



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-AT-014-15
PARTE 1 DE 3

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

PROYECTO: RUTA NACIONAL NO.35 SECCIÓN: "SIFÓN-LA
ABUNDANCIA".

INFORME FINAL

Preparado por:
Unidad de Auditoría Técnica

San José, Costa Rica



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-014-15 (Parte 1 de 3)	2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: "EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO (IRI, FWD, GRIP, APA Y FATIGA) DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO.35 SECCIÓN: SIFÓN-LA ABUNDANCIA. (PARTE 1 DE 3)." ---**--	4. Fecha del Informe Enero 2016	
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), a manera de referencia y se realizó un análisis de retrocálculo de módulos para determinar la capacidad estructural de la estructura del pavimento. Adicionalmente, se evaluó el desempeño de la mezcla asfáltica convencional y modificada (polímero), como complemento al análisis del desempeño del pavimento. Finalmente, 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: Análisis de regularidad superficial (IRI): Se analizaron secciones del proyecto a nivel de capa de ruedo para los dos sentidos de circulación y por carril para un total de 16 secciones. De los 16 tramos analizados de 100 metros, 11 sobrepasan el valor promedio mencionado en la especificación de referencia, CR-2010 sección 401.16. Análisis estructural del pavimento (FWD): Se realizó el análisis de retrocálculo de módulos para determinar las propiedades mecánicas de los materiales que componen el pavimento del proyecto. Esto se realizó para los cuatro carriles de las secciones ubicadas entre las estaciones 39+040 y 35+710. El análisis de datos indica que las propiedades de los materiales utilizados cumplen con las condiciones supuestas, superando en magnitud los valores de módulo supuestos para cada capa durante la fase de diseño. Análisis de desempeño de la estructura de pavimento: Se realizó el análisis del desempeño que presentará la estructura ante deterioros como deformación permanente y agrietamiento por fatiga tomando en cuenta los diferentes tipos de agrietamiento en función del origen del mismo y su forma de propagación. Al contemplar las condiciones típicas a las que será sometida la estructura, esto es a una temperatura promedio de operación, el pavimento tendrá fallas visibles a los 16 años por agrietamiento por fatiga, no así por deformación permanente. Análisis de desempeño de la mezcla asfáltica: Se realizaron ensayos para cuantificar la deformación permanente y la fatiga en laboratorio de muestras de mezcla asfáltica con y sin adición de polímero. Los resultados evidenciaron que la mejora en el desempeño entre las mezclas que contienen polímero con respecto a las mezclas convencionales no queda claramente demostrada y la adición de polímero no brinda valor agregado a la mezcla utilizada en el proyecto, de acuerdo con las muestras ensayadas. Análisis de la condición de fricción (GRIP): Se analizaron los resultados de las pruebas de fricción realizadas a lo largo de aproximadamente 775 m por carril. Se obtuvieron registros de Grip Number de los cuatro carriles que conforman en proyecto entre las estaciones 38+120 y 38+880, obteniendo resultados satisfactorios para el proyecto al analizar los niveles de fricción que se registraron durante la prueba.		
10. Palabras clave PITRA, FWD, retrocálculo de módulos, IRI, GRIP, APA, fatiga, desempeño	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 75

Informe Final LM-PI-AT-014-15 Parte 1 de 3	Fecha de emisión: Enero 2016	Página 2 de 74
---	------------------------------	----------------

INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA

"Evaluación de los parámetros de desempeño (IRI, FWD, GRIP, APA Y FATIGA) del proyecto de Construcción de la Ruta Nacional No.35 Sección: Sifón-La Abundancia (Parte 1 de 3)".

Departamento encargado del proyecto: Gerencia de Construcción de Vías y Puentes de CONAVI, a través de la Unidad Ejecutora de Sifón-La Abundancia.

Empresa responsable de verificación de calidad: Durante el periodo de la auditoría técnica (Enero y Agosto del 2015) el Laboratorio del MOPT ejerció la función de verificación de calidad.

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: US\$61.049.657,12, Addendum N°2: US\$77.558.295,00 Addendum N° 6 US\$43.449.446.95

Plazo original de ejecución: 1460 días naturales. Addendum N°2: incrementa a 910 días Addendum N° 6 571 días adicionales hasta el 13 de octubre del 2015.

Longitud del proyecto: 29,73 km (9+700 a 39+400)

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

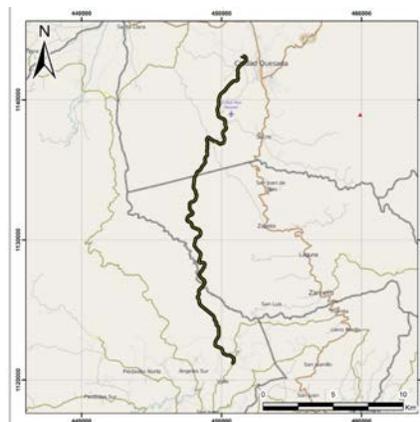
Asesor Legal :

Lic. Miguel Chacón Alvarado

Alcance del informe:

A partir de la realización de mediciones en campo y laboratorio y los respectivos análisis de los resultados, se evalúan los parámetros de desempeño del proyecto, a saber IRI, FWD, GRIP, APA y Fatiga, con el objetivo de determinar el estado funcional y estructural del proyecto a lo largo del tiempo. La condición superficial (IRI) así como el análisis estructural y la condición de fricción medida con el Griptester se realiza a nivel de la estructura completa. La evaluación de la deformación permanente y la fatiga se realiza mediante ensayos de laboratorio. Lo anterior en secciones del proyecto que cumplieran con estas condiciones durante el periodo de la auditoría técnica (Enero a Agosto de 2015)

Ubicación de la ruta auditada:



Proyecto Sifón-La Abundancia



TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
1. FUNDAMENTACIÓN	7
2. ESTRUCTURA GENERAL DEL INFORME	7
3. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA AUDITORÍA TÉCNICA	8
4. INTEGRANTES DEL EQUIPO DE AUDITORÍA TÉCNICA DEL LANAMMEUCR.....	9
5. RESPONSABLES DEL PROYECTO.....	9
6. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	9
7. ANTECEDENTES.....	10
8. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	14
9. MARCO CONCEPTUAL DEL INFORME.....	15
9.1. Cálculo del Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	15
9.2. Evaluación estructural del pavimento.....	19
9.3. Evaluación de la condición de fricción del pavimento.....	22
10. AUDIENCIA A LA PARTE AUDITADA PARA ANÁLISIS DEL INFORME PRELIMINAR LM-PI-AT-014B-15.	24
11. HALLAZGOS Y OBSERVACIONES DE LA AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA	25
11.1. SOBRE EL ÍNDICE DE REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	25
Observación 1: El valor de IRI calculado en secciones del proyecto a nivel de la superficie de ruedo generalmente es mayor al valor promedio indicado por la especificación de referencia, CR-2010.	26
11.2. SOBRE EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PROYECTO	30
Observación 2: Los materiales colocados entre los estacionamientos 37+600 y 39+040 presentan mejores características mecánicas que las supuestas en el diseño estructural.	33
RESULTADOS DE RETROCÁLCULO DE MÓDULOS	33
11.3. SOBRE EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DEL PROYECTO	39
Observación 3: El número estructural real (SN_{REAL}) es mayor al número estructural requerido ($SN_{REQUERIDO}$)	39
Observación 4: En condiciones críticas, la estructura de pavimento presentará fallas por fatiga a edades avanzadas de la vida de servicio del proyecto, mientras que la deformación permanente no excederá el límite máximo permitido.	40
11.4. SOBRE EL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	48
Observación 5: No se evidencia una mejoría en el desempeño de la mezcla asfáltica modificada con polímero al compararla con la mezcla convencional	49
11.5. SOBRE LA CONDICIÓN DE FRICCIÓN DEL PROYECTO.....	54
Observación 6: El nivel de fricción de las secciones de pavimento evaluadas en el proyecto presentan una condición entre buena y muy buena	55
12. CONCLUSIONES.....	57
13. RECOMENDACIONES	59
14. REFERENCIAS.....	61
ANEXO A	62
ANEXO B	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto.....	14
Figura 2. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías	17
Figura 3. Cuenco de deflexiones producido por el equipo FWD	19
Figura 4. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: Sifón-La Abundancia, carril externo.....	28
Figura 5. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: Sifón-La Abundancia, carril interno.....	28
Figura 6. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: La Abundancia- Sifón, ambos carriles. (azul: externo y rojo: interno)	29
Figura 7. Ubicación de pruebas de Deflectometría.....	31
Figura 8. Estructura de pavimento proyecto Sifón - La Abundancia.....	32
Figura 9. Resumen de resultados - Análisis de retrocálculo.....	38
Figura 10. Evolución del porcentaje de área agrietada MAC -FW1.....	42
Figura 11. Evolución del desempeño por deformación permanente - FW1	43
Figura 12. Evolución del porcentaje de área agrietada MAC en condiciones críticas -FW2.....	46
Figura 13. Evolución del desempeño por deformación permanente en condiciones críticas - FW2	46
Figura 14. Resultados del ensayo APA en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia. Fuente: LanammeUCR	50
Figura 15. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 400 E-6 mm/mm.....	51
Figura 16. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 600 E-6 mm/mm.....	52
Figura 17. Ubicación de tramos de evaluación de la fricción en el Proyecto Sifón - La Abundancia.	54
Figura 18. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Sifón - La Abundancia.....	55
Figura 19. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Abundancia - Sifón.....	56
Figura A. 1.Perfil de Deflexiones - Sector FW1a. Carril externo.....	63
Figura A. 2. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW1b.....	63
Figura A. 3. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW2a.....	64
Figura A. 4 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW2b.....	64
Figura A. 5 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW1a	65
Figura A. 6. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW1b	67
Figura A. 7Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW2a	69
Figura A. 8 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW2b	71
Figura B. 1. Curva de módulo dinámico de la Mezcla Asfáltica en Caliente convencional	74
Figura B. 2. Curva de módulo dinámico de la Base Asfáltica	74



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de correspondencia durante el proceso de auditoría técnica.....	11
Tabla 2. Resumen de información discutida en la reunión del 28/01/2015.....	12
Tabla 3. Resumen de la información solicitada durante la reunión del 09-09-2015.....	13
Tabla 4. Resumen de las secciones y sentidos evaluados del proyecto.....	13
Tabla 5. Sección típica eje principal del proyecto.....	15
Tabla 6. Especificaciones Internacionales de Índice de Regularidad Internacional (IRI).....	18
Tabla 7. Clasificación internacional del pavimento según el Grip Number.....	23
Tabla 8. Resumen de valores promedio de MRI para los tramos analizados.....	27
Tabla 9. Cantidad y extensión de pruebas de deflectometría realizadas.....	30
Tabla 10. Módulos retrocalculados - Tramo FW1a. Carril externo.....	34
Tabla 11. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1a.....	34
Tabla 12. Módulos retrocalculados - Tramo FW1b. Carril interno.....	35
Tabla 13. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1b.....	35
Tabla 14. Módulo promedio carriles sentido La Abundancia - Sifón.....	35
Tabla 15. Módulos retrocalculados - Tramo FW2a. Carril externo.....	36
Tabla 16. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW2a. Carril externo.....	36
Tabla 17. Módulos retrocalculados - Tramo FW2b. Carril interno.....	37
Tabla 18. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW2b.....	37
Tabla 19. Módulo promedio carriles sentido Sifón - La Abundancia.....	37
Tabla 20. Características de pavimento del proyecto Sifón - La Abundancia.....	39
Tabla 21. Módulo resiliente de cada capa y número estructural requerido según el ESAL de diseño.....	39
Tabla 22. Capacidad estructural real y requerida para cada carril.....	40
Tabla 23. Deformaciones unitarias de interés a diferentes profundidades de la estructura - FW1..	41
Tabla 24. Límites de falla del MAC según porcentajes de área agrietada.....	41
Tabla 25. Límites de falla para la deformación permanente.....	43
Tabla 26. Esfuerzos de interés para análisis de fatiga en BE - FW1.....	44
Tabla 27. Deformaciones unitarias de interés a diferentes profundidades de la estructura - FW2..	45
Tabla 28. Esfuerzos de interés para análisis de fatiga en BE - FW2.....	45
Tabla 29. Caracterización de las mezclas asfálticas analizadas.....	48
Tabla 30. Requisitos para mezcla asfáltica designación C, exclusivamente como capa asfáltica intermedia y capa de base.....	49
Tabla 31. Requisitos para mezcla asfáltica designación D, exclusivamente como capa asfáltica de rodadura.....	49
Tabla 32. Resultados del ensayo APA en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia.	50
Tabla 33. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 400 E-6 mm/mm.....	51
Tabla 34. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 600 E-6 mm/mm.....	52
Tabla 35. Extensión de los tramos de prueba de ficción realizadas en el proyecto.....	54



**INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA
"EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO (IRI, FWD, GRIP, APA Y
FATIGA) DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO.35
SECCIÓN: SIFON-LA ABUNDANCIA"
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.35 Sección: "Sifón-La Abundancia". 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, GRIP, APA y Fatiga) del proyecto.”**
- SEGUNDA PARTE: “Evaluación de los materiales de granulares, base estabilizada con cemento, la mezcla asfáltica y de la planta de producción de la Constructora Sánchez Carvajal.”
- TERCERA PARTE: “Evaluación de las prácticas y procesos constructivos de la vía e inspección estructural de los puentes del proyecto.”



3. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA AUDITORÍA TÉCNICA

El objetivo de esta auditoría técnica al proyecto Sifón-La Abundancia, es dar a conocer a la Administración, desde el punto de vista externo, aspectos relacionados con los parámetros de desempeño del proyecto, los cuales permiten determinar el estado funcional y estructural del proyecto a lo largo del tiempo. Para tales efectos, se evaluó el Índice de Regularidad Internacional (IRI) a manera de referencia ya que este no es un parámetro contractual. Se realizó un análisis de retrocálculo de módulos para determinar la capacidad estructural de la estructura del pavimento construida. Asimismo, se evaluó la mezcla asfáltica con y sin polímero para cuantificar su resistencia a la deformación permanente y al agrietamiento por fatiga. Adicionalmente, se evaluaron las condiciones de fricción para conocer el nivel de rozamiento del pavimento y sus implicaciones en la seguridad vial del proyecto.

El alcance del presente estudio se centró en la evaluación funcional y estructural de secciones de pavimento utilizando los parámetros de desempeño IRI (regularidad superficial), FWD (retrocálculo de módulos), GRIP (condición de fricción) y evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica utilizando el ensayo de APA (resistencia a la deformación permanente) y el ensayo de fatiga durante el periodo Enero a Agosto de 2015.

Objetivo General 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 de pavimento del proyecto sobre la Ruta Nacional N° 35, sección: Sifón-La Abundancia.

Objetivos Específicos del Informe de Auditoría Técnica

- Determinar la condición superficial del pavimento, mediante el uso del índice de regularidad superficial (IRI) en secciones del proyecto a nivel de la superficie de ruedo, y comparar los resultados obtenidos con el valor promedio de referencia utilizada en este caso, CR-2010 sección 401.16.
- 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 completa (a nivel de superficie de ruedo).
- Evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica en caliente por medio del ensayo de Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) para evaluar la resistencia a la deformación permanente y el ensayo de flexo-tracción de viga de cuatro puntos para determinar la resistencia a la fatiga.
- Determinar las condiciones de fricción en la carpeta asfáltica por medio de la medición del Grip Number (GRIP) en secciones del proyecto donde se encuentra la estructura de pavimento completa, con el fin de identificar los niveles de rozamiento y su relación con la seguridad vial.



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-014-2015 (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

Responsables por parte de la Administración:

- Entidad ejecutora del contrato: Unidad Ejecutora, CONAVI : Ing. Pablo Torres Morales, Director Unidad Ejecutora.
- Supervisión por parte de la Administración: De enero a octubre de 2015 el Laboratorio del MOPT ejerció la función de verificación de calidad y a partir de octubre el laboratorio de LGC Ingeniería de Pavimentos S.A. fue contratado por el I.C.E. para desempeñar esa labor.

Responsables por parte de la empresa constructora:

- Contratista: La empresa contratista es la empresa constructora Sanchez Carvajal.
- 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.

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, entrevistas, ensayos de laboratorio y de campo, análisis de la información y visitas técnicas al sitio.

7. ANTECEDENTES

Como antecedentes en el tema de estudios geotécnicos, previo a este informe se tiene el informe de Auditoría Técnica **LM-PI-AT-102-12** "Evaluación de los estudios geotécnicos preliminares", sobre este mismo proyecto Sifón-La Abundancia, que consistió en la primera parte del estudio enfocado en el área geotécnica y en el cual, específicamente se realizó una revisión inicial sobre la suficiencia de los estudios geotécnicos preliminares con los que contaba el proyecto, así como la aplicación de un estudio de zonificación geotécnica, que permite la identificación de tramos críticos susceptibles a deslizamientos.

A continuación se describe los procesos y comunicaciones que se mantuvieron con la Administración durante el desarrollo de este informe de auditoría técnica externa. En la Tabla 1 se resumen las principales comunicaciones y oficios durante el periodo de la auditoría técnica. En las Tablas 2 y 3 se complementa el proceso de recopilación de información.

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

Número de Oficio	Fecha	Asunto	Respuesta de la Administración
LM-AT-083-14	24/07/2014	Solicitud de: -Estimaciones de pago y reajustes. -OM-14 en adelante y OS. -Adenda N°3 -Control y Verificación de Calidad. -Especificaciones técnicas. Programa de trabajo.	-
LM-AT-107-14	6/10/2014	Solicitud de: -Diseño de BE -Diseño de MAC -Diseño de pavimento -Especificaciones materiales especiales -Programa de trabajo	GCVP-PSC-14-425
LM-AT-118-14	30/10/2014	Prácticas constructivas: -Colocación de imprimación. -Colocación de riego de liga.	-
LM-AT-121-14	04/11/2014	Resultado de cilindros de BE	-
LM-AT-127-14	02/12/2015	Solicitud de información: -Estudio de Tránsito del proyecto. -Diseño de mezcla. -Mezcla asfáltica producida. -Diseño estructural del pavimento	-
LM-AT-132-14	15/12/2014	Adherencia en núcleos extraídos	-
LM-AT-022-15	28/01/2015	Resultados de resistencia a la compresión de BE	*
LM-AT-023-15	28/01/2015	Resultados de IRI	*
LM-AT-024-15	28/01/2015	Solicitud de información: -Memorias de cálculo y planos de puentes. -Especificaciones y normativa puentes. -Estudios preliminares puentes. -Diseño estructural baranda tipo New Jersey. -Estimaciones de pago y reajustes -Informes de control y verificación de calidad.	*
LM-AT-028-15	02/02/2015	Acuerdos tomados el día de la reunión 28/01/2015 en San Ramón	*
LM-AT-071-15	03/06/2015	Solicitud certificados de calibración de la planta.	GCPV-PSC-28-15-342
LM-AT-077-15	21/05/2015	Cálculo de IRI	
LM-AT-078-15	21/05/2015	Aspectos constructivos y de buenas prácticas -Sobre la falta de supervisión en obra. -Sobre el riego de liga	*
LM-AT-082-15	02/06/2015	Resultados de despeño de la MAC	*
LM-AT-093-15	09/07/2015	Respuesta a la GCR N°09569	-
LM-AT-103-15	06/08/2015	Solicitud de información -Oficios relacionados con la Adenda N°6 y 7 -Descriptivas de las estimaciones de pago	*

- No se recibe respuesta por parte de la Administración.

* No se solicita respuesta de la Administración

El día 28 de enero de 2015, se llevo a cabo una reunión en la oficina de la Unidad Ejecutora del proyecto Sifón-La Abundancia, y se entregó a esta Auditoría Técnica parte de la información solicitada vía oficios. En la Tabla 2 se resume la información entregada y la pendiente de respuesta a esa fecha por parte de la Unidad Ejecutora.

Tabla 2. Resumen de información discutida en la reunión del 28/01/2015.

