	<p>Página 84 de 94</p>
---	---	------------------------

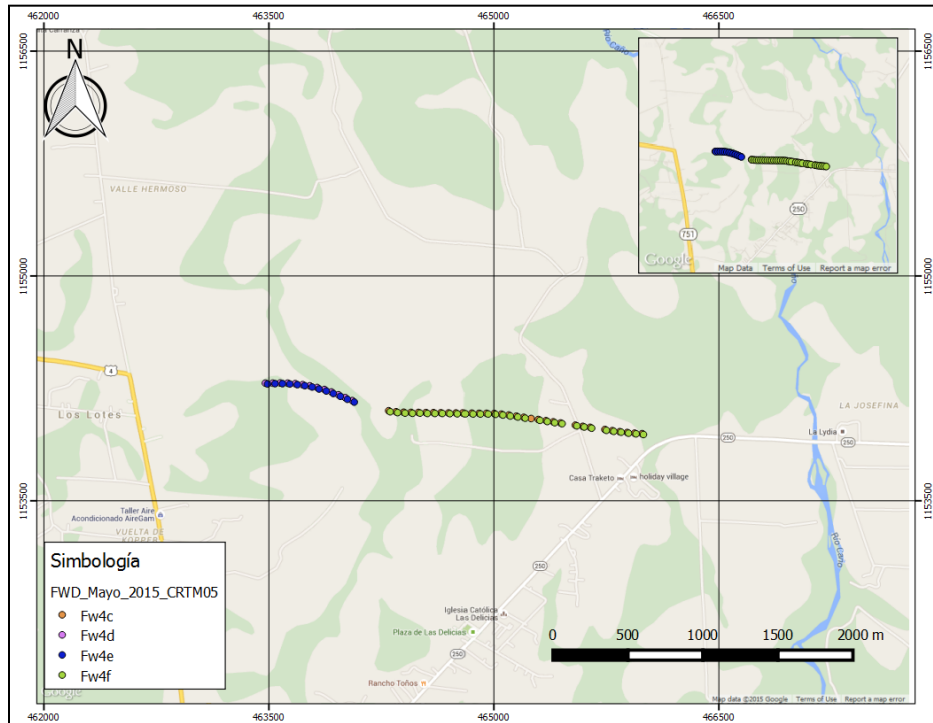


Figura B.3. Tramos analizados FWD - Mayo 2015

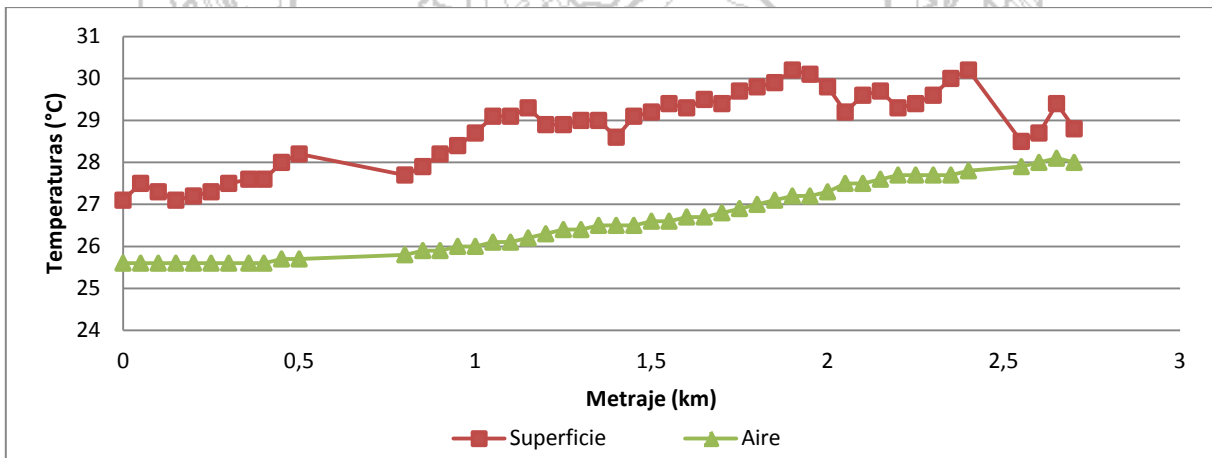


Figura B.4. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW1 - Diciembre 2014