Información solicitada	Oficio de referencia	Estado
Memorias de cálculo y planos de los diseños estructurales de los puentes y pasos a desnivel del proyecto (última versión aprobada).	LM-AT-024-15 28/01/2015	- Se entregó en la reunión información de memoria de diseño y Láminas del puente sobre el río Espino. Adicionalmente se entregó láminas del puente San Cristóbal. Está pendiente la información del resto de puentes y pasos a desnivel.
Especificaciones técnicas y normativa de los puentes	LM-AT-024-15 28/01/2015	Se entregó en la reunión
Diseño estructural, nivel de contención, planos de instalación, resistencia del concreto y otras especificaciones técnicas sobre la barrera separadora rígida tipo "New Jersey".	LM-AT-024-15 28/01/2015	Pendiente al 28-01-2015
Estudios preliminares realizados para el diseño de los puentes	LM-AT-024-15 28/01/2015	Se entregó en la reunión información sobre estudios Geofísicos y Geológicos de los puentes. Y el análisis por parte de Vieto de un diagnóstico geotécnico del puente quebrada Laguna presentado por Geomeca Consultores Geomecánicos.
Estimaciones de pago y reajustes actualizados a la fecha	LM-AT-024-15 28/01/2015	Se acordó realizar visitas periódicas a la oficina de la Unidad Ejecutora en San Ramón para escanear dicha información.
Informes de control y verificación de calidad de los materiales.	LM-AT-024-15 28/01/2015	Se acordó realizar visitas periódicas para escanear dicha información.

Posteriormente, se realizó una reunión el día 09 de septiembre de 2015, donde al igual que en el caso anterior se entregó a esta Auditoría Técnica parte de la información solicitada vía oficios. A continuación se presenta una tabla resumen (Ver Tabla 3) con la información entregada:

Tabla 3. Resumen de la información solicitada durante la reunión del 09-09-2015

Información solicitada	Estado
Certificados de Calibración de la planta	Entregados
Control de Calidad	Entregados vía correo electrónico 10/09/2015 por el Ing. Gustavo Bolaños.
Estimaciones y reajustes de pago a partir de la 108	Se escanearon los documentos durante la reunión.
Diseño de la barrera separadora	Entregado vía correo electrónico
Sobre prácticas y procesos constructivos	Se discutió en la reunión sobre el sello de imprimación en la base estabilizada, el riego de liga entre la capa de base y mezcla asfáltica y sobre los valores de resistencia a la compresión de base estabilizada e IRI.
Cronograma de trabajo Fecha de finalización Porcentaje de avance de obra	Entregado vía correo electrónico

También es importante describir las mediciones realizadas en campo que se realizaron durante el periodo de la auditoría y son la base de los resultados que sustentan los hallazgos y observaciones del presente informe, a continuación se describe las mediciones realizadas por el LanammeUCR (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de las secciones y sentidos evaluados del proyecto.

Informe	Fecha	Secciones
I-0249-15	24/02/2015	Abundancia- Sifón (carril interno) 39+040 a 37+600
		Abundancia- Sifón (carril externo) 39+040 a 37+600
		Sifón Abundancia(carril externo)- 37+600 a 38+900
		Sifón Abundancia(carril interno)- 37+600 a 38+900
I-0795-15	26 y 27/05/2015	Sifón-Abundancia (externo e interno) 9+900 a 11+500
		Sifón-Abundancia (externo e interno) 9+900 a 11+500
		Sifón-Abundancia (externo e interno) 11+710 a 12+144
		Sifón-Abundancia (interno) 33+550 a 35+870
		Sifón-Abundancia (externo interno) 37+650 a 38+910
I-0795-15	26 y 27/05/2015	Abundancia- Sifón (externo, interno) 39+020 a 37+612
		Abundancia- Sifón (externo) 35+880 a 33+480
		Abundancia- Sifón (interno) 35+880 a 33+556
		Abundancia- Sifón (externo) 12+160 a 11+715
		Abundancia- Sifón (interno) 12+160 a 11+717
		Abundancia- Sifón (externo) 11+500 a 9+927
		Abundancia- Sifón (interno) 11+500 a 9+916
I-1239-15	28 y 29 agosto 2015	Sifón-Abundancia (externo, interno) 9+900 a 11+500
		Sifón-Abundancia (externo, interno) 11+710 a 12+160
		Sifón-Abundancia (externo, interno) 27+320 a 27+910
		Sifón-Abundancia (externo, interno) 31+780 a 33+080
		Sifón-Abundancia (externo, interno) 33+550 a 36+100
		Sifón-Abundancia (externo, interno) 37+650 a 39+140

8. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El contrato “Construcción de la Nueva Carretera a San Carlos, Sección Sifón-Ciudad Quesada - La Abundancia” inició su ejecución tal y como fue concebido originalmente desde que fuera refrendado por la Contraloría General de la República en junio de 2005 según lo indica el Addendum N°2 al contrato, firmado en abril de 2011. No obstante, desde el punto de vista político-administrativo, este proyecto ha experimentado diversos cambios como la ruptura de relaciones diplomáticas entre Costa Rica y la República de China en Taiwán (en junio de 2007) por lo que se dio la cesión del contrato a la empresa Constructora Sánchez Carvajal, así como cambios del personal responsable de la Unidad Ejecutora por parte del CONAVI.

El proyecto Sifón – Abundancia se ubica en los cantones de San Ramón y San Carlos, provincia de Alajuela, en la zona de paso intermontano entre la Gran Área Metropolitana (GAM) y la Zona Norte.

En la Figura 1 se observa que la ruta se ubica entre las rutas nacionales 141 (Naranjo – Zarcero – Ciudad Quesada) y 702 (San Ramón – Bajo Rodríguez), que actualmente son las principales vías de acceso al cantón de San Carlos.

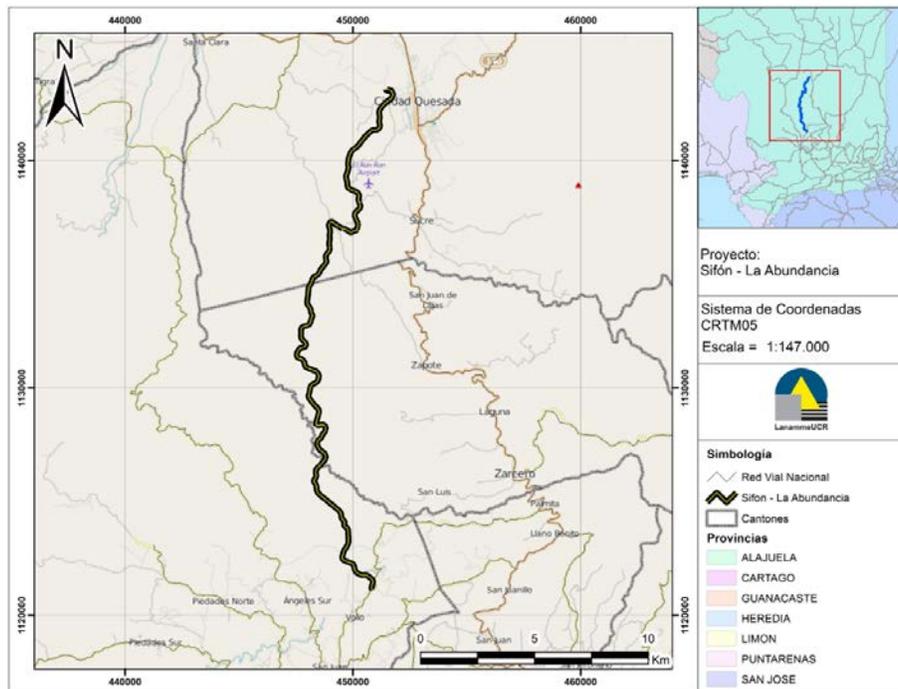


Figura 1. Localización del proyecto.

En la Cláusula 2 de la Adenda No 6, se modifica la ejecución de la estructura del pavimento aprobada en las Adenda No 2 y No 3 para que en adelante se utilice la siguiente modulación (ver Tabla 5). También en la Adenda 6 se incorporan el reglón de pago de Base Estabilizada con cemento portland tipo BE-25 y el polímero UP-70 para la mezcla asfáltica.

Tabla 5. Sección típica eje principal del proyecto

Estructura de pavimento	Espesor (cm)
Carpeta asfáltica donde 6,5 cm de la última capa llevará polímero UP-70	13
Base estabilizada con cemento portland BE-25	24
Subbase graduación D	30

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.

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/h, 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).

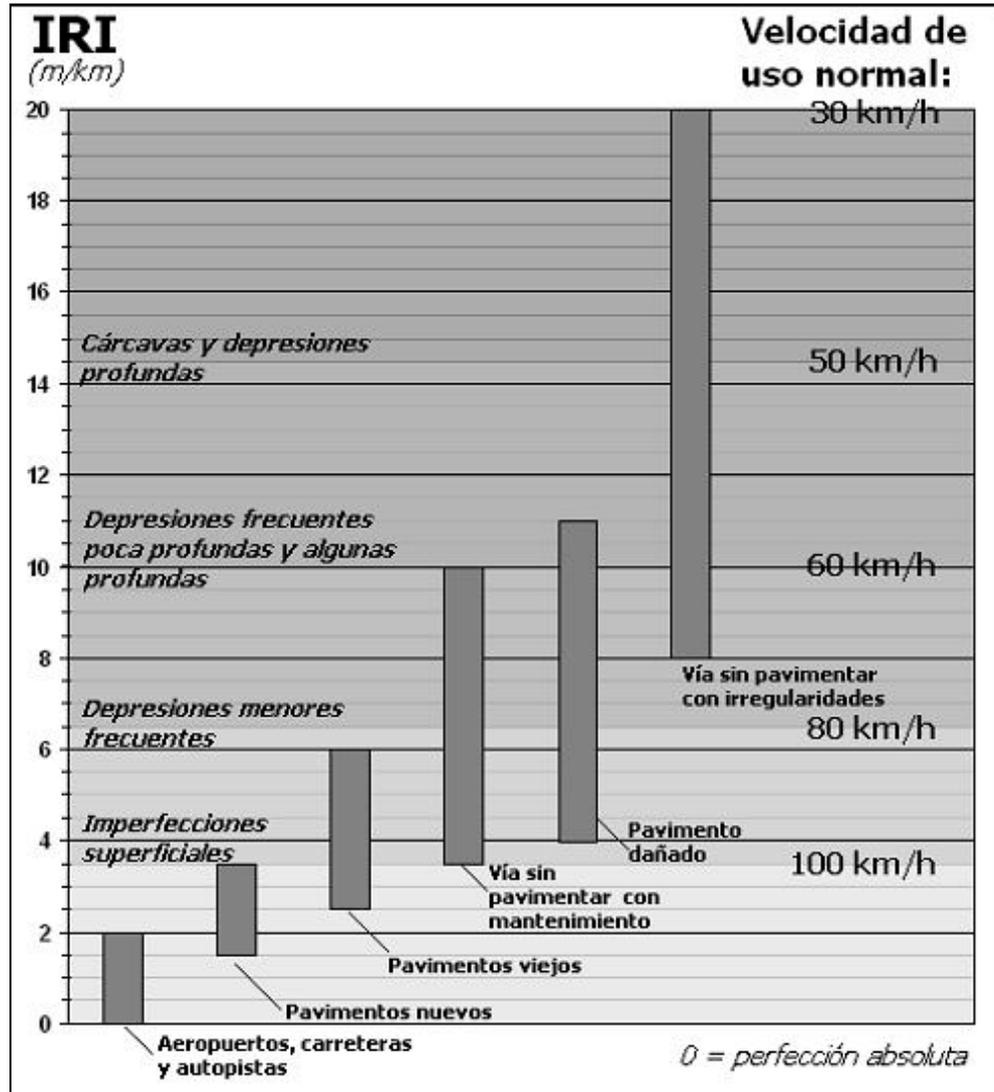


Figura 2. Escala estándar empleada por el Banco Mundial para la cuantificación del IRI para diferentes tipos de vías

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 6, algunas de las especificaciones de Índice de Regularidad Internacional empleadas en otros países, así como el intervalo de medición empleado en cada uno.

Tabla 6. 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	----	----														
	Vías Interurbana																	
	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 2.0 m/km	IRI ≤ 2.5 m/km	----														
Quebec, Canadá	IRI obtenido en tramos de 100 m	IRI ≤ 1.2 m/km, en el 70% de los datos IRI ≤ 1.4 m/km, en el 100% de los datos	----	----														
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	----	----														
	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	----	----														
Portugal	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.

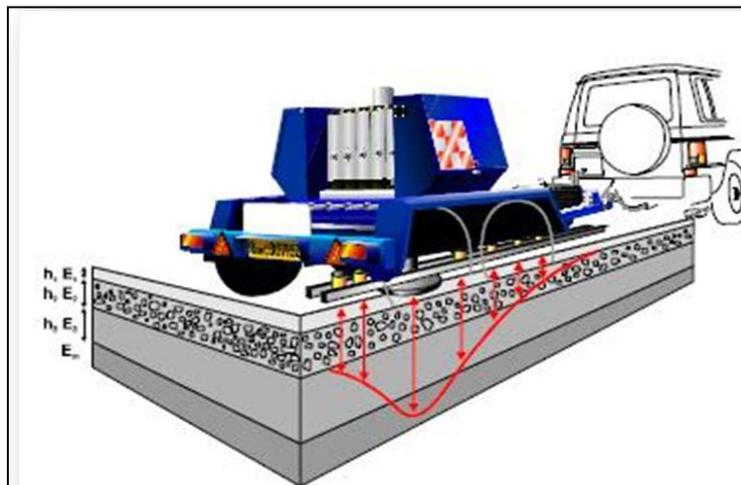


Figura 3. Cuenco de deflexiones producido por el equipo FWD



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% indica que los resultados son satisfactorios. 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 valor de 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 considerar dicha variabilidad, en este informe se reportarán los siguientes resultados:

- Módulo promedio (E Promedio)
- Desviación estándar
- Percentil 16 del módulo retrocalculado, el cual es el que es considerado como el módulo final característico de cada capa (EP_{16})

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

En este estudio, tal y como se indica anteriormente, el módulo resiliente reportado corresponde al percentil 16 (EP_{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 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 aumentando la distancia mínima 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 macrotectura o puede deberse también a contaminación provocada por los vehículos debido a derrames de aceite o grasa*".

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 7.

Tabla 7. Clasificación internacional del pavimento según el Grip Number.

GN	Condición	Nivel			Tipo de Pavimento característico
		Deslizamiento	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-014B-15.

Como parte de los procedimientos de auditoría técnica, mediante oficio LM-AT-150-15 del 03 de diciembre del 2015 se envía el informe preliminar LM-PI-AT-014B-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 14 de diciembre a las 9:00am en las instalaciones del LanammeUCR en donde se realizó la presentación del informe LM-PI-AT-014B-15 en su versión preliminar y en la que participaron los ingenieros Ing. Abraham Sanchez Castro, Ing. Gustavo Bolaños Leandro, el Ing. Pablo Torres Morales e Ing. Rafael Magaña Aguilar de parte del CONAVI. También se presentaron del ICE el Ing. Abel Rivera Hernandez y Rafael Ugalde Sanabria. 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.

Asimismo, a solicitud del auditado, el día 11 de enero del 2015 a las 9:00am se realiza en las instalaciones del LanammeUCR una reunión con miembros de la Unidad Ejecutora del proyecto de CONAVI, miembros de la supervisión a cargo de ICE, personal de la empresa constructora Sanchez Carvajal y el equipo auditor. En esta reunión se discuten punto a punto las observaciones del auditado y del contratista sobre el informe L-PI-AT-014B-15.

El día 19 de enero de 2015, se recibe el oficio GCVP-PSC-16-011-28 remitido por el director del proyecto, Ing. Pablo Torres, donde la dirección del proyecto y la empresa contratista, Sanchez Carvajal, remiten las observaciones generadas a partir de la presentación y entrega del informe LM-PI-AT-014B-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-014-15 en su versión final para ser enviado a las instituciones que indica la ley.



11. HALLAZGOS Y OBSERVACIONES DE LA AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA

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)

Con el propósito de contribuir al mejoramiento continuo de la gestión de la Administración, se realizó un análisis sobre el valor de Índice de Regularidad Superficial (IRI) medido por el Laboratorio LanammeUCR y calculado por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR, es de conocimiento de este equipo auditor que este proyecto se rige bajo el CR-77 y que no cuenta con especificación especial para regularidad superficial.

El objetivo específico de este análisis realizado por Auditoría Técnica es determinar el valor del índice de Regularidad Internacional de la superficie de ruedo del proyecto en cuestión, y comparar los resultados obtenidos con el valor promedio dado en la especificación del CR-2010 sección 401.16.

Los términos de referencia no establecen especificación de IRI para este proyecto. Sin embargo, debido a la importancia del IRI en el desempeño futuro del pavimento es que esta Auditoría Técnica ha realizado la evaluación de este parámetro. El IRI es internacionalmente un parámetro de primer orden en la aceptación (control de calidad) del pavimento nuevo y en la evaluación del pavimento en servicio.



Observación 1: El valor de IRI calculado en secciones del proyecto a nivel de la superficie de ruedo generalmente es mayor al valor promedio indicado por la especificación de referencia, CR-2010.

El análisis realizado por Auditoría Técnica tiene como objetivo determinar el valor del Índice de Regularidad Internacional Promedio (MRI) de la superficie de ruedo del proyecto en cuestión, y obtener un valor promedio por tramo analizado, utilizado como base las regulaciones establecidas en la normativa nacional CR-2010 apartado 401.16 del CR-2010.

"...Si se asume una distribución normal para la serie de valores de IRI, los percentiles que se muestran anteriormente permiten definir un valor promedio de 1,85 m/km y una desviación (σ) de 0,39 m/km, que será la máxima aceptable..."

Es importante mencionar que solamente se analizan los tramos que después de eliminar las singularidades son mayores a 1,0 km, unidad base establecida en la especificación del CR-2010.

En la siguiente tabla (ver Tabla 8) se presenta los tramos analizados, indicando el sentido y el carril analizado y el valor promedio del tramo. Tal y como se mencionó anteriormente la especificación utilizada como referencia, CR-2010, indica que este valor es igual o menor que 1,85 m/km con una desviación estándar de 0,39.

Tabla 8. Resumen de valores promedio de MRI para los tramos analizados

Tramo	Sentido	Carril	MRI promedio (m/km)	Desviación	Ubicación	
					Latitud	Longitud
1	Sifón-La Abundancia	Externo	1.8	0.23	10.32857	-84.446
					10.33755	-84.44161
2	Sifón-La Abundancia	Externo	3.3	1.72	10.14007	-84.44872
					10.14925	-84.45692
3	Sifón-La Abundancia	Externo	2.9	1.57	10.32864	-84.44598
					10.33749	-84.44153
4	Sifón-La Abundancia	Externo	3.4	1.71	10.14007	-84.44869
					10.14924	-84.45691
5	Sifón-La Abundancia	Externo	2.4	0.53	10.28584	-84.45502
					10.29594	-84.45411
6	Sifón-La Abundancia	Externo	2.3	0.51	10.2983	-84.45772
					10.31707	-84.45313
7	Sifón-La Abundancia	Externo	2.6	1.08	10.32887	-84.44593
					10.33839	-84.44324
8	Sifón-La Abundancia	Interno	1.7	0.16	10.32846	-84.44603
					10.33752	-84.44164
9	Sifón-La Abundancia	Interno	3.3	1.85	10.13998	-84.44879
					10.14922	-84.45692
10	Sifón-La Abundancia	Interno	2.0	0.54	10.29825	-84.45771
					10.31655	-84.45356
11	Sifón-La Abundancia	Interno	3.1	1.77	10.14018	-84.4487
					10.14924	-84.45699
12	Sifón-La Abundancia	Interno	1.9	0.19	10.28581	-84.45505
					10.29601	-84.45419
13	Sifón-La Abundancia	Interno	1.9	0.57	10.29814	-84.45757
					10.3182	-84.45226
14	Sifón-La Abundancia	Interno	1.8	0.26	10.32884	-84.44596
					10.3383	-84.44323
15	Abundancia-Sifón	Externo	2.4	0.47	10.33758	-84.44316
					10.32849	-84.44611
16	Abundancia-Sifón	Interno	2.3	0.44	10.3377	-84.44321
					10.32852	-84.44607

Nota: Para el análisis de los datos se eliminaron las singularidades (puentes, pasos a desnivel y secciones del proyecto no terminadas) y las áreas de influencia de 40m.

En general se puede observar en la Tabla 8, que 11 de los 16 tramos analizados no cumplen con el valor promedio mencionado en la especificación de referencia. A continuación se presentan las Figuras 4 a la 6, donde se representa por tramo, carril y sentido el valor de MRI promedio.

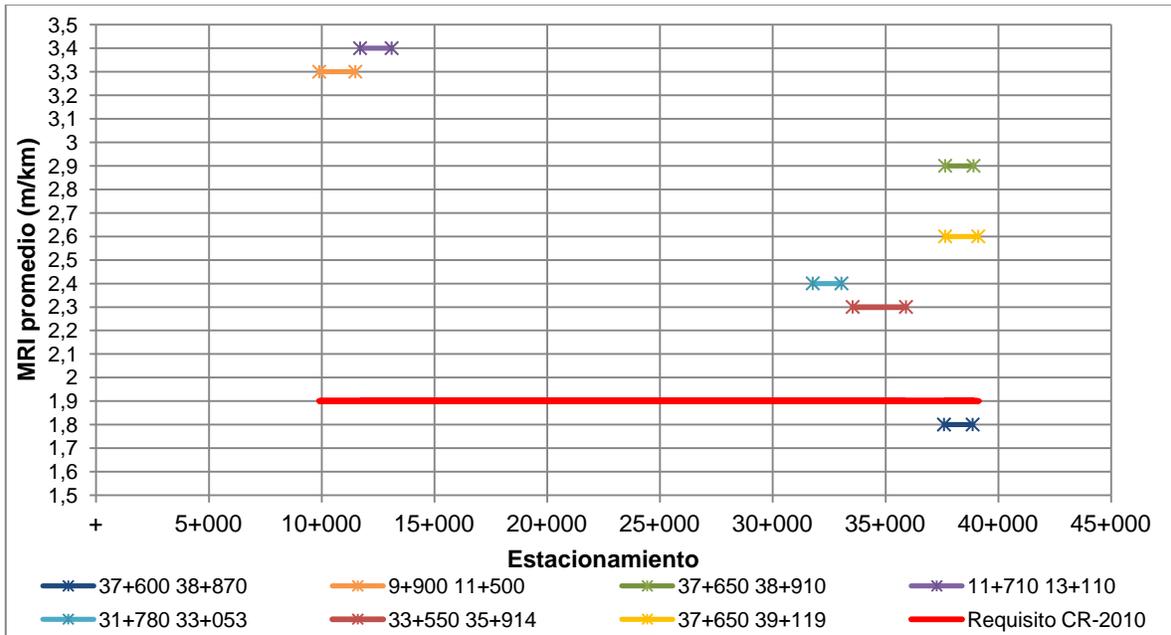


Figura 4. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: Sifón-La Abundancia, carril externo

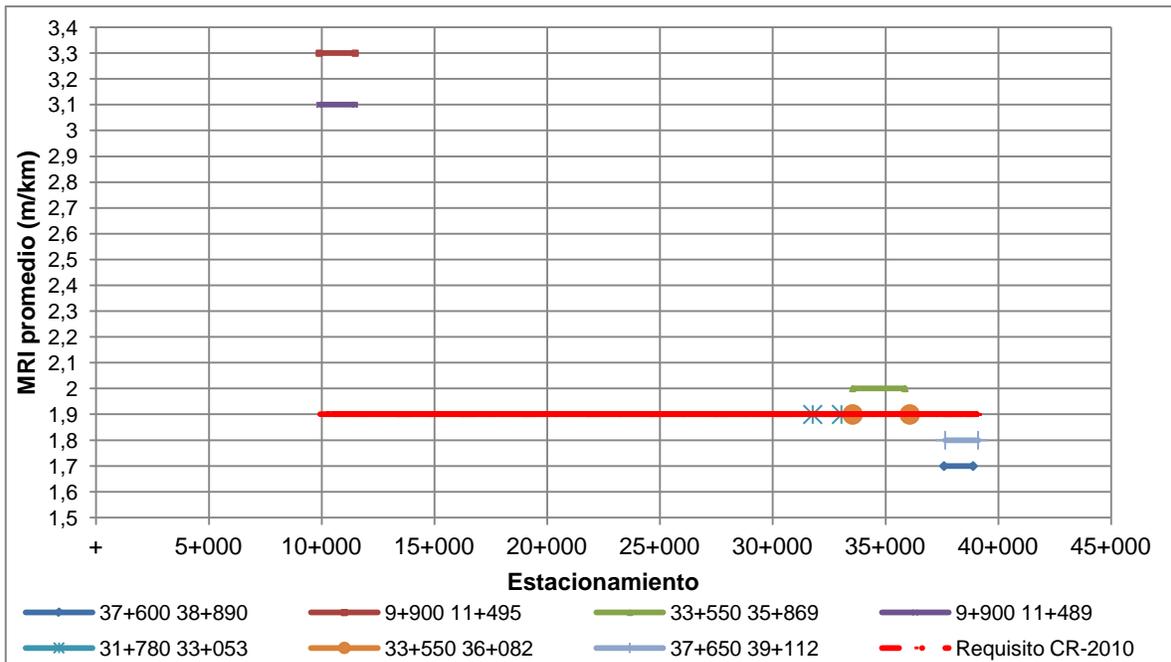


Figura 5. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: Sifón-La Abundancia, carril interno.

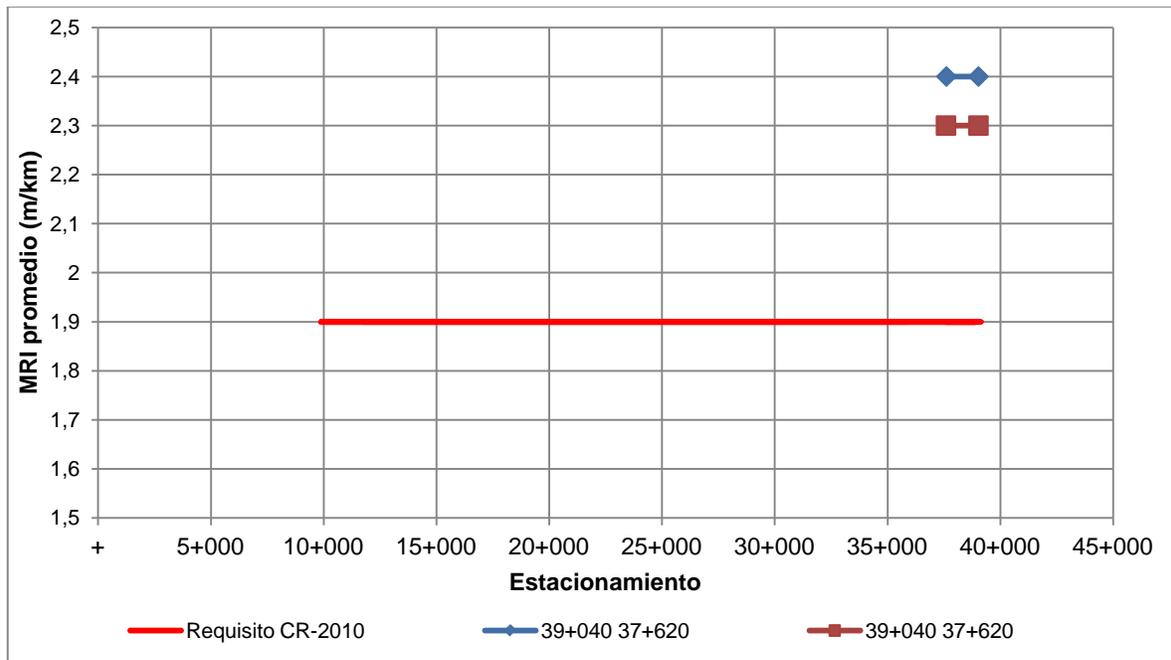


Figura 6. Valor de MRI promedio para los tramos analizados en el sentido: La Abundancia- Sifón, ambos carriles. (azul: externo y rojo: interno)

Tal y como se puede observar en la Figura 4, los valores de IRI promedio obtenidos para el sentido Sifón-La Abundancia, carril externo, son bastante variables por sección, van desde 1,8m/km hasta 3,4m/km. En los estacionamientos del 9+000 al 13+000 aproximadamente es donde se presentan los valores más altos. Cuatro de los siete tramos analizados se encuentran entre 2,3m/km a 2,9m/km.

En el caso de la Figura 5, donde se muestran las secciones analizadas en el sentido Sifón-La Abundancia, carril interno, se tiene un comportamiento similar en los primeros estacionamientos se obtienen valores mayores de 3,0m/km, mientras que en los estacionamientos analizados a partir del estacionamiento 31+000 presentan valores de regularidad cercanos al límite entre 1,6m/km a 2,0m/km.

En la caso de el sentido Abundancia-Sifón (Figura 6), los valores para el carril externo e interno son muy similares entre 2,3 y 2,4m/km.

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. 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. Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, pueden reflejarse no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación.

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 Sifón – La Abundancia, para lo cual se realizaron pruebas de deflectometría de impacto (FWD), las cuales establecen las deflexiones teóricas de referencia en cada tramo analizado. Estas pruebas fueron efectuadas en el mes de Febrero de 2015.

Se analizaron un total de 3 tramos, denominados 1, 2 y 3 los cuales a su vez se subdividieron en segmentos “a” y “b” para facilitar la lectura del sentido de la medición. En la Tabla 9 y Figura 4 se muestra la ubicación de las pruebas de FWD realizadas.

Tabla 9. Cantidad y extensión de pruebas de deflectometría realizadas

<i>Archivo</i>	<i>Sentido</i>	<i>Carril</i>	<i>Estación inicial</i>	<i>Estación final</i>	<i>Total (km)</i>
FW1	a	La Abundancia - Sifón Externo	37.600	38.920	1,32
	b	La Abundancia - Sifón Interno	38.920	37.600	1,32
FW2	a	Sifón - La Abundancia Externo	37.600	39.040	1,44
	b	Sifón - La Abundancia Interno	39.040	37.600	1,44
FW3*	a	La Abundancia - Sifón Externo	35.710	35.980	0,27
	b	Sifón - La Abundancia Interno	35.980	35.710	0,27

* Datos descartados del análisis de FWD.

Tal y como se observa en la Tabla 9, las mediciones tomadas entre los estacionamientos 35+710 y 35+980 abarcan un tramo muy corto (270 metros), lo cual hace que no se cuente con suficiente información para generar una confiabilidad aceptable de los resultados para el objetivo que plantea este informe. Es importante indicar que dicha situación se confirma mediante el análisis de los datos, razón por la que se descarta su utilización dentro de este análisis. En resumen, solamente se analizan los datos denominados FW1 y FW2 en sus sentidos "a" y "b".

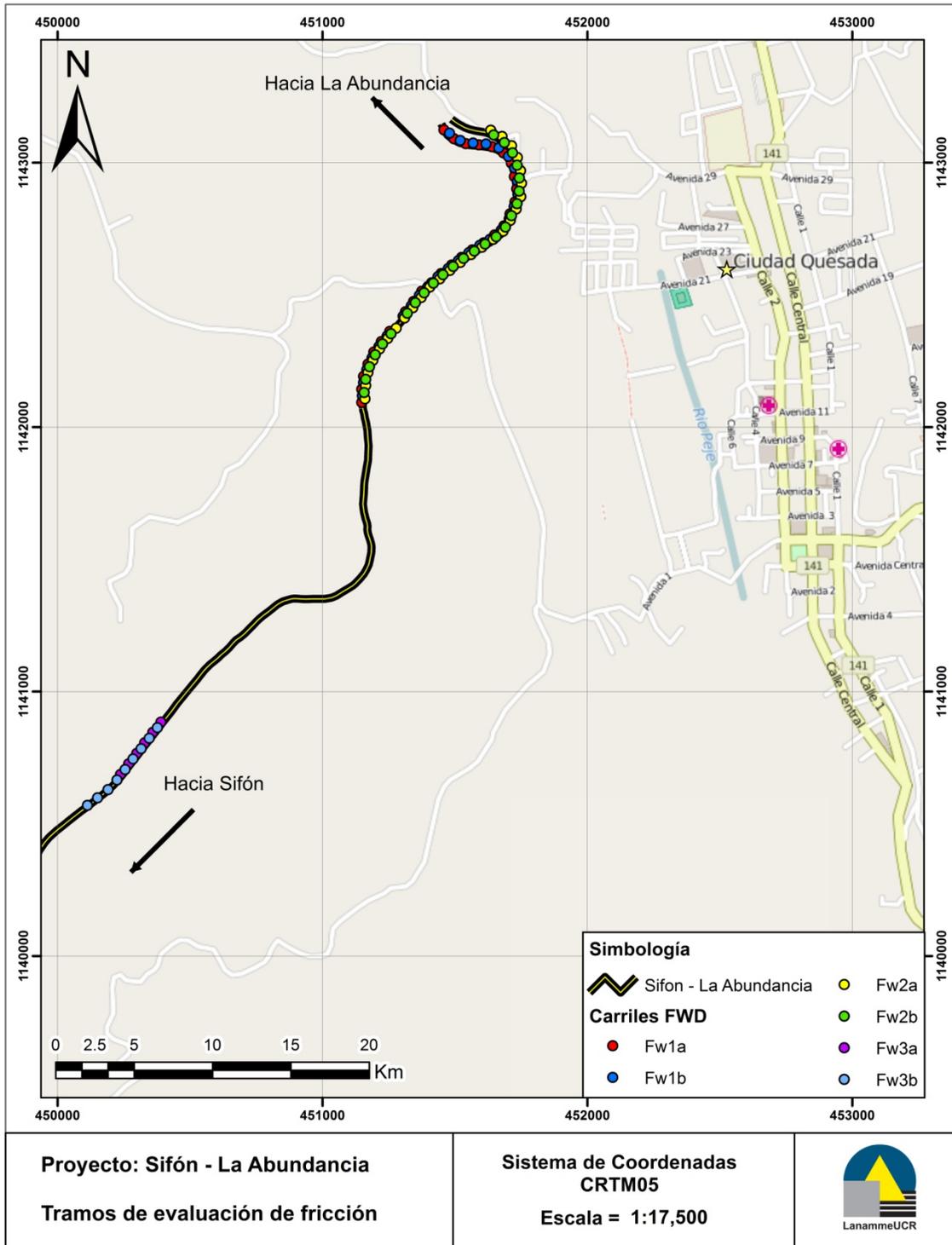


Figura 7. Ubicación de pruebas de Deflectometría

Todas las pruebas fueron realizadas sobre sectores del proyecto en los cuales fue colocada la estructura definitiva. En principio y según el diseño aprobado, la estructura está compuesta por un total de 5 capas: una primer capa de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), seguida por Base Estabilizada (BE-25), Subbase Granular (SBG), préstamo (P) y por último material de Subrasante (SR). En la Figura 8 se muestran los espesores y los módulos considerados para la estructura de pavimento propuesta para el proyecto. Es importante aclarar que el diseño aprobado no incorporó los criterios mecánico - empíricos recomendados en el informe LM-IP-GM-IMF-22-2014, los cuales actualmente se están valorando para ser aplicados a nivel nacional.

El objetivo del análisis es determinar el módulo resiliente de las capas que componen la estructura del proyecto mediante el análisis de retrocálculo de módulos. Se utiliza el programa ELMOD 6.0© para efectuar el análisis indicado. Para efectos del modelado de la estructura en el software indicado se introduce el concepto de módulo de capa. Dicho concepto se refiere al módulo de un material producto de estudios de campo llevados a cabo con el deflectómetro de impacto (FWD), por lo cual determina de una mejor manera el comportamiento *in situ* de los materiales que componen la estructura de pavimento.

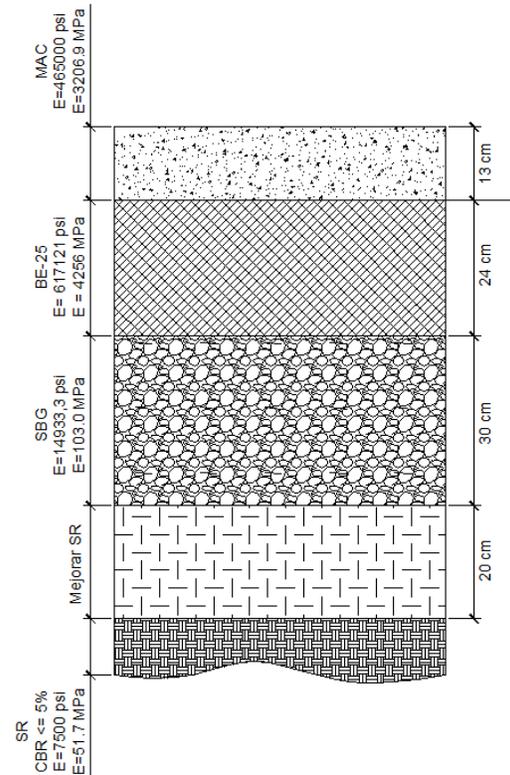


Figura 8. Estructura de pavimento proyecto Sifón - La Abundancia

Fuente: Consorcio Vieto, Fonvar, Topytur, Lauher

Para simplificar el modelo en el programa 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 a su vez disminuye la incertidumbre de los resultados obtenidos.

El programa solamente permite modelar un total de 5 capas, lo cual en muchas ocasiones es una limitación. A pesar de esto, tal y como se muestra en la Figura 8, la estructura analizada cuenta con un máximo de 5 capas, lo cual en este caso no genera problemas con el programa. Sin embargo, modelar dicha estructura genera una mayor incertidumbre en los resultados conseguidos a través del análisis de retrocálculo. Por tanto, en el presente estudio se decide integrar las capas de Préstamo y SBG en una sola capa que en adelante se denominará capa de "Soporte".

Es importante indicar que los resultados finalmente obtenidos en 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 se obtuvo un RMS menor o igual a 5.

A nivel general, en todos los análisis efectuados para el proyecto se observa que el material de la subrasante presenta un comportamiento lineal por lo que se descarta que los resultados puedan estar influenciados por el efecto de rigidez aparente del material de SR. La no linealidad causa que los materiales granulares colocados por encima de la SR se vean afectados por el efecto de compensación del módulo, efecto que tiende a manifestarse mediante la disminución del módulo de los materiales granulares que se colocan encima de la SR.

Una vez explicados los supuestos y las consideraciones realizadas en la modelación de la estructura se procede a presentar a continuación el apartado donde se muestran los resultados de módulo obtenidos para el tramo en analizado.

Observación 2: Los materiales colocados entre los estacionamientos 37+600 y 39+040 presentan mejores características mecánicas que las supuestas en el diseño estructural.

Para el análisis del retrocálculo de módulos se realizaron pruebas de deflectometría de impacto (FWD) el día martes 24 de febrero de 2015, entre las estaciones 39+040 y 37+600 a lo largo de los cuatro carriles que componen la superficie de ruedo del proyecto. Es importante recalcar que en estas estaciones ya se encuentra finalizada la colocación de toda la estructura de pavimento del proyecto.

Tal y como se indicó anteriormente, con el fin de simplificar el modelo, se unificaron los espesores de material de mejora (préstamo) y subbase conformando una sola capa denominada como "Soporte" cuyo espesor total es de 50 cm. Dicha simplificación permite que los resultados conseguidos sean satisfactorios al obtener módulos aceptables y contar con valores de RMS que se encuentran por debajo del límite máximo sugerido ($RMS \leq 5\%$).