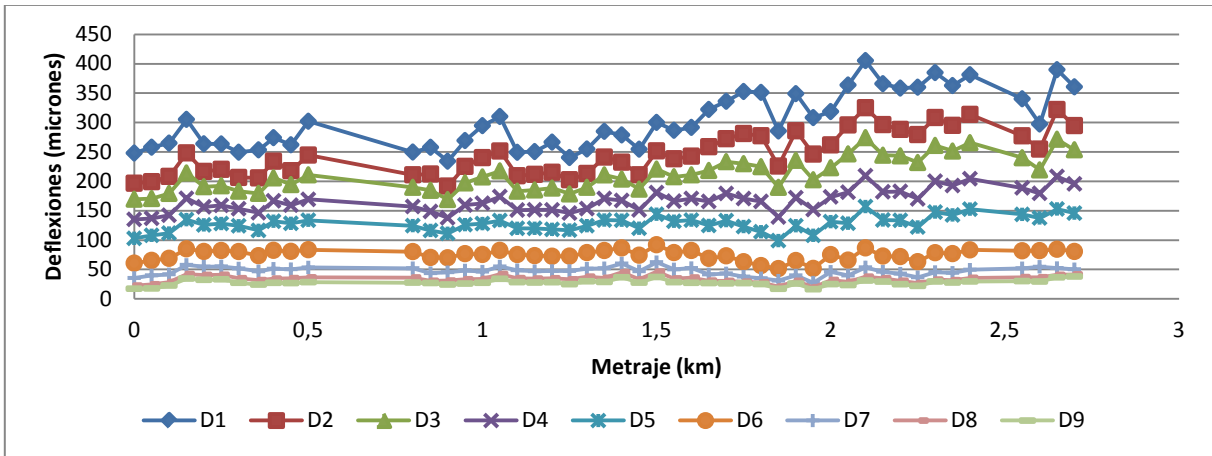


Figura B.5. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW1- Diciembre 2014

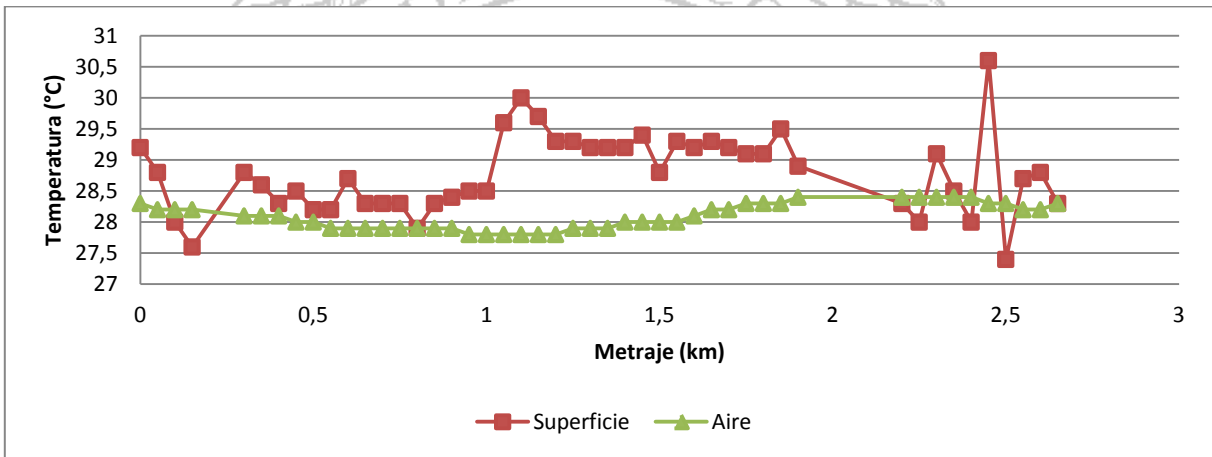


Figura B.6. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW2 - Diciembre 2014

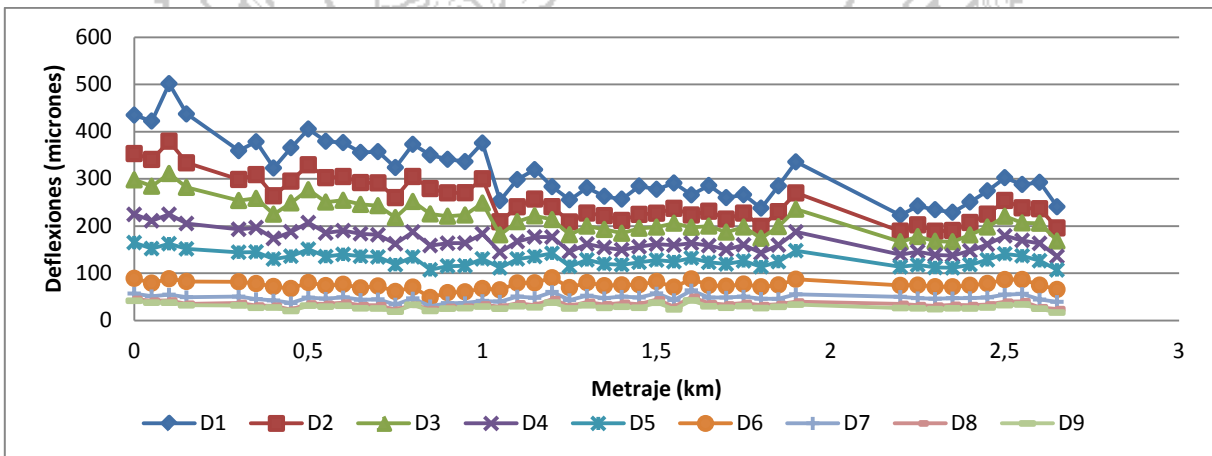


Figura B.7. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW2 - Diciembre 2014