RESULTADOS DE RETROCÁLCULO DE MÓDULOS

Se presentan a continuación los módulos de rigidez obtenidos del análisis de retrocálculo en las estaciones que fueron indicadas en la Tabla 9. A manera de resumen, la metodología de retrocálculo de módulos busca determinar los módulos *in situ* de las capas de una determinada estructura a través de las deflexiones registradas por medio del ensayo de deflectometría de impacto. El procedimiento detallado se explica en el marco conceptual de este informe.

Los módulos obtenidos se referencian a una temperatura promedio de 25 °C, con lo cual se busca homologar las condiciones de temperatura asumidas para los módulos de capa durante la etapa de diseño. A su vez, para conocer el comportamiento de las propiedades mecánicas de la MAC, el módulo de dicha capa se especifica a una frecuencia de 5,45 Hz, la cual simula el paso de un vehículo a una velocidad de 60 km/hr.

SECCIÓN FW1: Sentido La Abundancia - Sifón

Para el caso de llamado tramo FW1a correspondiente al carril externo del sentido La Abundancia - Sifón, la Tabla 10 presenta los resultados obtenidos para cada capa, mientras que la información de la Tabla 11 presenta los módulos de rigidez asumidos en el diseño y el porcentaje de diferencia (Δ) que existe entre las propiedades mecánicas obtenidas y las supuestas en el diseño.

Tabla 10. Módulos retrocalculados - Tramo FW1a. Carril externo

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC*	710.428	895.449	1,260
BE	697.241	1.042.530	1,495
Soporte	93.253	140.991	1,512
SR	22.497	31.253	1,389

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ Hz

Tabla 11. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1a.

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC*	465,000	710,428	-53%
BE	617,120	697,241	-13%
SBG / Soporte	14,933	93,253	-524%
SR	7,500	22,497	-200%

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ Hz

De las tablas anteriores se concluye que en promedio las propiedades mecánicas de las capas del carril externo en el sentido La Abundancia - Sifón resultan significativamente mejores a las esperadas. Situación que es evidente al observar los porcentajes de diferencia obtenidos respecto a los módulos de diseño. En este caso específico se observa que el valor que más se acerca a las condiciones supuestas, corresponde al material de base estabilizada con cemento (13%), mientras que por otro lado los módulos de las capas granulares son los que presentan las diferencias más importantes, 524% y 200% para la capa de soporte y la .subrasante, respectivamente.

En el caso del carril denominado FW1b, que corresponde al carril interno de la vía con sentido La Abundancia - Sifón, los resultados obtenidos se presentan en las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 12. Módulos retrocalculados - Tramo FW1b. Carril interno

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC*	499.132	652.892	1,308
BE	582.261	978.041	1,680
Soporte	88.646	143.281	1,616
SR	24.494	32.858	1,341

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ Hz

Tabla 13. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1b

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC*	465.000	499.132	-7%
BE	617.120	582.261	6%
SBG / Soporte	14.933	88.646	-494%
SR	7.500	24.494	-227%

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ Hz

Según se nota en los resultados de la Tabla 12, los módulos de las capas del pavimento presentan magnitudes más bajas respecto a los del carril externo. Dicha diferencia puede explicarse debido a diferencias entre las propiedades de los materiales empleados, procesos constructivos o inclusive a ciertas condiciones de temperatura que pueden afectar la magnitud de las deflexiones percibidas por el FWD, lo cual consecuentemente afectará al módulo de la capa de MAC.

A pesar de contar con estas diferencias entre carriles, se observa que los valores obtenidos son mayores a los módulos supuestos para el diseño. Con lo cual se indica que desde el punto de vista de rigidez, los materiales colocados cumplen satisfactoriamente con lo esperado.

En el cuadro siguiente se muestra el módulo promedio que caracteriza las propiedades mecánicas de los materiales colocados en la vía con sentido La Abundancia - Sifón.

Tabla 14. Módulo promedio carriles sentido La Abundancia - Sifón

Material	$E_{Promedio}$ (psi)
MAC *	604,780
BE	639,751
Soporte	90,950
SR	23,496

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ HZ

SECCIÓN FW2: Sentido Sifón - La Abundancia

El tramo FW2 permite la circulación vehicular en sentido Sur - Norte, es decir comunica al sector de Sifón con el sector de La Abundancia en San Carlos. En estos carriles se efectuaron pruebas de deflectometría para registrar las deflexiones a lo largo de las estaciones indicadas que permiten estimar los módulos *in situ* de los materiales colocados en la estructura.

En el caso del carril externo, los resultados que se muestran en la Tabla 15 presentan los módulos de rigidez de las capas que componen la estructura, mientras que la Tabla 16 muestra la comparación entre los valores obtenidos y los valores durante la etapa de diseño.

Tabla 15. Módulos retrocalculados - Tramo FW2a. Carril externo

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC *	540.158	701.207	1,298
BE	710.975	1.083.611	1,524
Soporte	67.504	130.575	1,934
SR	23.036	30.358	1,318

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ HZ

Tabla 16. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW2a. Carril externo

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC *	465.000	540.158	-16%
BE	617.120	582.261	6%
SBG	14.933	88.646	-494%
SR	7.500	24.494	-227%

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45$ HZ

Los resultados de las tablas anteriores permiten concluir que las propiedades mecánicas de los materiales que componen las capas del carril externo del tramo FW2, superan en un orden de magnitud considerable a los módulos de rigidez inicialmente supuestos para el diseño del pavimento. Esto quiere decir que las propiedades mecánicas de los materiales utilizados cumplen satisfactoriamente con lo esperado.

Las Tablas 17 y 18 presentan los valores de módulos retrocalculados para el carril interno de la vía con sentido Sifón - La Abundancia, así como las diferencias obtenidas respecto a los módulos utilizados para el diseño de la estructura.

Tabla 17. Módulos retrocalculados - Tramo FW2b. Carril interno

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC *	393.411	528.097	1,342
BE	731.615	1.078.048	1,474
Soporte	67.227	111.299	1,656
SR	23.291	32.297	1,387

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Tabla 18. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW2b

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC *	465,000	393,411	15%
BE	617,120	731,615	-19%
SBG	14,933	67,227	-350%
SR	7,500	23,291	-211%

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Tal como se muestra en los resultados anteriores se observa el cumplimiento en lo que respecta a materiales granulares y la BE-25, sin embargo se nota que el valor del módulo la MAC se encuentra por debajo del módulo supuesto en la etapa de diseño. Por lo cual se llama la atención sobre el desempeño que vaya a tener este carril en cuanto a la fatiga y deformación permanente durante su vida útil. Este incumplimiento o baja en el módulo de sitio puede representar en el futuro problemas de formación de ahuellamientos por encima de lo recomendado, así como también la aparición prematura de grietas, debido a la disminución de la resistencia de la capa de material viscoelástico.

La Tabla 19 muestra el valor promedio que caracteriza las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura del carril con sentido Sifón - La Abundancia. Lo anterior considerando los resultados de las Tablas 15 y 17, mostradas anteriormente.

Tabla 19. Módulo promedio carriles sentido Sifón - La Abundancia

Material	$E_{Promedio}$ (psi)
MAC *	466.785
BE	656.938
Soporte	77.937
SR	23.892

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Finalmente, la Figura 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos luego de realizar el análisis de retrocálculo para los tramos estudiados.

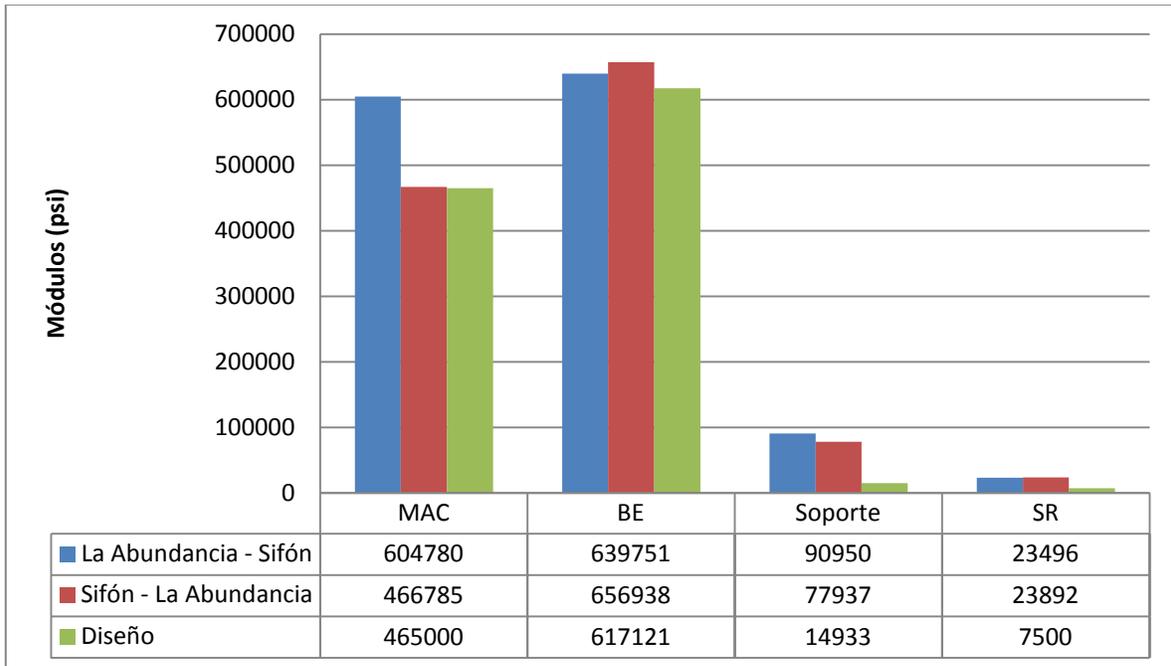


Figura 9. Resumen de resultados - Análisis de retrocálculo

La figura anterior permite realizar una comparación directa entre las propiedades mecánicas de los materiales que conforman el pavimento de los ambos carriles. Comparativamente todos los materiales de la subestructura presentan valores similares entre sí, sin embargo al observar los resultados obtenidos para la capa de MAC se nota una diferencia importante entre el módulo de la capa de rueda del carril La Abundancia - Sifón y el módulo la MAC del carril con sentido Sifón - La Abundancia.

Se recuerda que en el siguiente apartado se evalúa el desempeño estructural de ambos carriles considerando los módulos obtenidos, ya que solamente con observar los datos de la Figura 6 es difícil realizar conclusiones apresuradas sobre el posible comportamiento de la estructura. Sin embargo, es importante aclarar que el módulo de rigidez condiciona directamente el desempeño tanto funcional como estructural de la vía por lo que no siempre tener módulos muy por encima de los valores normales es algo beneficioso el desempeño, lo mismo sucede si se tienen módulos muy bajos en comparación de los valores considerados como estándar. Variables externas como los gradientes de temperatura y la acción combinada de las cargas de tránsito hacen que el diagnóstico del desempeño requiera de un análisis más detallado, el cual se muestra en el siguiente apartado.

11.3. SOBRE EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DEL PROYECTO

Este apartado tiene como objetivo presentar los resultados y el análisis respectivo sobre la revisión y evaluación del cumplimiento del diseño y desempeño del pavimento del proyecto Sifón - La Abundancia.

Se presentará el análisis de capacidad estructural, siguiendo la metodología de diseño de la Guía de Diseño AASHTO (AASHTO, 1993) y desempeño del pavimento, enfocándose en el comportamiento a la fatiga y deformación permanente siguiendo la metodología y criterios expuestos en la Guía de Diseño Mecánico - Empírica de Diseño de Pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG) (2004). Lo anterior se realiza contemplando las variables de tránsito promedio diario anual (TPDA), espesores y los módulos de resiliencia de los materiales colocados.

El diseño modelado consta de una capa de Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC), una de Base Estabilizada con Cemento (BE) y capa de "Soporte". A continuación se presenta un resumen de las características físicas y mecánicas de la estructura estudiada.

Tabla 20. Características de pavimento del proyecto Sifón - La Abundancia

Capa	Espesor (cm)	FW 1 Módulo (psi)**	FW 2 Módulo (psi)**
MAC *	13	604.780	466.785
BE	24	639.751	721.036
Soporte	50	90.950	77.937
SR	-	23.496	23.164

* T= 25°C, f = 5.45 Hz

** Valores obtenidos del retrocálculo de módulos

Observación 3: El número estructural real (SN_{REAL}) es mayor al número estructural requerido ($SN_{REQUERIDO}$)

Con el objetivo de evaluar el desempeño de la estructura de pavimento, se realiza una comparación que permite determinar las diferencias de capacidad estructural del pavimento colocado en sitio respecto a las condiciones supuestas en la etapa de diseño. Para ello se consideran las propiedades mecánicas encontradas a partir del análisis de deflectometría. En la Tabla 21 se presentan los valores de número estructural (SN) requeridos según las propiedades indicadas.

Tabla 21. Módulo resiliente de cada capa y número estructural requerido según el ESAL de diseño

Capa	E (psi) Abundancia - Sifón	$SN_{REQUERIDO}$ Abundancia - Sifón	E (psi) Sifón - Abundancia	$SN_{REQUERIDO}$ Sifón - Abundancia
MAC *	604.780	0,89	466.785	0,84
BE	639.751	2,11	721.295	2,24
Soporte	90.950	3,55	77.937	3,57
Subrasante	23.496	-	23.164	-

* T_{aire}= 25°C, f = 5,45 Hz

Al considerar los módulos mostrados en la Tabla 21 y los espesores colocados en el proyecto se obtiene que el SN real de la estructura presenta una magnitud mayor a la requerida. Los valores se muestran a continuación.

Tabla 22. Capacidad estructural real y requerida para cada carril

Carril	SN_{REQUERIDO}*	SN_{REAL}	%
FW1	3,55	9,20	259%
FW2	3,52	8,96	254%

* Obtenido del Diseño Estructural

Para afirmar que la estructura cumple para las condiciones de diseño supuestas basta comparar el SN requerido contra el SN real, en donde se observa que la capacidad de la estructura colocada es en promedio 250% mayor a la capacidad requerida para el proyecto.

Observación 4: En condiciones críticas, la estructura de pavimento presentará fallas por fatiga a edades avanzadas de la vida de servicio del proyecto, mientras que la deformación permanente no excederá el límite máximo permitido.

Respecto al desempeño de la estructura ante daños como la fatiga o la deformación permanente acumulada a lo largo de la vida útil de la estructura, el análisis de desempeño del pavimento considera los modelos desarrollados en la MEPDG para fatiga así como deformación permanente.

Como se ha especificado, se presenta el análisis respectivo separado por sentido de circulación. Por lo tanto, se presentan de forma individual los análisis de los tramos FW1 y FW2. Asimismo, es importante aclarar que el análisis se realiza para una temperatura promedio del aire de 34 °C, la cual es la temperatura más representativa del proyecto y en donde se presentan las condiciones críticas.

Desempeño Sentido La Abundancia - Sifón (FW1)

Se presenta a continuación el análisis de desempeño del sentido FW1 ante los fenómenos de fatiga y deformación permanente. Respecto a la fatiga se analiza la probabilidad de falla de la carpeta asfáltica por grietas cuya formación se da de abajo hacia arriba (Bottom-Up) así como también en el sentido inverso (Top-Down). Debido a las condiciones de la estructura del pavimento se espera que el desempeño del mismo ante la deformación permanente sea de baja criticidad debido a la presencia de una capa de base estabilizada con cemento (BE). El análisis respectivo se presenta más adelante.

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 respuestas.

Tabla 23. Deformaciones unitarias de interés a diferentes profundidades de la estructura - FW1

Punto	Coord- X	Coord- Y	Coord-Z	Deformación Normal X-X	Deformación Normal Y-Y	Deformación Normal Z-Z
No	(in)	(in)	(in)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)
1	5.352	5.352	2.559	-0.19081E+02	-0.19642E+02	0.26142E+03
2	5.352	5.352	5.118	0.28898E+01	0.27514E+01	0.17514E+03
3	5.352	5.352	9.843	-0.17558E+02	-0.17601E+02	0.43731E+02
4	5.352	5.352	14.567	-0.49971E+02	-0.50022E+02	0.26410E+02
5	5.352	5.352	24.409	-0.27553E+02	-0.27561E+02	0.68669E+02
6	5.352	5.352	34.252	-0.26355E+02	-0.26359E+02	0.66773E+02
7	5.352	5.352	34.253	-0.26354E+02	-0.26358E+02	0.66770E+02
8	5.352	5.352	40.253	-0.21189E+02	-0.21191E+02	0.53691E+02

A continuación se especifica la ubicación de los puntos de evaluación 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 ultima de la capa de Soporte
7. Punto a la profundidad Z= 0 in de la SR
8. Punto a la profundidad Z= 6 in de la SR

Para el análisis de desempeño a la fatiga de la MAC interesa conocer la deformación unitaria a tensión en la fibra última (Bottom-Up) y en la parte superficial (Top-Down) de la capa de MAC. Se debe recordar que para el agrietamiento tipo abajo hacia arriba se aplica una carga de una llanta simple mientras que para conocer la máxima deformación superficial a tensión se debe aplicar la carga de una llanta tipo dual. El deformación unitaria de interés resultante para este caso es de 3.618E+01 micrones.

El modelo de fatiga de la guía MEPDG (2004) busca predecir el porcentaje de área agrietada del total del proyecto suponiendo que las características mecánicas de este se mantienen homogéneas a lo largo del mismo. Cuando el porcentaje de área agrietada supera cierto valor, se considera que el pavimento falla por este criterio. Para el agrietamiento de la MAC la guía establece los porcentajes máximos aceptables antes de la falla, los cuales se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 24. Limites de falla del MAC según porcentajes de área agrietada

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

Fuente: LM-PI-GM-INF-22-14

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

Al aplicar la metodología de la guía MEPDG se obtienen los siguientes resultados en donde se muestra la evolución de la fatiga de la superficie de MAC del pavimento del proyecto.

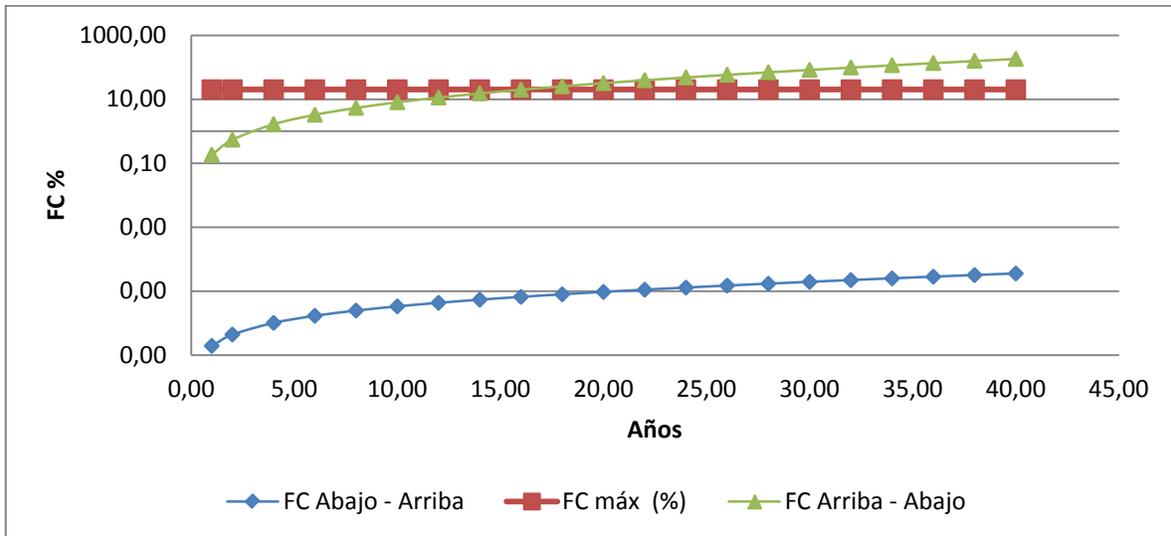


Figura 10. Evolución del porcentaje de área agrietada MAC -FW1

Es importante aclarar que el eje de las ordenadas se muestra en escala logarítmica debido a que los porcentajes de fatiga obtenidos para el agrietamiento de abajo hacia arriba son menores al 1%, incluso para un análisis que alcanza los 40 años.