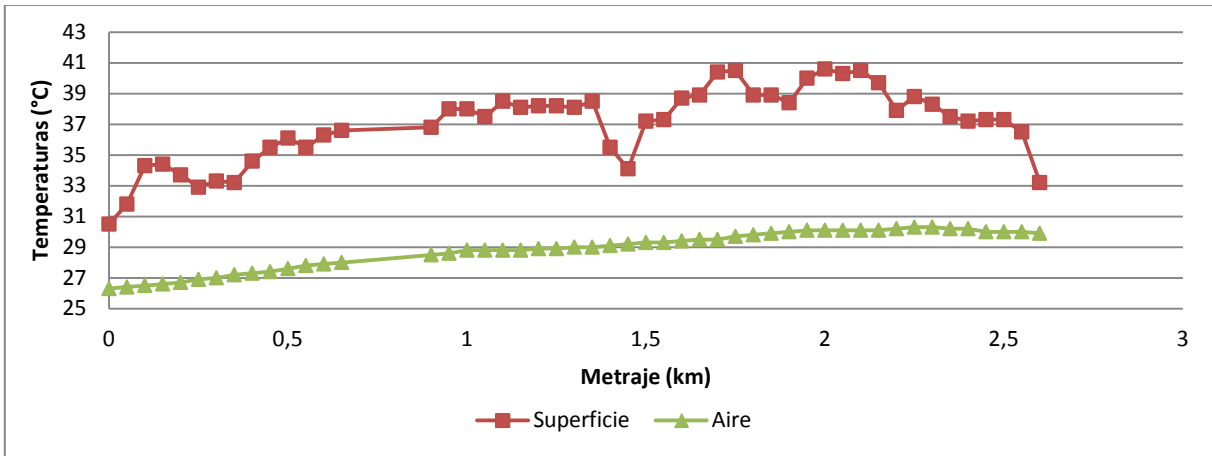


Figura B.8. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW1a - Febrero 2015

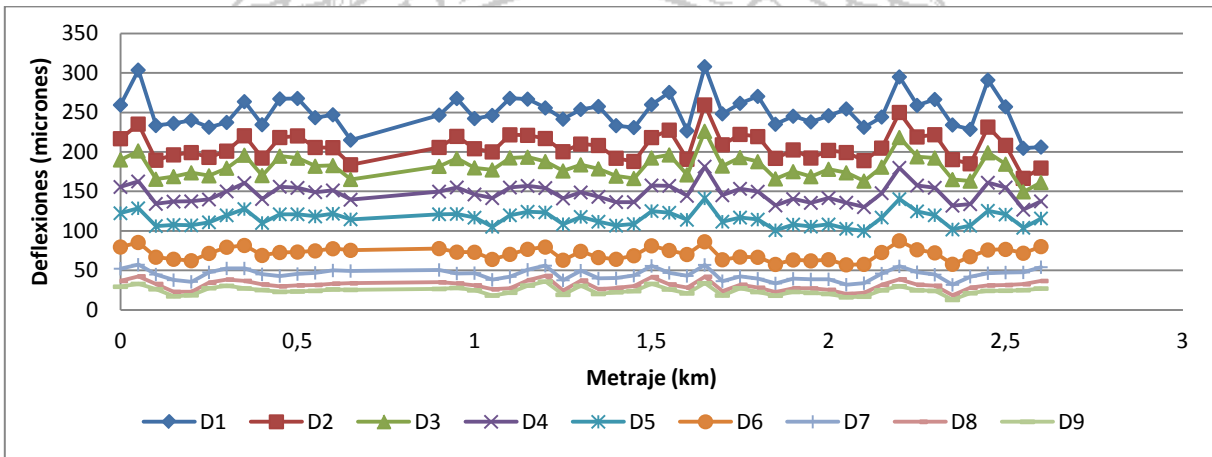


Figura B.9. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW1a - Febrero 2015

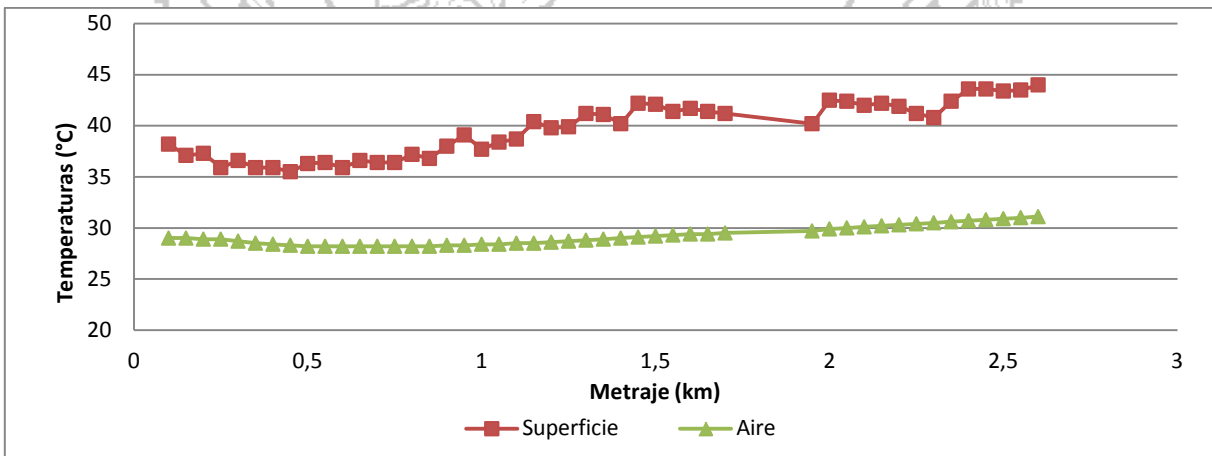


Figura B.10. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW2a - Febrero 2015