Por otro lado, se observa que el desempeño de la vía se encuentra condicionado por el fenómeno de agrietamiento longitudinal (de arriba hacia abajo), ya que el 20% de área agrietada se alcanza a los 16 años. Por tanto, según el modelo aplicado, se estima que la capa de mezcla asfáltica falle por fatiga antes de que finalice su vida útil esperada, que corresponde a 20 años.

Para realizar el análisis de deformación permanente del pavimento, se recurre también a la metodología del MEPDG (2004). Dicho modelo permite estimar la deformación permanente acumulada en cada capa de la estructura de pavimento.

Según indica la guía, existen deferentes límites permitidos para el ahuellamiento según sea la cantidad de carga o ESAL esperado durante el periodo de diseño. En la Tabla 25 se especifica la información de los umbrales sugeridos para este deterioro.

Tabla 25. Límites de falla para la deformación permanente

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

Fuente: LM-PI-GM-INF-22-14

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 del pavimento, por medio de ecuaciones que varían según el tipo de material examinado; es decir que las ecuaciones para los materiales bituminosos difieren de las de los materiales granulares y suelos. Estos modelos dependen de la deformación unitaria vertical promedio, la cual corresponde a 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 cada resultado para finalmente 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 presentaron previamente en la Tabla 23.

El detalle de la metodología utilizada se muestra en la publicación especial LM-PI-GM-INF-22-2014, y al ser aplicada en este estudio se generan los resultados que se muestran en la Figura 11.

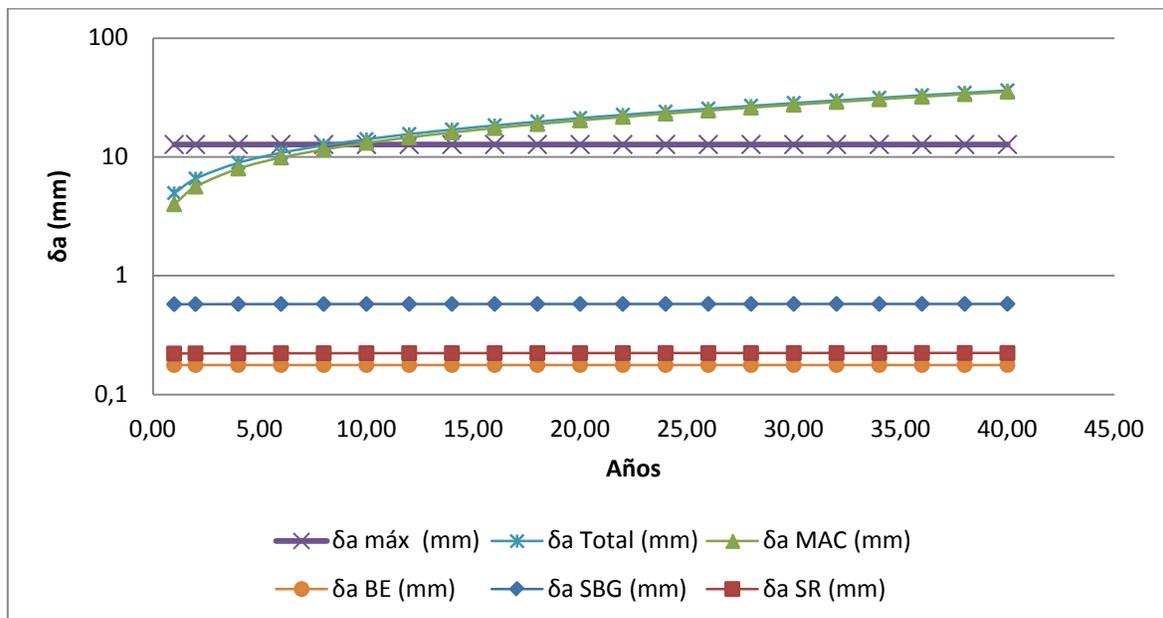


Figura 11. Evolución del desempeño por deformación permanente - FW1

Los resultados del modelo mostrados en la figura anterior indican que las capas de BE, materiales granulares y suelos, experimentan deformaciones inferiores a 0,18 mm, valores que no comprometen el desempeño general de la estructura. Sin embargo, el comportamiento de la MAC es otro. El modelo estima que esta capa experimentará deformaciones por encima del límite sugerido por la metodología (12,7 mm) antes de finalizar el periodo de vida útil esperado. Según las el modelo de predicciones utilizado, bajo condiciones críticas, esta capa presentará fallas al cumplir 8 años de servicio, situación sobre la cual se debe llamar la atención.

A pesar de los resultados obtenidos, se debe indicar que el modelo empleado para el análisis de la deformación en las capas aproxima un comportamiento esperado en función de las características de la mezcla, pero este no reproduce exactamente el comportamiento experimentado por la mezcla asfáltica ante el fenómeno de la deformación permanente. Esto se debe a que el modelo utilizado no incluye el efecto de oxidación temprana de la mezcla asfáltica. 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 rigidez de la mezcla asfáltica aumente significativamente, mejorando así su desempeño final frente al deterioro por deformación permanente.

En la práctica, la deformación que se registra en los primeros años se considera como la máxima que registrará la mezcla asfáltica a lo largo de su periodo de vida útil. Basado en este criterio se observa que la MAC colocada en el tramo Sifón - La Abundancia experimentará una deformación final que variará entre 5,60 mm y 6,87 mm, lo cual se considera un desempeño adecuado de la capa de rueda ante la deformación permanente, sin embargo siempre es recomendable contar con monitoreo constante del avance de este deterioro en el tiempo.

Es importante aclarar que el análisis se realiza bajo el supuesto de que toda la capa de MAC corresponde a una mezcla convencional, es decir sin incluir el polímero dentro de su composición. Dependiendo de las características del polímero utilizado en la mezcla del proyecto, existe la posibilidad de encontrar mejoras potenciales en cuanto al desempeño de la MAC ante la fatiga o bien a la deformación permanente. No obstante, del análisis de desempeño realizado a la mezcla asfáltica modificada con polímero, el cual se presenta más adelante, no se tiene evidencia de que exista una mejoría en su desempeño.

En el caso de la fatiga de la BE, según así lo requiere el modelo sugerido por la PCA, se debe determinar el esfuerzo máximo a tensión en la fibra última de la capa. La magnitud de las respuestas requeridas se muestra a continuación.

Tabla 26. Esfuerzos de interés para análisis de fatiga en BE - FW1

<i>Punto</i>	<i>Coord- X</i>	<i>Coord- Y</i>	<i>Coord -Z</i>	<i>Esfuerzo Normal X-X</i>	<i>Esfuerzo Normal Y-Y</i>	<i>Esfuerzo Normal Z-Z</i>
<i>No</i>	<i>(in)</i>	<i>(in)</i>	<i>(in)</i>	<i>(psi)</i>	<i>(psi)</i>	<i>(psi)</i>
4	5.352	5.352	14.567	-0.36571E+02	-0.36599E+02	0.59203E+01

Luego de efectuar el análisis correspondiente se encuentra que la capacidad de la estructura soporta adecuadamente los ESALes de diseño, por lo cual se concluye que dicha capa no fallará por fatiga.

Desempeño Sentido Sifón - La Abundancia (FW2)

De igual manera que para el caso anterior, se aplican los modelos de la MEPDG (2004) para la fatiga de la MAC y deformación permanente de la estructura, mientras que para la fatiga de la BE se utiliza el modelo de la PCA. Las ecuaciones empleadas para los modelos indicados fueron explicadas anteriormente.

La Tabla 27 muestra las deformaciones requeridas para completar el análisis de fatiga de la MAC y la deformación permanente de la estructura total. Mientras que la Tabla 28 muestra la magnitud de los esfuerzos en la fibra última de la BE, requeridos para ser utilizados en el modelo de la PCA.

Tabla 27. Deformaciones unitarias de interés a diferentes profundidades de la estructura - FW2

Punto	Coord- X	Coord- Y	Coord-Z	Deformación Normal X-X	Deformación Normal Y-Y	Deformación Normal Z-Z
No	(in)	(in)	(in)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)
1	5.352	5.352	2.559	-0.22174E+02	-0.22779E+02	0.28099E+03
2	5.352	5.352	5.118	0.73072E+01	0.71886E+01	0.18472E+03
3	5.352	5.352	9.843	-0.15897E+02	-0.15936E+02	0.39180E+02
4	5.352	5.352	14.567	-0.49376E+02	-0.49425E+02	0.24456E+02
5	5.352	5.352	24.409	-0.28052E+02	-0.28061E+02	0.72609E+02
6	5.352	5.352	34.252	-0.25955E+02	-0.25959E+02	0.53596E+02
7	5.352	5.352	34.253	-0.25955E+02	-0.25959E+02	0.66488E+02
8	5.352	5.352	40.253	-0.21112E+02	-0.21115E+02	0.53960E+02

Tabla 28. Esfuerzos de interés para análisis de fatiga en BE - FW2

Punto	Coord- X	Coord- Y	Coord-Z	Esfuerzo Normal X-X	Esfuerzo Normal Y-Y	Esfuerzo Normal Z-Z
No	(in)	(in)	(in)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)	(Micro-Strain)
4	5.352	5.352	14.567	-0.40962E+02	-0.40992E+02	0.53472E+01

Respecto al desempeño a la fatiga de la BE el análisis indica que esta no fallará durante la vida útil estimada del proyecto; esto al obtener una cantidad de ESALes para la falla mucho mayor a los 15 millones de ejes de diseño esperados.

Por otro lado, la Figura 12 muestra los resultados del análisis de fatiga de la MAC. Se pueden observar tanto el progreso del deterioro por agrietamiento de arriba - hacia abajo como el del deterioro por fatiga de abajo hacia arriba. Es importante indicar que el análisis presentado muestra la tendencia del desempeño de la estructura a una temperatura promedio de 33,84 °C.

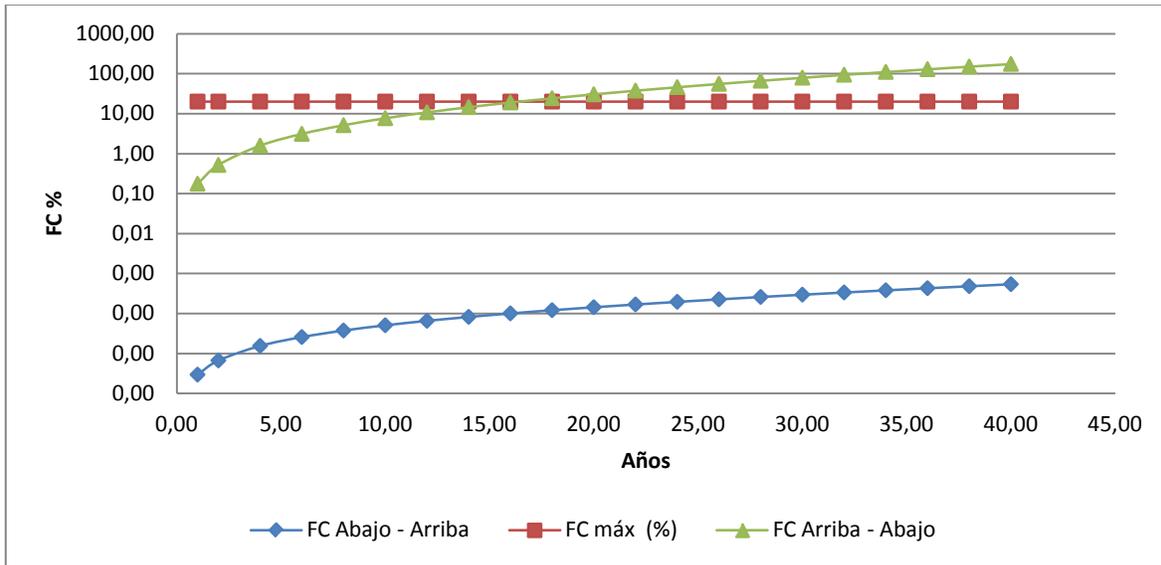


Figura 12. Evolución del porcentaje de área agrietada MAC en condiciones críticas -FW2

Se deduce de los resultados que el agrietamiento de abajo hacia arriba no representará una amenaza a largo plazo. En contraste con lo anterior, la fatiga de arriba hacia abajo es el efecto predominante en la capa de MAC. Para este caso se estima que dicha capa falle aproximadamente los 16 años, momento donde alcanzará el máximo porcentaje de área agrietada permitido sobre la huella.

Respecto al desempeño por deformación permanente, la figura siguiente presenta la evolución temporal del deterioro estimado para el pavimento del proyecto.

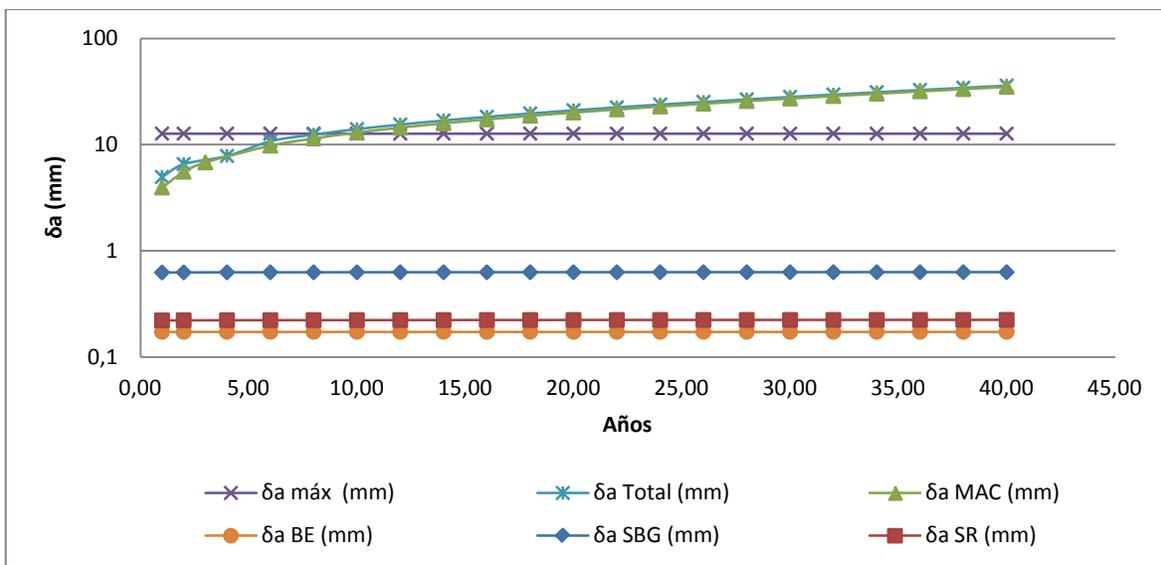


Figura 13. Evolución del desempeño por deformación permanente en condiciones críticas - FW2



Se observa que para este tramo FW2 las capas de base estabilizada, subbase y subrasante no tendrán problemas debido a las bajas deformaciones registradas. Sin embargo, para este caso también se repite el comportamiento de la MAC del tramo FW1, en donde se estima que aproximadamente a los 8 años de vida la carpeta presentará deformaciones que exceden los 12,7 mm establecidos como límite máximo recomendable.

Respecto al desempeño por deformación permanente de la MAC se recuerda tal y como se explicó anteriormente (ver página 47), que la máxima deformación de la mezcla se experimenta en los primeros años de vida del proyecto. En este sentido, se observa que durante los primeros años, la deformación permanente varía entre 5,55 mm y 6,80 mm, evidenciando que no se sobrepasarán los límites máximos permitidos.

Finalmente, se recuerda nuevamente que los resultados presentados corresponden al escenario que se considera como crítico debido a que el proyecto normalmente operará durante el día con las temperaturas promedio indicadas. A su vez se recuerda que este análisis no incluye el efecto que podría estar generando el polímero adicionado a la MAC del proyecto, por lo que se desconoce el efecto que este podría generar cuantitativamente sobre el desempeño general del pavimento. No obstante, de los resultados analizados en el laboratorio por el Lanamme no se observa que el polímero contribuya a un mejoramiento en el desempeño de la MAC, tal como se explica más adelante.

En conclusión, de acuerdo con los análisis expuestos, se considera que la estructura del pavimento presentará fallas por fatiga a los 16 años de vida útil, mientras que la deformación permanente no alcanzará el límite máximo permitido, según los modelos de predicción utilizados. Este comportamiento es similar en ambos sentidos de circulación.

11.4. SOBRE EL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El objetivo del presente análisis es evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas con y sin polímero que se están utilizando en el proyecto Sifón - La Abundancia. Para cumplir este objetivo se analizaron varias muestras de mezcla asfáltica producidas en la planta del proyecto, según se detalla en la Tabla 29.

Tabla 29. Caracterización de las mezclas asfálticas analizadas.

Mes de producción	Fecha de Muestreo	Muestra	Informe	Descripción	Parámetros volumétricos			
					Gravedad Específica Bruta	Gravedad Máxima Teórica	Porcentaje de asfalto PTM	Porcentaje Vacíos
Enero 2015	13/01/15	0066-15	I-203-15	Mezcla asfáltica sin polímero utilizada en la capa inferior de la capa asfáltica (capa de base)	2,343	2,530	4,6	7,4
Marzo 2015	10/03/15	0654-15	I-0673-15	Mezcla asfáltica modificada con 3% de UP 70 utilizada en la capa superior de la capa asfáltica (capa de rodadura) ⁽¹⁾	2,335	2,495	4,6	6,4
Marzo 2015	13/03/15	0662-15	I-0673-15	Mezcla asfáltica modificada con 3% de UP 70 utilizada en la capa superior de la capa asfáltica (capa de rodadura) ⁽¹⁾	2,321	2,506	4,6	7,4
Marzo 2015	10/03/15	0678-15	I-1273-15	Mezcla asfáltica modificada con 3% de UP 70 fabricada en laboratorio y utilizada en la capa superior de la capa asfáltica (capa de rodadura) ⁽¹⁾	2,326	2,518	4,6	7,6
Marzo 2015	10/03/15	0679-15	I-1273-15	Mezcla asfáltica modificada con 3% de UP 70 fabricada en laboratorio y utilizada en la capa superior de la capa asfáltica (capa de rodadura) ⁽¹⁾	2,333	2,518	4,6	7,3
Agosto 2015	04/08/15	0867-15	I-0832-15	Mezcla asfáltica sin polímero utilizada en la capa inferior de la capa asfáltica (capa de base)	2,344	2,529	--	7,3
Agosto 2015	04/08/15	0868-15	I-0832-15	Mezcla asfáltica sin polímero utilizada en la capa inferior de la capa asfáltica (capa de base)	2,362	2,547	--	7,3

⁽¹⁾ Corresponden a un mismo diseño de mezcla.

(--) No se reportó este valor en el Informe de ensayo

Observación 5: No se evidencia una mejoría en el desempeño de la mezcla asfáltica modificada con polímero al compararla con la mezcla convencional

Todas las muestras se sometieron a ensayos de desempeño, específicamente se realizó el ensayo del Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) para evaluar la resistencia a la deformación permanente; también se efectuó el ensayo de flexo-tracción de viga de cuatro puntos para determinar la resistencia a la fatiga. A manera de referencia, los resultados se contrastaron con los requisitos solicitados por la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del CONAVI para el ítem M45 (E) Pavimento bituminoso en caliente con polímeros, los cuales se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 30. Requisitos para mezcla asfáltica designación C, exclusivamente como capa asfáltica intermedia y capa de base.

Parámetro	Requisito	Método de Ensayo
Deformación plástica luego de 8.000 ciclos de carga a 60 °C	$\leq 3,50$ mm	AASHTO T 340
Cantidad de repeticiones para falla por fatiga a 20 °C para un nivel de deformación unitaria controlada de:		
400 E-6 mm/mm	≥ 450.000	AASHTO T 321
600 E-6 mm/mm	≥ 50.000	

Tabla 31. Requisitos para mezcla asfáltica designación D, exclusivamente como capa asfáltica de rodadura.