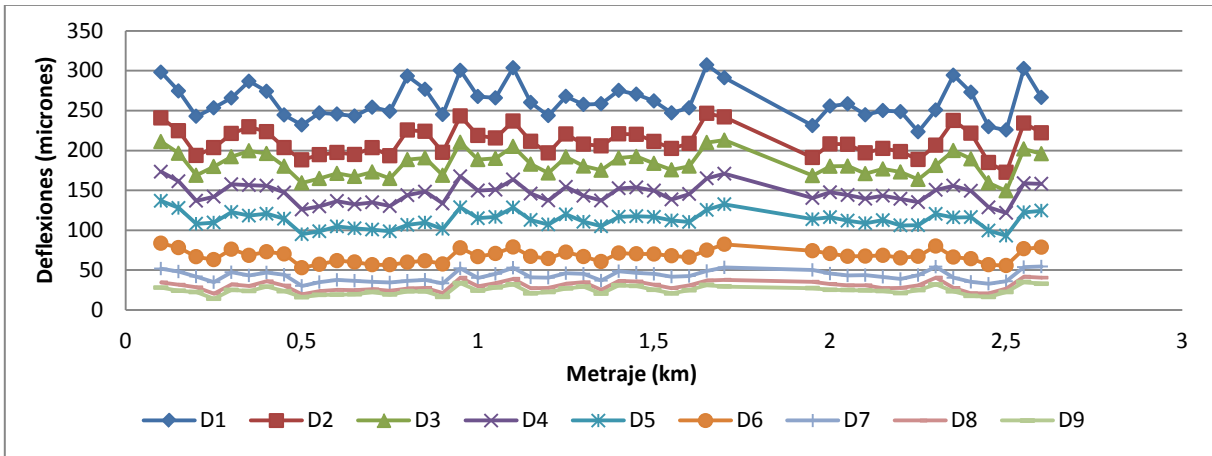


Figura B.11. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW2a - Febrero 2015

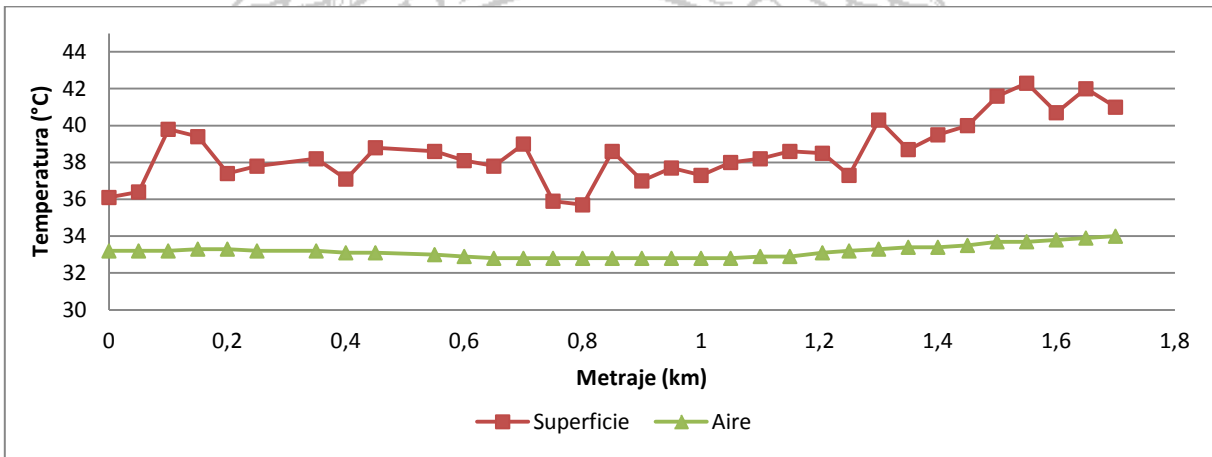


Figura B.12. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4c - Mayo 2015

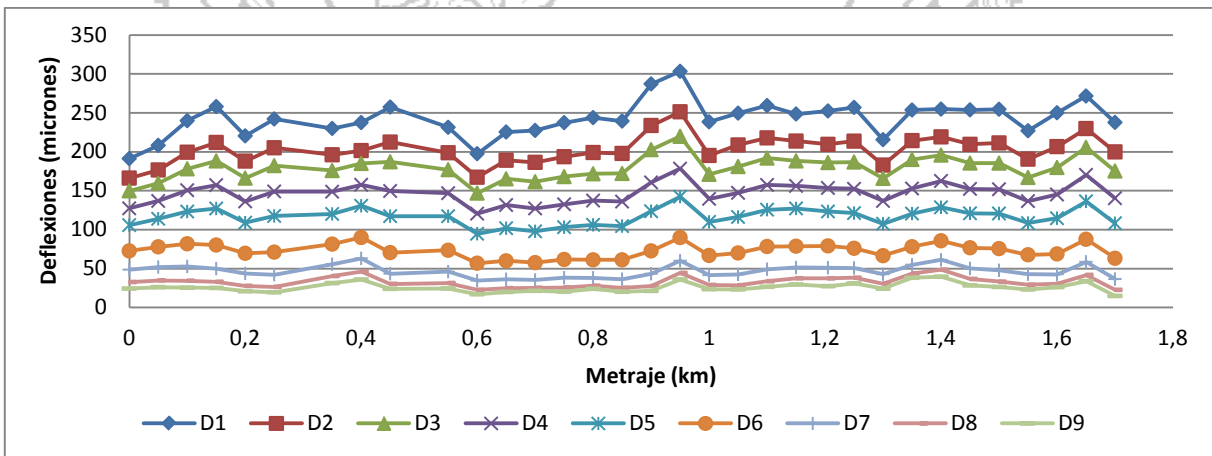


Figura B. 13. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4c - Mayo 2015

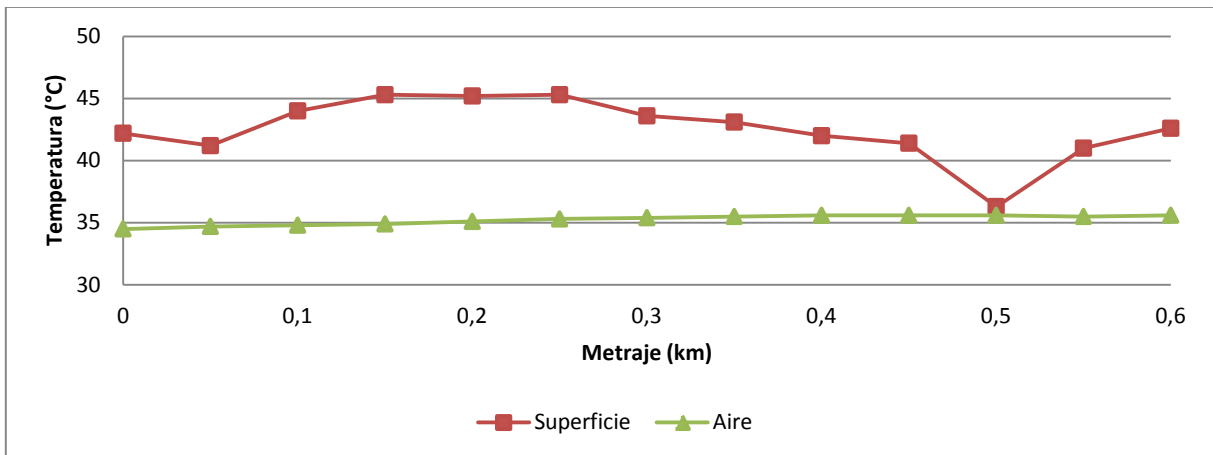


Figura B. 14. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4d - Mayo 2015

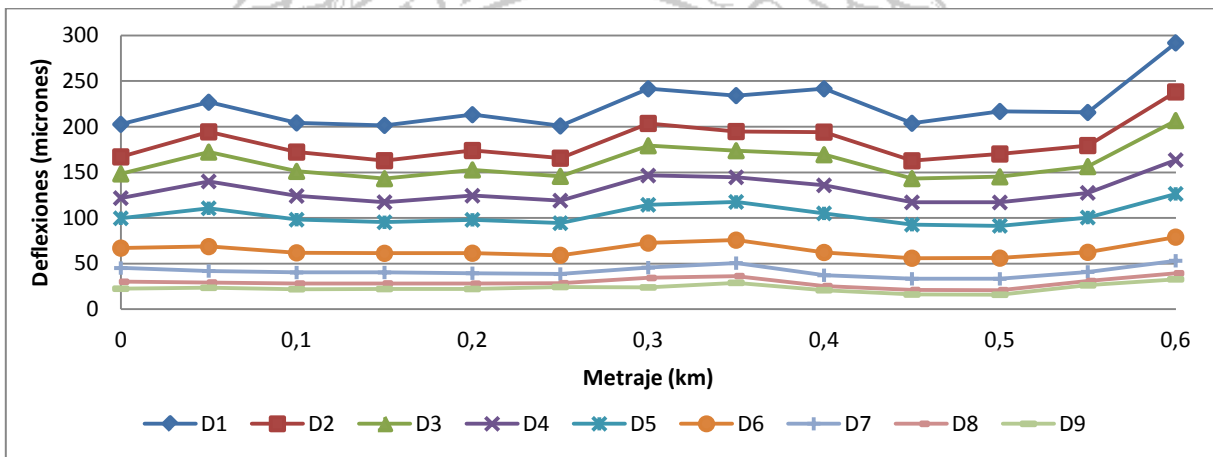


Figura B.15. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4d - Mayo 2015

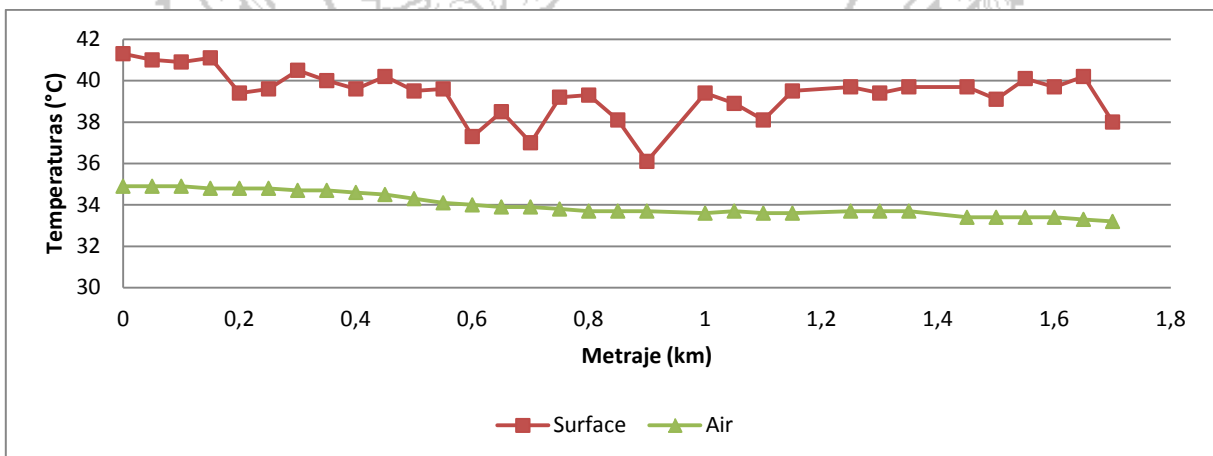


Figura B.16. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4f - Mayo 2015

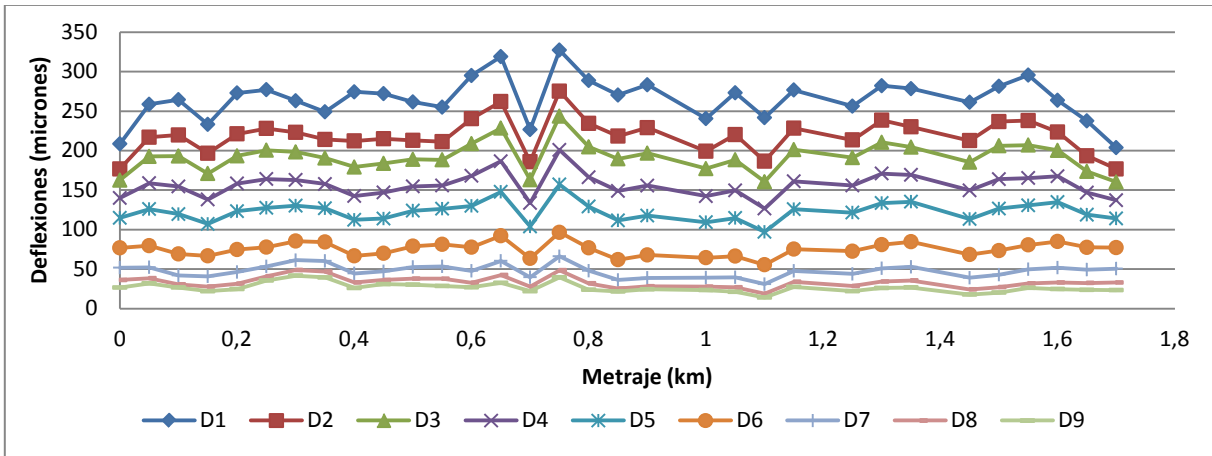


Figura B. 17. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4f - Mayo 2015

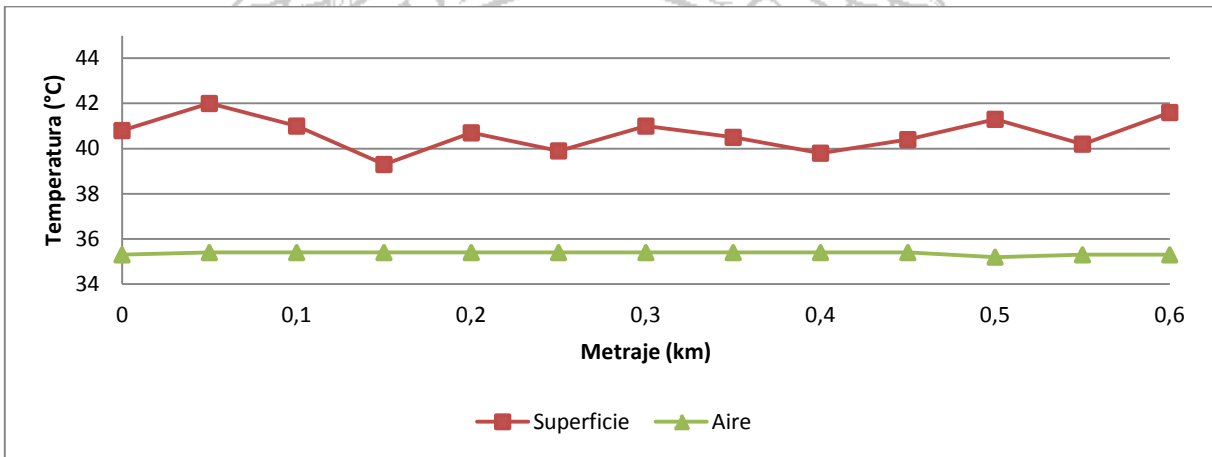


Figura B.18. Perfil de temperatura a lo largo del tramo FW4e - Mayo 2015

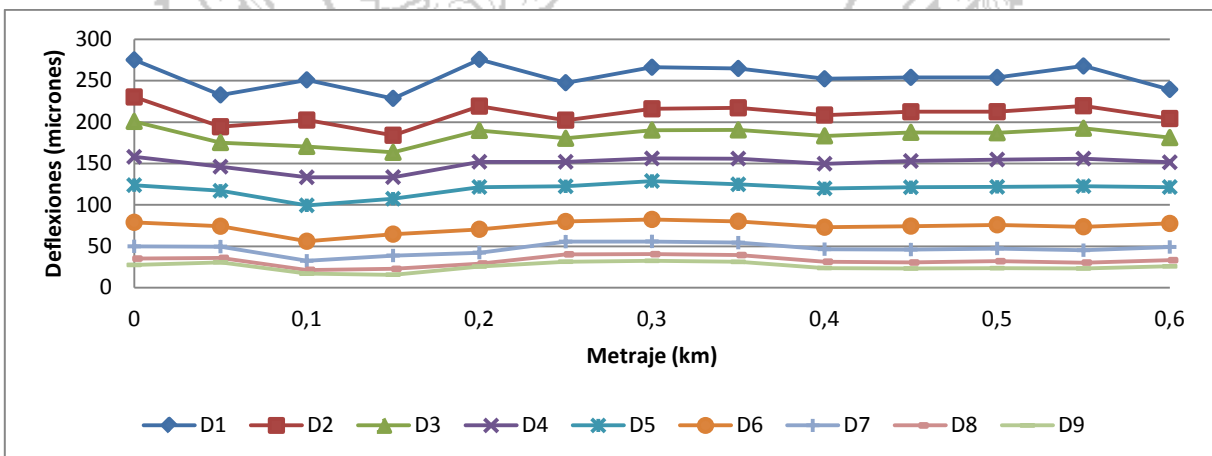


Figura B. 19. Deflexiones registradas por estación - Tramo FW4e - Mayo 2015



3. ANEXO C

Caracterización de Materiales

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 91 de 94
---	----------------------------------	-----------------