Parámetro	Requisito	Método de Ensayo
Deformación plástica luego de 8.000 ciclos de carga a 60 °C	$\leq 2,50$ mm	AASHTO T 340
Cantidad de repeticiones para falla por fatiga a 20 °C para un nivel de deformación unitaria controlada de:		
400 E-6 mm/mm	≥ 300.000	AASHTO T 321
600 E-6 mm/mm	≥ 30.000	

Es importante señalar que los requisitos de las mezclas asfálticas designación C se enfocan en que las mezclas que se coloquen en capas intermedias y capas de base pueden resistir de una forma adecuada las deformaciones unitarias a tensión que se generan en la última fibra de la carpeta asfáltica y que producen el agrietamiento por fatiga. Por otra parte, los requisitos de las mezclas asfálticas designación D pretenden limitar las deformaciones por cortante que se producen en la capa de rodadura debido al paso del tránsito.

Resultados de resistencia a la deformación permanente

En la Figura 11 y Tabla 32 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de APA, los cuales están asociados con la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica. Se puede observar que dos de las tres mezclas con polímero presentan valores menores a la deformación máxima establecida para mezclas que se utilizarán en la capa de rodadura.

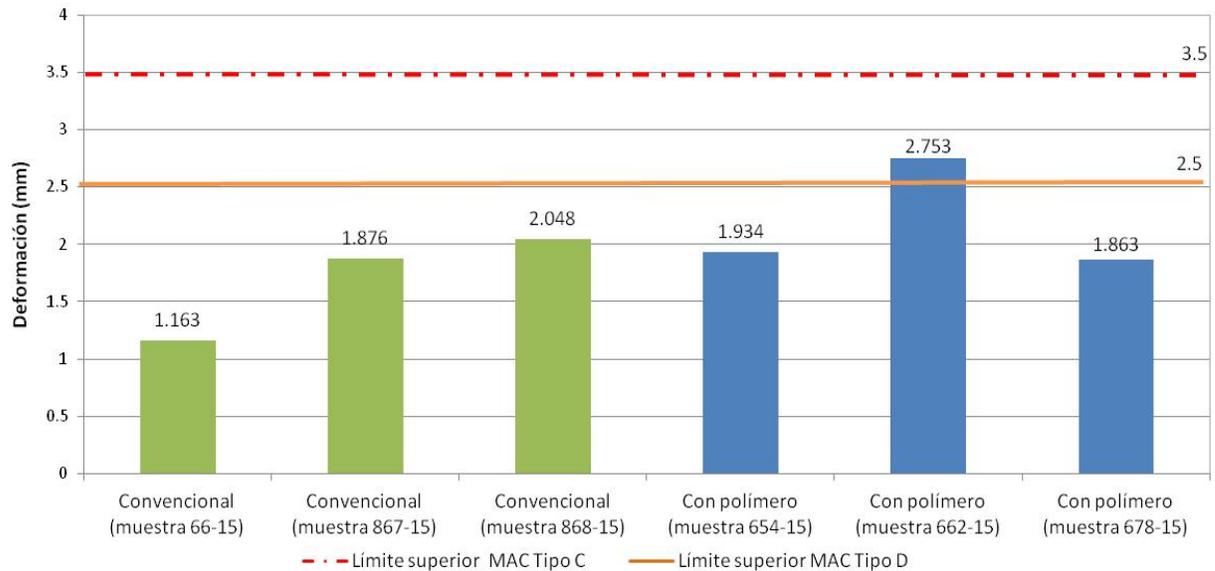


Figura 14. Resultados del ensayo APA en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia. Fuente: LanammeUCR

A manera de referencia también se presentan los resultados de tres mezclas asfálticas convencionales (sin adición de polímero), las cuales presentan en promedio una deformación de 1,70 mm; mientras que el promedio de deformación de las mezclas con polímero es de 2,18 mm. De estos resultados se puede inferir que no existen diferencias significativas en términos de resistencia al ahuellamiento entre las mezclas modificadas con polímero y las mezclas convencionales.

Tabla 32. Resultados del ensayo APA en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia.

N° de Muestra	Fecha de Muestreo	Tipo de Mezcla	Promedio Deformación (mm)	Especificación Deformación Permanente	
				Tipo C	Tipo D
066-15	13/1/15	Convencional	1,70	Cumple	-
0867-15	4/8/2015	Convencional		Cumple	-
0868-15	4/8/2015	Convencional		Cumple	-
0654-15	10/3/2015	Con polímero	2,18	-	Cumple
0662-15	13/3/2015	Con polímero		-	No cumple
0678-15	14/08/015	Con polímero		-	Cumple

Resultados de resistencia al agrietamiento por fatiga

Asimismo, se realizó el ensayo de fatiga para dos niveles de deformación unitaria (400 E-6 mm/mm y 600 E-6 mm/mm), con el fin de evaluar la mezcla asfáltica producida en el proyecto en términos de su resistencia al agrietamiento por fatiga. Los resultados del primer nivel de deformación se detallan en la Figura 15 y la Tabla 33.

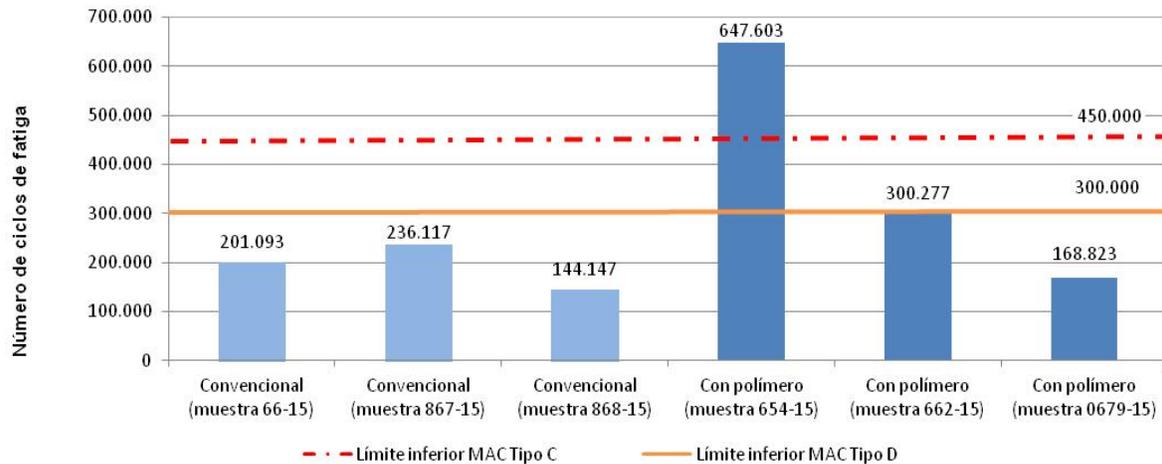


Figura 15. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 400 E-6 mm/mm.

De la Figura 15 se puede observar que dos de las tres mezclas modificadas con polímero presentaron valores mayores al número de ciclos de fatiga mínimo establecidos para mezclas tipo D. Sin embargo, se puede apreciar también la alta variabilidad que presentan estos resultados.

Por otra parte, al comparar el promedio del número de ciclos de fatiga de mezclas convencionales y mezclas modificadas (ver Tabla 33), se observa una diferencia significativa, siendo las mezclas modificadas las que presentan un promedio mayor, es decir, una resistencia mayor a la fatiga para el nivel de deformación unitaria analizado.

Tabla 33. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 400 E-6 mm/mm.

N° de Muestra	Fecha de Muestreo	Tipo de Mezcla	Promedio Fatiga (400E-6 mm/mm)	Especificación Fatiga (400 E-6 mm/mm)	
				Tipo C	Tipo D
066-15	13/1/15	Convencional	193,786	No cumple	-
0867-15	4/8/2015	Convencional		No cumple	-
0868-15	4/8/2015	Convencional		No cumple	-
0654-15	10/3/2015	Con polímero	372,234	-	Cumple
0662-15	13/3/2015	Con polímero		-	Cumple
0679-15	14/08/015	Con polímero		-	No cumple

Al analizar los resultados obtenidos con el segundo nivel de deformación unitaria se observa un comportamiento similar entre las mezclas convencionales y las modificadas con polímero. En este caso, ninguna de las mezclas alcanza el número de ciclos mínimo de fatiga esperado, tal como se detalla en la Figura 16 y Tabla 34.

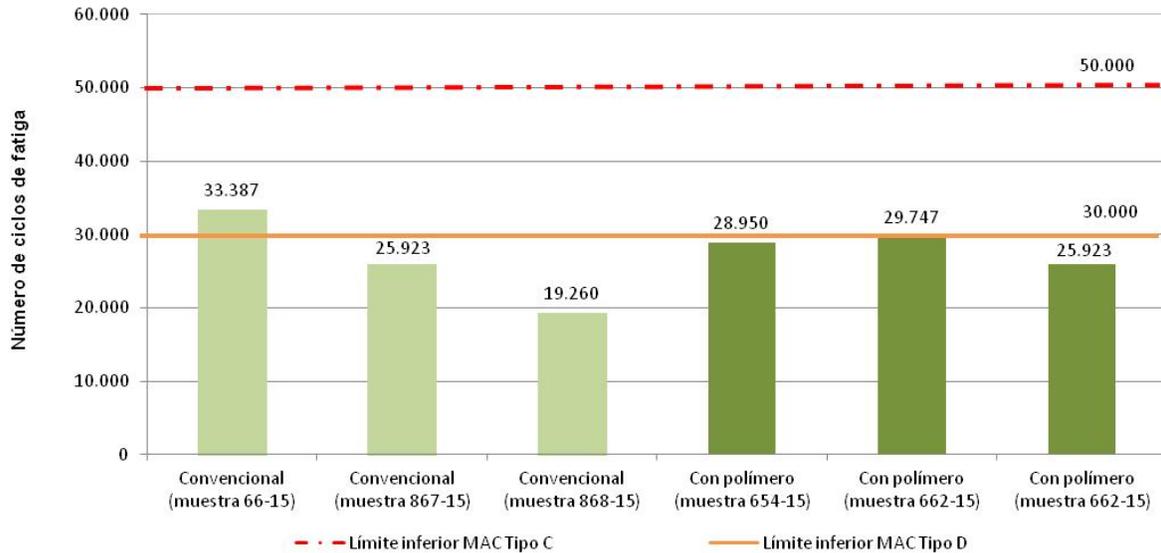


Figura 16. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 600 E-6 mm/mm.

Tabla 34. Resultados del ensayo de fatiga en mezclas asfálticas del proyecto Sifón - La Abundancia para una deformación unitaria de 600 E-6 mm/mm.

N° de Muestra	Fecha de Muestreo	Tipo de Mezcla	Promedio Fatiga (600E-6 mm/mm)	Especificación Fatiga (600 E-6 mm/mm)	
				Tipo C	Tipo D
066-15	13/1/15	Convencional	26.190	No cumple	-
0867-15	4/8/2015	Convencional		No cumple	-
0868-15	4/8/2015	Convencional		No cumple	-
0654-15	10/3/2015	Con polímero	28.207	-	No cumple
0662-15	13/3/2015	Con polímero		-	No cumple
0679-15	14/08/015	Con polímero		-	No cumple



Desempeño de las mezclas asfálticas utilizadas en el proyecto

De los resultados analizados anteriormente, se derivan las siguientes conclusiones con base en las muestras ensayadas. En primer lugar, la mezcla modificada con polímero, al colocarse como capa de rodadura, debería estar diseñada para resistir adecuadamente el ahuellamiento, ya que las deformaciones van a ser más críticas en dicha capa. De los resultados expuestos anteriormente se evidencia que las muestras de mezcla convencional se deformaron menos al compararse con las mezclas con polímero. Esto significa que el polímero incorporado en la mezcla no está contribuyendo con el mejoramiento del desempeño del pavimento en términos de deformación permanente, ya que se obtuvieron mejores resultados en una mezcla que no posee polímero.

Con respecto a la resistencia a fatiga ensayada en laboratorio, se observa que solo una de las muestras sobrepasa holgadamente el número de ciclos para la fatiga establecido. Para el resto de las muestras se obtuvo resultados muy cercanos al límite inferior, lo que indica que no hay una clara diferenciación entre la resistencia a fatiga de las mezclas con polímero con respecto a las mezclas convencionales.

Finalmente, es criterio del equipo auditor que la mejoría en el desempeño entre las mezclas que contienen polímero con respecto a las mezclas convencionales no queda claramente demostrada con los resultados expuestos anteriormente y la adición de polímero no parece estar brindando ningún valor agregado a la mezcla; por lo que la Administración debería analizar más detalladamente la razón costo/beneficio que se está obtenido al incluir polímero en una de las mezclas utilizadas en el proyecto. Aunado a esta situación, se encuentra el análisis de desempeño estructural expuesto en la sección anterior, el cual concluía que la carpeta asfáltica fallaría por fatiga antes de que el pavimento concluyera su periodo de servicio.

No omitimos indicar que parte de los resultados expuestos en esta sección fueron remitidos a la Unidad Ejecutora del proyecto mediante oficio LM-AT-082-15 emitido el 02 de junio de 2015. De acuerdo con la documentación aportada por el auditado en el oficio GCVP-PSC-16-011-28, se indica lo siguiente: *"la incorporación del polímero se realizó para mejorar el comportamiento de la mezcla en la capa de rodadura a los efectos de la humedad y las condiciones climáticas, al modificarse el grado de desempeño del cemento asfáltico a lo recomendado en el corredor del proyecto."*

11.5. SOBRE LA CONDICIÓN DE FRICCIÓN DEL PROYECTO

El análisis presentado a continuación tiene como objetivo evaluar la fricción que presentan algunos tramos del proyecto Sifón - La Abundancia. 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 en el mes de Febrero de 2015, en dos tramos del proyecto, según se detalla en la información presentada en la siguiente tabla. En la Figura 17 se muestra la ubicación geográfica de los tramos analizados del proyecto.

Tabla 35. Extensión de los tramos de prueba de fricción realizadas en el proyecto

Inicio	Final	Nivel de rasante	Tramo	Sentido	Carril	Total (km)
38+120	38+870	Capa asfáltica	1	Sifón - Abundancia	Externo	0,750
38+120	38+880			Sifón - Abundancia	Interno	0,760
38+900	38+130		2	Abundancia - Sifón	Externo	0,770
38+900	38+125			Abundancia - Sifón	Interno	0,775

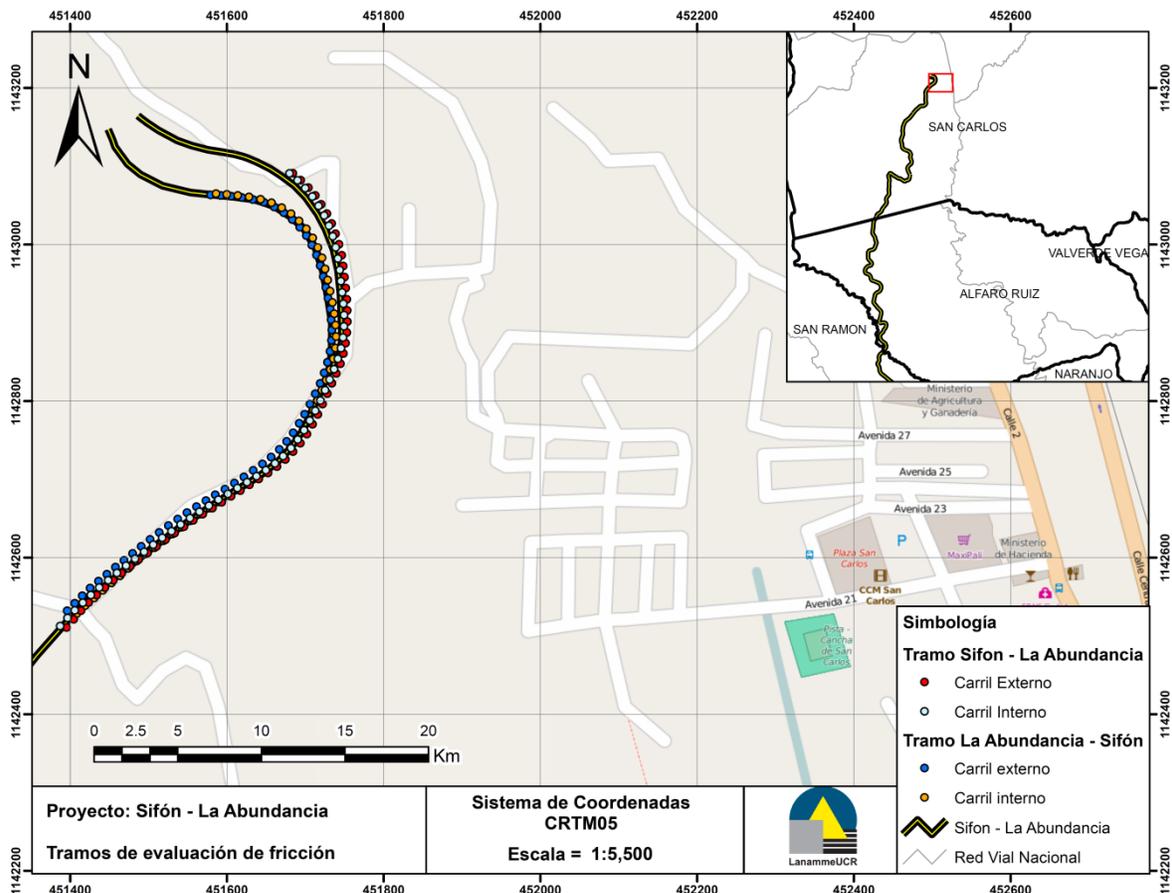


Figura 17. Ubicación de tramos de evaluación de la fricción en el Proyecto Sifón - La Abundancia.

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

En total se evaluaron entre 750 y 775 m de cada uno de los carriles que componen ambos sentidos de circulación del proyecto. En la Figura 18 se puede observar los resultados obtenidos de la evaluación, en donde se observa que los carriles tanto interno como externo del sentido Sifón - La Abundancia presentan en un 100% una buena condición de fricción, es decir estos tramos se caracterizan por ser poco deslizantes.

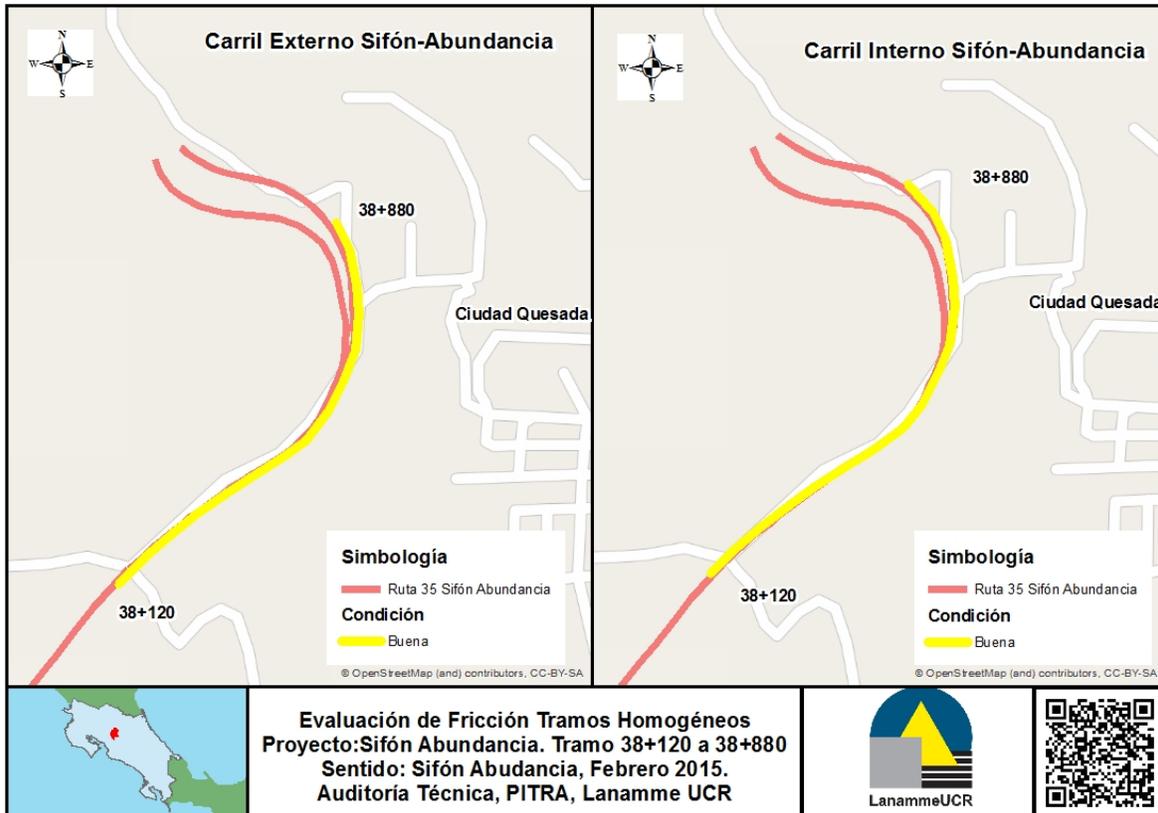


Figura 18. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Sifón - La Abundancia.

Por su parte, la Figura 19 muestra los resultados de la evaluación de los carriles externo e interno del sentido La Abundancia - Sifón. En este caso se observa que la porción evaluada del carril externo presenta un 100% de condición poco deslizante o buena. Respecto a los resultados del carril interno, un 34,2% de la longitud evaluada cuenta con una condición no deslizante o muy buena (38+120 a 38+385), mientras que el 65,8% restante se caracteriza por presentar una condición buena (38+385 a .38+900).

A nivel general, es decir ponderando los resultados obtenidos de Grip para ambos sentidos de circulación, de los 3,04 km evaluados se tiene que un 91,45% presenta una buena condición (poco deslizante), mientras que el 8,55% restante se encuentra en condiciones muy buenas de fricción (No deslizante).

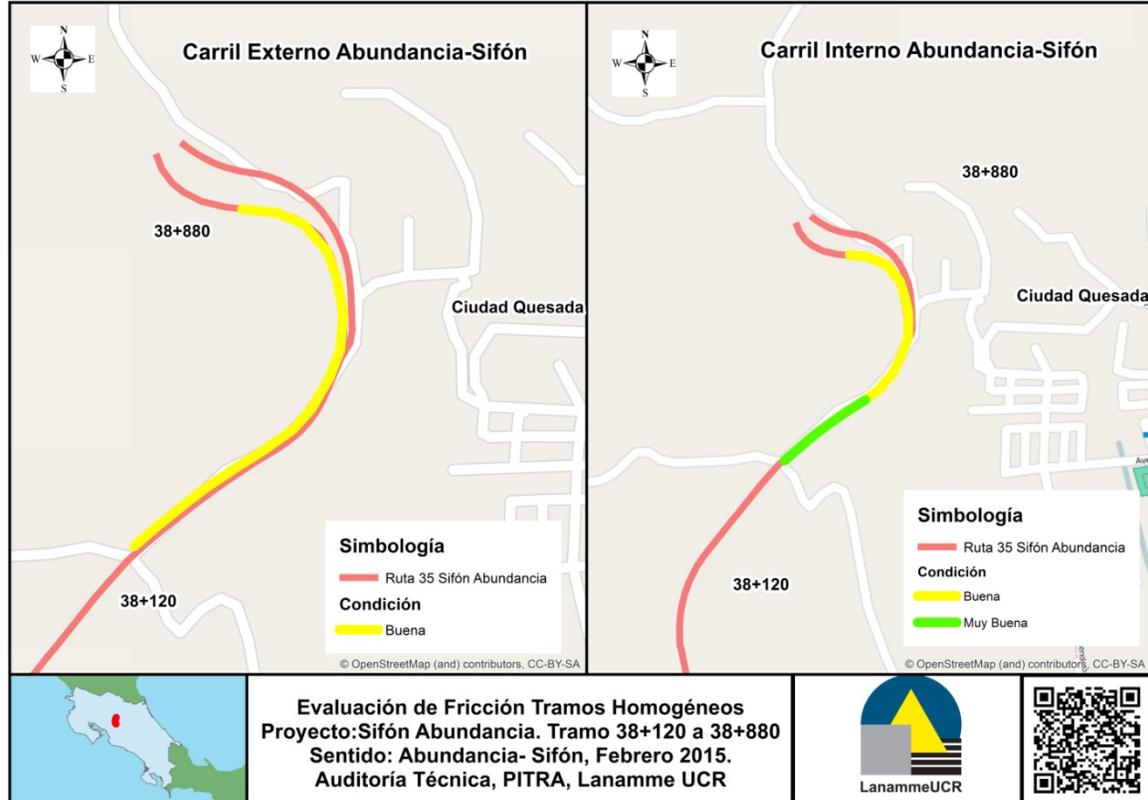


Figura 19. Evaluación de la fricción en el proyecto. Sentido Abundancia - Sifón.

Los resultados obtenidos para los carriles evaluados evidencian que este sector del proyecto cuenta con una condición de fricción adecuada para garantizar la seguridad vial de los usuarios de la vía. Al ser este un indicador que está relacionado con la probabilidad de tener accidentes por deslizamientos, se debe contar con niveles de fricción buenos o muy buenos principalmente porque el sector analizado se encuentra en una zona de curva, en donde la estabilidad vehicular puede verse afectada por una combinación de factores como el clima y la velocidad.

Es importante recordar que las mediciones se realizaron en el mes Febrero de 2015, 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 entre otros contaminantes, que afectan la microtextura y macrotextura del pavimento, produciendo una disminución en la fricción.

A pesar de contar con muy buenos resultados, es criterio del equipo auditor que cuando el proyecto entre en operación se debe monitorear continuamente la condición de fricción del pavimento para evitar alcanzar condiciones de fricción regulares o malas, las cuales son inadecuadas desde el punto de vista de seguridad vial, ya que pueden llegar a acumularse gran cantidad de partículas que afecten la micro y macrotextura de la superficie a lo largo del año, disminuyendo la calidad de la superficie y por ende, incrementado gradualmente la probabilidad de accidentes por derrape o alcance.

12. CONCLUSIONES

Sobre el Índice de Regularidad Internacional (IRI):

- Los valores de IRI promedio obtenidos en el sentido Sifón-La Abundancia, carril externo, son variables por sección, van desde 1,8m/km hasta 3,4m/km. En los estacionamientos del 9+000 al 13+000 aproximadamente es donde se presentan los valores más altos. Cuatro de los siete tramos analizados se encuentran entre 2,3m/km a 2,9m/km.
- En el sentido Sifón-La Abundancia, carril interno, se tiene un comportamiento similar, en los primeros estacionamientos se obtienen valores mayores de 3,0m/km, mientras que en los estacionamientos analizados a partir del estacionamiento 31+000 presentan valores de regularidad cercanos al límite entre 1,6m/km a 2,0m/km.
- En la caso del sentido Abundancia-Sifón, los valores para el carril externo e interno son muy similares entre 2,3 y 2,4m/km.

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

- De los resultados se observa que todos los módulos obtenidos resultan ser satisfactorios ya que al realizar la comparación entre la curva de deflexión de campo y la retrocalculada se obtienen valores de RMS menores al 5%. Este porcentaje corresponde al umbral máximo recomendado para el parámetro estadístico empleado como medida de validación del análisis efectuado.
- Desde el punto de vista de rigidez, se observa que para los tramos FW1a, FW1b y FW2a los módulos retrocalculados de la MAC y la BE-25 son adecuados ya que estos cumplen y superan significativamente los valores inicialmente utilizados para proyectar el diseño final del pavimento. Por otra parte, para todos los casos estudiados se encuentra que los materiales granulares superan en más de 200% el valor de módulo esperado. Estos parecen estar siendo afectados por un efecto compensatorio, producto de la alta rigidez de las capas superiores. Esta condición es posible que este generando la llegada de bajos esfuerzos a las capas granulares, por lo que se registran bajas deflexiones y por ende se perciban altos valores de módulo.
- Es importante destacar que para el caso del tramo FW2b se encontró una condición inadecuada respecto al valor de módulo de la MAC ya que este resultó estar por debajo del valor asumido durante la etapa de diseño. Esta condición llama la atención y es de especial cuidado debido a que esto hace que posiblemente el carril no cumpla con la capacidad estructural requerida para soportar la cantidad de ejes equivalentes estimada para el proyecto. Además, es posible que esta condición afecte negativamente el desempeño de la capeta frente a problemas como agrietamientos por fatiga y deformación permanente.

- Finalmente, al considerar el valor promedio del módulo de los materiales del pavimento se obtiene que a nivel general los carriles FW1 y FW2 cumplen con lo esperado ya que los resultados obtenidos son mayores que los módulos de diseño. Estos datos se utilizan como referencia, para revisar la condición general o promedio de la estructura, sin embargo debe tomarse en cuenta cualquier anomalía o comportamiento individual presente como la encontrada para el caso del carril FW2b.

Sobre el desempeño de la estructura del proyecto

- En lo que respecta al desempeño a la fatiga por agrietamiento transversal (de abajo hacia arriba), se tiene que la MAC de los tramos FW1 y FW2 no fallará ante este tipo de deterioro. Resulta que el porcentaje de área agrietada para fatiga de abajo hacia arriba es menor al 0,05% para el tramo FW1, y para el tramo FW2 resultó ser menor al 0,01%.
- Bajo condiciones ambientales promedio se obtiene que la superficie de ambos tramos fallará por agrietamiento debido al fenómeno de fatiga de arriba hacia abajo aproximadamente a los 16 años de vida del proyecto.
- Enfocándose en los resultados de falla por agrietamiento de la base estabilizada se tiene que ninguno de los dos tramos estudiados fallará durante la vida útil. Por lo que este cumple satisfactoriamente como material para soportar las cargas proyectadas.
- El análisis de desempeño de la deformación permanente indica que en general, para ambos sentidos de circulación, los materiales de la sub estructura no se deformarán de manera importante, ya que presentarán deformaciones por debajo del límite de 12,7 mm establecidos por la metodología mecanicista. De igual manera sucede al examinar el desempeño de la capa de MAC, en donde se espera que las deformaciones máximas experimentadas variarán entre 5,55 mm y 6,87mm.

Sobre el desempeño de la mezcla asfáltica

- Se evidencia que las muestras de mezcla convencional se deformaron menos al compararse con las mezclas modificadas con polímero. Esto significa que el polímero incorporado en la mezcla no está contribuyendo con el mejoramiento del desempeño del pavimento en términos de deformación permanente, ya que se obtuvieron mejores resultados en una mezcla que no posee polímero.
- Para la resistencia a la fatiga, la mayoría de las muestras analizadas presentaron resultados muy cercanos al límite inferior, lo que indica que no hay una clara diferenciación entre la resistencia a fatiga de las mezclas con polímero con respecto a las mezclas convencionales.
- La mejoría en el desempeño entre las mezclas que contienen polímero con respecto a las mezclas convencionales no queda claramente demostrada, por lo que la adición de polímero no parece estar brindando valor agregado a la mezcla asfáltica.

- De acuerdo con los análisis realizados, la adición de polímero en la mezcla asfáltica no garantizaría una mejora en el desempeño de la estructura del pavimento.

Sobre la condición de fricción del proyecto

- Los resultados demuestran que los tramos analizados del proyecto cuentan con valores de fricción satisfactorios. Aproximadamente un 8,55% del total de 3 km evaluados cuenta con una condición de fricción muy buena, mientras que el 91,45% restante presenta una condición buena, de acuerdo con la clasificación utilizada en este informe. Esta condición es esperable en un proyecto nuevo.

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 Gerencia de Contratación de Vías y Puentes de CONAVI

- Valorar la posibilidad de incluir en este y en futuros proyectos ensayos no tradicionales tales como: Índice de Regularidad Superficial (IRI) 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 la inclusión 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 la inclusión 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 Sifón-La Abundancia

- Valorar solicitar al contratista presentar un diseño de la mezcla asfáltica modificada con polímero en donde se justifique la modificación del asfalto en función de las condiciones del proyecto (volumen de tránsito, velocidad de operación, condiciones ambientales, etc) así como un análisis de costo/beneficio.



EQUIPO AUDITOR

Preparado por:
Ing. Erick Acosta Hernandez
Auditor Técnico

Preparado por:
Ing. Emilio Corrales Chacón
Auditor Técnico

Preparado por:
Ing. Ana Elena Hidalgo Arroyo.
Auditora Técnica

Aprobado por:
Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc.
Coordinadora Unidad de Auditoría
Técnica PITRA

Aprobado por:
Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
Coordinador General PITRA

Visto Bueno de Legalidad:
Lic. Miguel Chacón Alvarado
Asesor Legal Externo LanammeUCR



14. REFERENCIAS

AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.

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.

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.

Consortio VIETO, FONVAR, TOPYTUR, LAUHER. (2013). *Diseño Estructural de Pavimento: Proyecto Nueva Carretera a San Carlos*.

Dynatest. (Agosto de 2015). *Evaluation of Layer Moduli and Overlay Desing*. 106. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Flintsch, G. W., McGhee, K. K., de León Izeppi, E., & Najafi, S. (2012). *The Little Book of Pavement Friction*. Pavement Surface Properties Consortium.

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.

Masad, E., Arash, R., Arif, C., & Harris, P. (2009). *Predeciting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Report No. 05627-1*. Texas Transportation Institute.

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.

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.

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2015). *EVALUACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD MATERIAL GRANULARES, MEZCLA Y BASE ASFÁLTICAS DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA RUTA NACIONAL NO.4 SECCIÓN: BAJOS DE CHILAMATE – VUELTA DE KOOPER. LICITACIÓN PÚBLICA INTERNACIONAL N°2011LI-000037-32702*. Auditoría Técnica, LANAMMEUCR, Unidad de Auditoría Técnica, San Pedro, Montes de Oca.

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.

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2015). *EVALUACIÓN DE LAS PRÁCTICAS Y PROCESOS CONSTRUCTIVOS DE LA VÍA Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PUENTES*. Auditoría Técnica, LANAMMEUCR, Unidad de Auditoría Técnica, San Pedro, Montes de Oca.

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). (2012). *EVALUACIÓN DE LOS ESTUDIOS GEOTÉCNICOS PRELIMINARES: PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CARRETERA SIFÓN - LA ABUNDANCIA*. LANAMMEUCR, Unidad de Auditoría Técnica, San Pedro de Montes de Oca.



ANEXO A

Resultados de Deflectometría (FWD)