La Guía de Diseño Mecánico Empírica de la AASHTO (MEPDG por sus siglas en inglés) publicada en el año 2002 introduce un enfoque jerárquico para diseñar pavimentos. Este enfoque proporciona al diseñador una gran flexibilidad en la obtención de los insumos para un proyecto de diseño basado en la criticidad del proyecto y los recursos disponibles. El enfoque jerárquico consta de tres niveles y se emplea en materia de tráfico, materiales e insumos ambientales, y actualmente forma parte del estado de la práctica de muchas agencias de transportes de Estados Unidos así como países latinoamericanos.

El Nivel 1 proporciona el más alto nivel de precisión y, por lo tanto, tiene asociado el menor nivel de incertidumbre o error, por lo que normalmente se utiliza para el diseño de pavimentos de alta importancia económica y social, tales como el proyecto "Bajos de Chilamate - Vuelta de Kooper", el cual formará parte del Corredor Noratlántico del país y de la red de alta capacidad según el Plan Nacional de Desarrollo 2011-2014 y el Plan Nacional de Transportes 2011-2035.

El Nivel 1 definido en esa guía requiere que se realicen pruebas de laboratorio y de campo, por ejemplo ensayos de módulo dinámico, ensayos triaxiales para obtención de módulo resiliente en materiales granulares y suelos, y ensayos no destructivos como deflectometría de impacto. A modo referencial, este anexo incluye las pruebas realizadas en el LanammeUCR a los materiales utilizados en el proyecto auditado, cuyos resultados se utilizaron como insumos para el retrocálculo incluido en el informe.

Módulo Dinámico

Para el análisis realizado por medio de la metodología de retrocálculo de módulos se consideran dos valores como referencia para estimar el módulo de la carpeta asfáltica: 1) el valor asumido para el diseño establecido por la metodología de diseño de la AASHTO 1993 en 450.000 psi y 2) el obtenido a partir de las características específicas de la mezcla asfáltica del proyecto por medio de la elaboración de la curva maestra, la cual permite estimar valores de módulo en función de la frecuencia de aplicación de carga y temperatura de la mezcla asfáltica en caliente (MAC). Para efectos de contar con un valor de referencia se utilizará el de la curva maestra (Ver Figura 42), asumiendo una velocidad de aplicación de carga de 60 km/h. (≈ 5.45 Hz) a una temperatura de referencia de 20 °C. Con dichas condiciones, el valor de módulo obtenido para la MAC es de **850.166 psi**, el cual será comparado con los resultados generados por medio del proceso de retrocálculo de módulos.

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 92 de 94
---	----------------------------------	-----------------

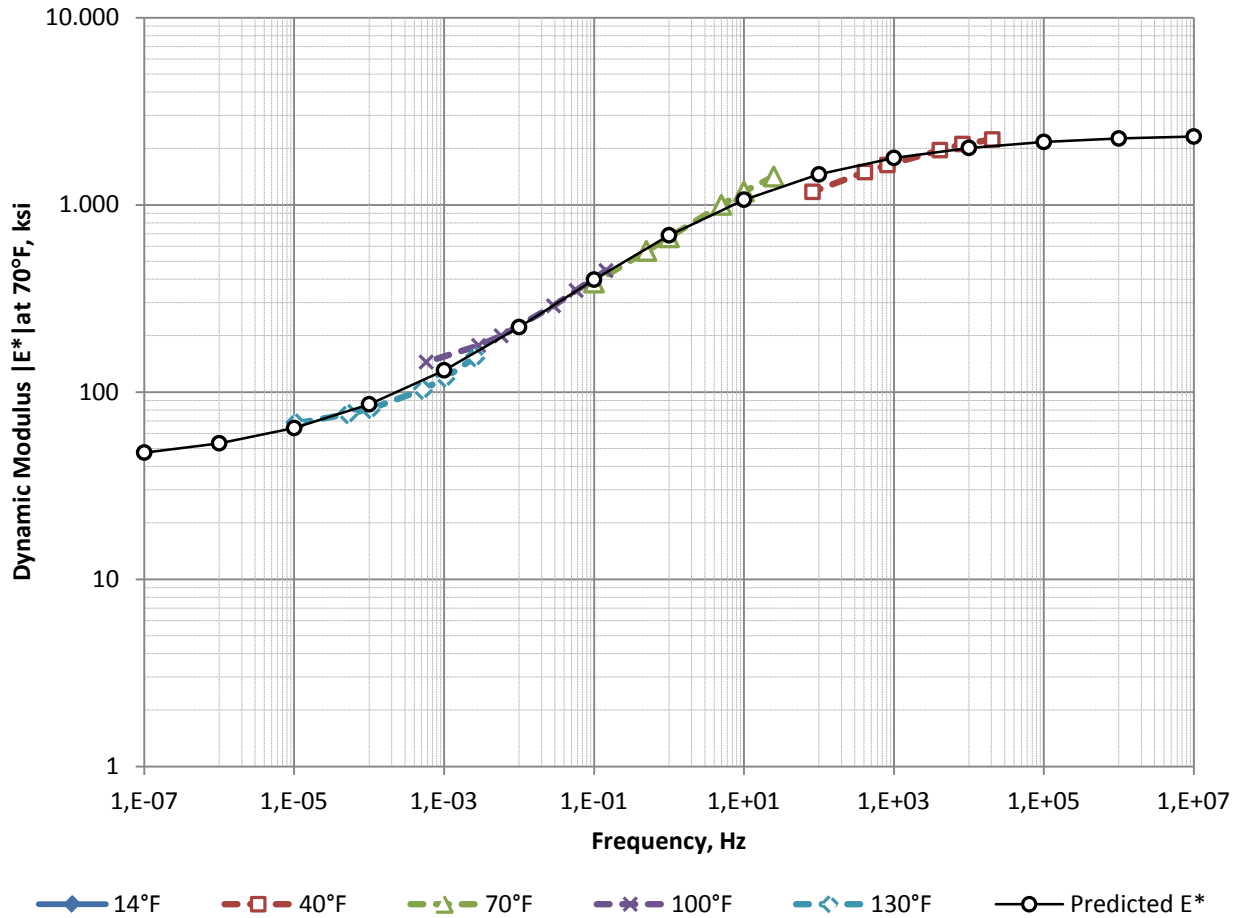


Figura C. 1. Curva maestra la de MAC producida en el proyecto

Módulo Resiliente

En el caso del ensayo de módulo resiliente, las condiciones de esfuerzos aplicadas tanto a los materiales granulares como de subrasante, representan el rango del estado de esfuerzos que probablemente se va a desarrollar bajo la estructura del pavimento sometida a las cargas de tránsito. Para estimar el módulo resiliente a partir de los resultados del ensayo de laboratorio se utiliza el modelo generalizado constitutivo (NCHRP I-28A), el cual se muestra a continuación:

$$M_r = k_1 \cdot P_a \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a}\right)^{k_3}$$

donde:

M_r = módulo resiliente, psi

θ = invariante de esfuerzos = $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

σ_1 = esfuerzo principal mayor

σ_2 = esfuerzo principal intermedio = σ_3 para un espécimen cilíndrico.

σ_3 = esfuerzo principal menor / presión de confinamiento = σ_c

Informe Final LM-PI-AT-021-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Diciembre 2015	Página 93 de 94
---	----------------------------------	-----------------

$$\tau_{\text{oct}} = \text{esfuerzo cortante octaédrico} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

P_a = normalización de esfuerzo (presión atmosférica), a nivel de mar 1 kg/cm² o 101 kPa.

k_1, k_2, k_3 = constantes de regresión (obtenidas al ajustar los resultados del ensayo de módulo a la ecuación).

Los coeficientes del modelo constitutivo determinados para cada espécimen de ensayo deben ser tales para que el coeficiente de correlación (R^2) sea superior a 0,90. Los coeficientes del modelo constitutivo que han sido obtenidos de suelos similares se pueden combinar para obtener valores de k_1, k_2, k_3 ponderados.

A continuación se muestran los valores de las constantes de regresión obtenidas de la regresión lineal múltiple realizada a los resultados de los tres especímenes de material de préstamo sometidos al ensayo de módulo resiliente.

Tabla C. 1. Constantes de regresión del modelo constitutivo para el material de préstamo

Constantes de regresión	P1 (kPa)	P2 (kPa)	P3 (kPa)	Promedio
k_1	123.311	96.714	131.756	117.260
k_2	0,500	0,586	0,484	0,523
k_3	-0,179	-0,224	-0,193	-0,199

Asimismo, en la Tabla C.2 se incluyen las constantes de regresión para el modelo constitutivo del material de subrasante del proyecto.

Tabla C.2. Constantes de regresión del modelo constitutivo para el material de subrasante

Constantes de regresión	P1 (kPa)	P2 (kPa)	P3 (kPa)	Promedio
k_1	94.396	139.317	109.902	114.538
k_2	0,408	0,218	0,302	0,3092
k_3	-2,190	-1,949	-1,947	-2,0285