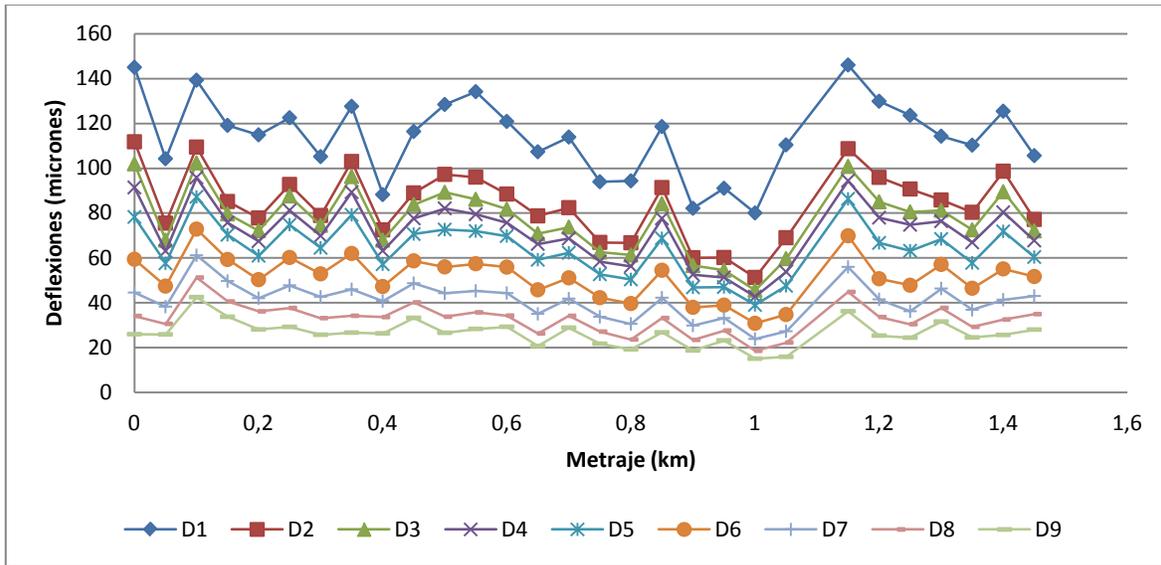


Figura A. 1. Perfil de Deflexiones - Sector FW1a. Carril externo

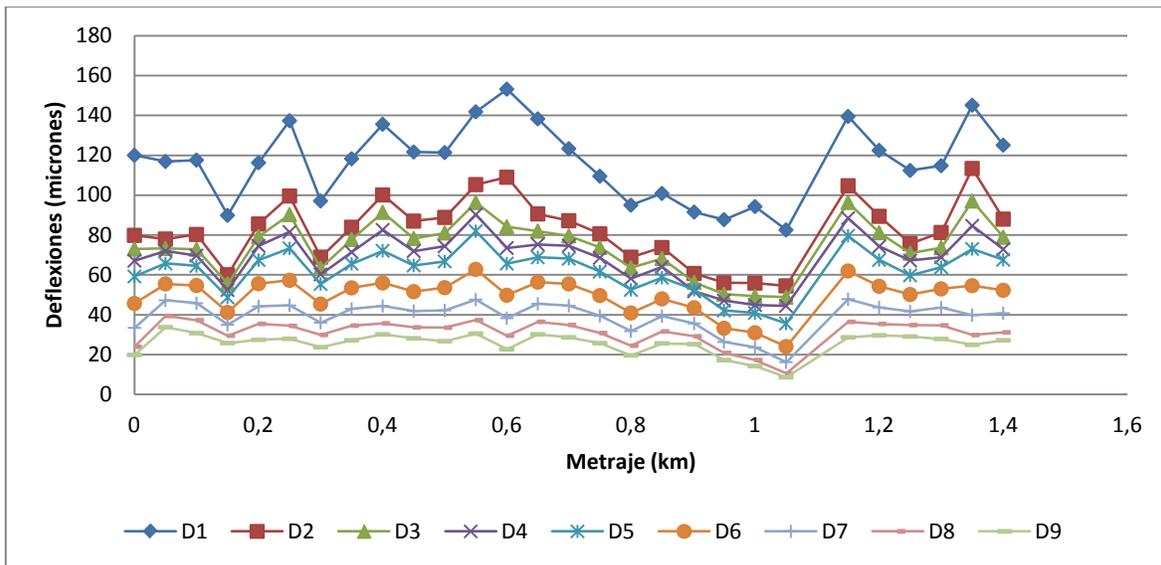


Figura A. 2. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW1b

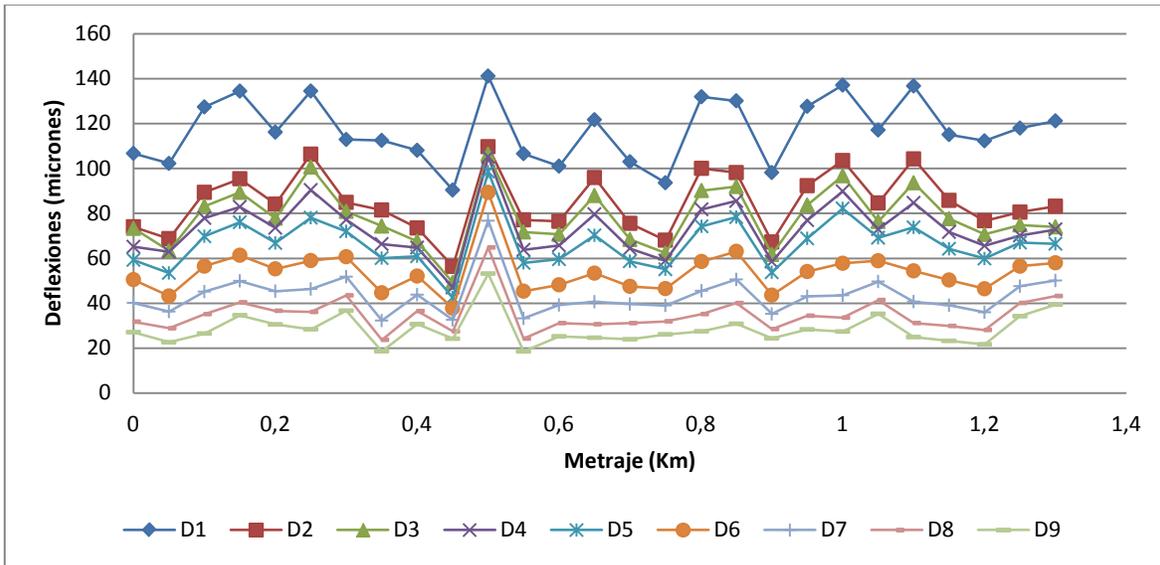


Figura A. 3. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW2a

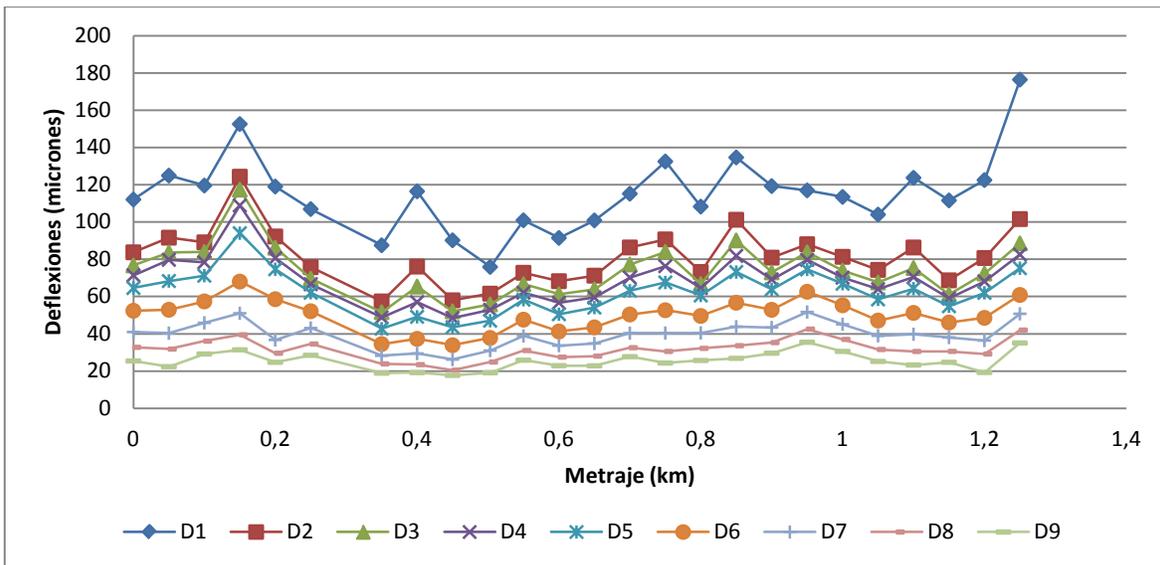


Figura A. 4 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Sección FW2b

SECCIÓN FW1a: Carril Externo.

Como se muestra en la Tabla 9, el tramo analizado cuenta con una longitud total de 1,32 km comprendido entre las estaciones 37+600 y 38+920 y corresponde a los carriles que tienen sentido de circulación sur-norte (La Abundancia - Sifón). El ensayo de deflectometría se realizó en ambos carriles, tanto el externo (FW1a) como el interno (FW1b).

A partir de las deflexiones registradas en campo mediante el ensayo de deflectometría, se estima el valor de módulo resiliente de las capas que componen la estructura de pavimento de proyecto. Por otra parte, con esta información se estima la curva de deflexión teórica con la cual se puede verificar la validez de los resultados. Para ello se procede a comparar directamente las curvas de deflexión obtenidas y se determina el valor RMS característico que da como resultado 1,89%. (RMS<5%). (Ver Figura A.5)

Los módulos resultantes del análisis de retrocálculo por cada punto de muestreo se presentan en la siguiente figura. Por otro lado, el valor de módulo promedio de cada capa se presenta en la Tabla A.1.

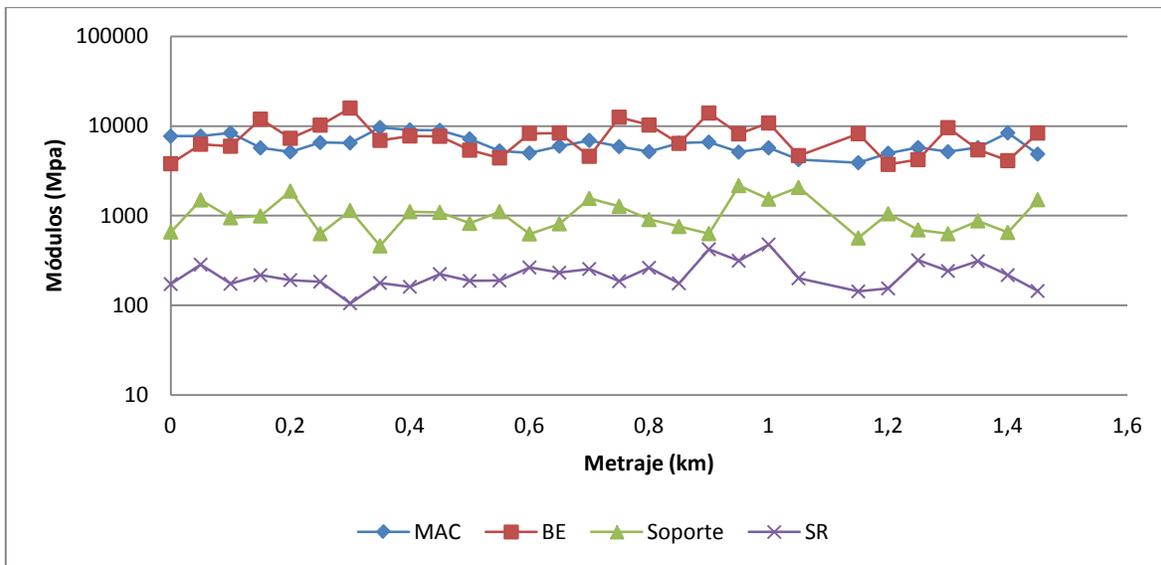


Figura A. 5 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW1a

Tabla A 1. Módulos retrocalculados - Tramo FW1a. Carril externo

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC*	710.428	895.449	1,260
BE25	697.241	1.042.530	1,495
Soporte	93.253	140.991	1,512
SR	22.497	31.253	1,389

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Tal y como se muestra en la Tabla A.1. los resultados obtenidos presentan una variabilidad importante respecto al valor promedio del módulo de cada capa ($E_{Promedio}$). Para cubrir dicha variabilidad la columna denominada como E_{P16} , correspondiente al módulo percentil 16, presenta los valores de módulo con el factor de desviación estándar aplicado y que por ello corresponden a los módulos considerados como definitivos para los materiales de la estructura.

Por su parte en la Tabla A.2. se presenta el porcentaje de diferencia obtenido al comparar los valores de módulo asumidos durante la etapa de diseño y los obtenidos a partir de análisis de retrocálculo de módulos efectuado.

Tabla A 2.Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1a.

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC	465,000	710,428	-53%
BE-25	617,120	697,241	-13%
SBG	14,933	93,253	-524%
SR	7,500	22,497	-200%

El análisis de los resultados mostrado sugiere que la estructura presenta una mejor capacidad de soporte que la supuesta durante la etapa de diseño. En este caso todos los materiales presentan un módulo de rigidez mucho mayor, por lo que es posible afirmar que todas las capas cumplen con a cabalidad con dicho parámetro.

Vale la pena destacar que la rigidez del material de base estabilizada presenta un valor cercano al supuesto, mientras que dicho comportamiento es diferente para los demás materiales, ya que presentan porcentajes de deferencia mayores al 50% en todos los casos. Si bien es cierto estos valores resultan satisfactorios, debe realizarse un análisis de desempeño a la fatiga de los materiales de MAC y BE-25, debido a que una alta rigidez en la mayoría de los casos va acompañada por un aumento en la fragilidad de esas mismas, situación que puede afectar el desempeño general de la estructura ante el fenómeno de agrietamiento por fatiga.

SECCIÓN FW1b: Carril interno

Esta sección corresponde al carril interno de la vía con sentido La Abundancia - Sifón. Al igual que la sección anterior, la longitud analizada en este caso es de 1,3 km, específicamente desde las estaciones 38+920 a la 37+600. Las deflexiones obtenidas a partir de los ensayos de campo para este tramo se muestran en la Figura B. 2 del Anexo B.

A partir de las deformaciones registradas, se estima el valor de módulo de cada capa de material de la estructura de pavimento del proyecto en estudio. Por otra parte, las deflexiones estimadas se comparan con las registradas en campo y se determina el valor del parámetro RMS, el cual se encuentra por debajo del valor máximo recomendado. En este caso resultó que $RMS = 2,27\%$.

Para definir como satisfactorios a una serie de resultados bajo este parámetro, es necesario apoyarse también en la experiencia requerida para realizar el análisis de retrocálculo de módulos, ya que el valor del RMS es solamente un valor estadístico que brinda una guía para apoyar la aceptación de los resultados, sin embargo se debe verificar que los resultados de módulos retrocalculados cuenten con un adecuado sentido lógico.

En la figura siguiente se presenta el valor puntual del módulo resultante de cada material de la estructura por estación sondeada mediante el deflectómetro de impacto. Por otro lado, el valor definitivo del módulo se muestra en la Tabla A.3.

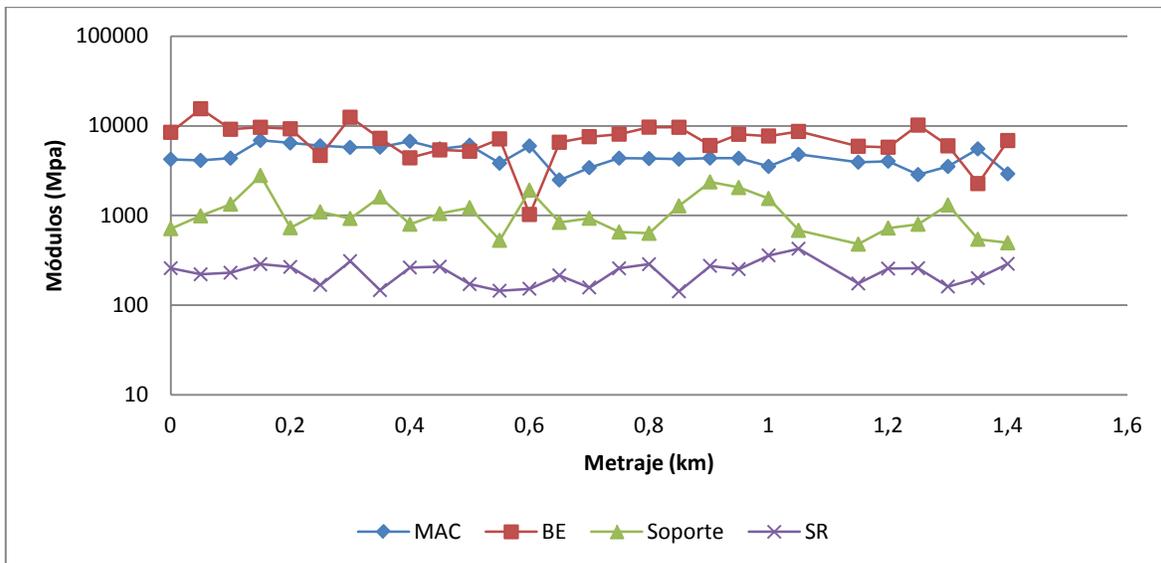


Figura A. 6. Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW1b

Tabla A 3. Módulos retrocalculados - Tramo FW1b. Carril interno

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC *	499.132	652.892	1,308
BE-25	582.261	978.041	1,680
Soporte	88.646	143.281	1,616
SR	24.494	32.858	1,341

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Se nota que los resultados presentan una variabilidad importante, la cual es tomada en cuenta al calcular el valor del módulo percentil 16 (E_{P16}) el cual es el valor considerado como definitivo para los materiales de la estructura del carril interno. De estos se destaca el sentido lógico esperado para los módulos de los materiales, ya que la BE-25 es el material que presenta mayor rigidez.

Al comprar los módulos retrocalculados con los valores asumidos en la etapa de diseño, se presentan los siguientes resultados.

Tabla A 4. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW1b

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC	465.000	499.132	-7%
BE-25	617.120	582.261	6%
SBG	14.933	88.646	-494%
SR	7.500	24.494	-227%

Al comprar los valores de módulo obtenidos con los módulos de diseño se observa que los resultados cumplen con lo esperado. Se destaca también para este caso que los módulos de los materiales granulares sobre pasan en más de un 200% en valor de módulo utilizado para el diseño. Este comportamiento es atribuible a la elevada rigidez de las capas superiores, lo cual genera un efecto de rigidez aparente en los materiales granulares. Es posible que esta condición se dé principalmente a bajas deflexiones cuantificadas por los últimos geófonos del FWD.

Finalmente, al considerar los resultados de los dos carriles con sentido La Abundancia - Sifón, el módulo promedio característico de los mismos se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla A 5. .Módulo promedio carriles sentido La Abundancia - Sifón

Material	$E_{Promedio}$ (psi)
MAC *	604,780
BE-25	639,751
Soporte	90,950
SR	23,496

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

SECCIÓN FW2a: Carril Externo

Esta sección corresponde al carril externo de la vía con sentido Sifón - La Abundancia, en donde en total se tomaron datos de deflexión a lo largo de 1,44 km de longitud. Dicho tramo inicia específicamente en la estación 39+040 y finaliza en la estación 37+600. La Figura B.3 muestra el perfil de deflexiones registradas en campo a lo largo de toda la sección muestreada.

Al comparar las deflexiones en campo contra las generadas a partir del análisis de retrocálculo, se obtiene el valor del parámetro RMS que para este caso resultó también menor que el umbral máximo sugerido. Al contar con un RMS = 2,22% se espera que los generados sean satisfactorios.

Para afirmar concretamente que los módulos retrocalculados son adecuados para describir las propiedades mecánicas de los materiales presentes, es necesario revisar la congruencia de los valores de módulo obtenidos. La Figura B.7. muestra el valor de módulo obtenido para cada punto sondeado mediante el ensayo de deflectometría. A su vez el Tabla A.6. muestra los módulos promedio y percentil 16 (P16) de la totalidad de los resultados generados.

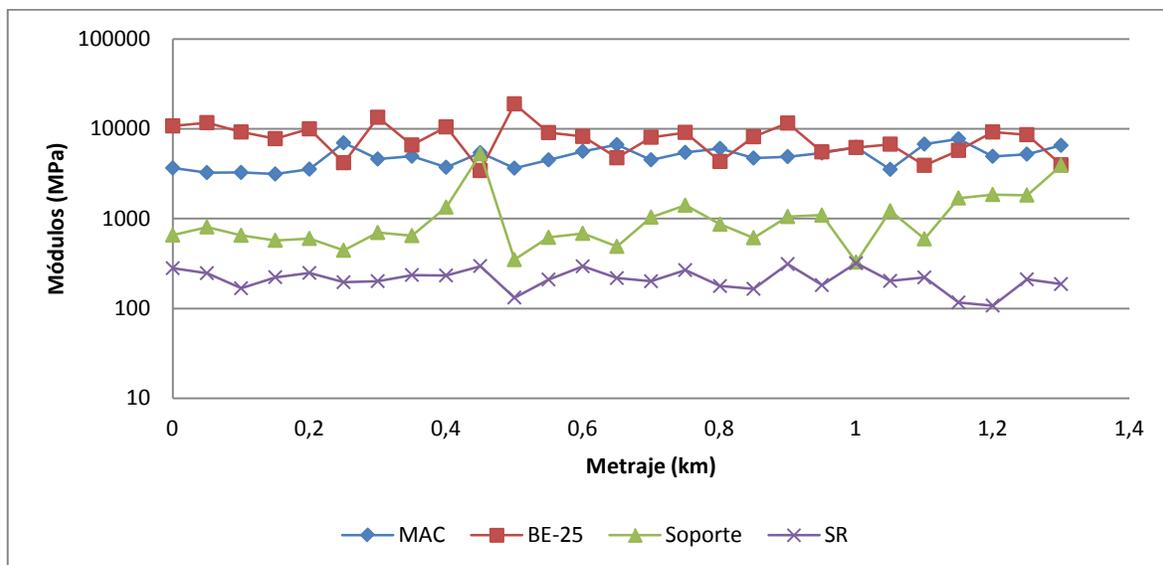


Figura A. 7Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW2a

Tabla A 6. Módulos retrocalculados - Tramo FW2a. Carril externo

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC *	540.158	701.207	1,298
BE25	710.975	1.083.611	1,524
Soporte	67.504	130.575	1,934
SR	23.036	30.358	1,318

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

Se nota de la tabla anterior que los datos recogidos presentan también una variabilidad importante respecto al valor promedio de cada material. De igual forma, para considerar el efecto estadístico de la variabilidad, se obtiene el valor percentil 16 del promedio (E_{P16}) y este dato es que se considera como módulo característico de las capas colocadas en el tramo analizado. Se observa que los datos cuentan con el sentido lógico esperado, al contar con valores decrecientes de módulo a medida que aumenta la profundidad de la estructura. Esto no se cumple para el caso de la base estabilizada con cemento (BE-25), sin embargo es normal esperar que esta sea la capa más rígida del pavimento, lo cual también confirma la validez de los resultados obtenidos.

De igual forma que para los casos anteriores, se procede a calcular el porcentaje de diferencia encontrada para los resultados obtenidos respecto a los módulos considerados en el diseño. Las diferencias encontradas se aprecian a continuación.

Tabla A 7. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados - Tramo FW2a

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC *	465.000	540.158	-16%
BE-25	617.120	582.261	6%
SBG	14.933	88.646	-494%
SR	7.500	24.494	-227%

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

De los resultados obtenidos se observa la ocurrencia similar a la tendencia de los carriles ya previamente estudiados, en donde los materiales de MAC y BE-25 son lo que presentan un porcentaje de variación menor respecto a los valores de diseño. Por otro lado, se mantiene la tendencia encontrada en los casos anteriores, en donde el valor del módulo de los materiales granulares presenta un porcentaje de diferencia mayor a 200% . Este comportamiento es repetitivo a lo largo de varios carriles por lo que se espera que la razón de este comportamiento sea la misma que se indicó previamente.

SECCIÓN FW2b: Carril Interno

La presente sección corresponde al carril interno del tramo de vía con sentido de circulación Sifón - La Abundancia, en la cual se extrajeron datos de FWD a lo largo de 1,44 km de longitud. Dicho tramo inicia específicamente en la estación 39+040 y finaliza en la estación 37+600. Al igual los casos anteriormente estudiados, se registra el perfil de las deflexiones del tramo correspondiente, datos que se presentan en la Figura A.8.

En este caso, al comparar las curvas de deflexión teórica contra la obtenida en campo, se obtiene el parámetro de validación del modelo RMS. El resultado de dicho parámetro logra explicar que los resultados conseguidos son satisfactorios al contar con un valor de $RMS = 2,68\%$, sin embargo se recuerda que la decisión definitiva se toma al contrastar los valores de módulos obtenidos con la experiencia y la lógica que estos tengan respecto a los valores que normalmente se esperarían para los materiales del pavimento analizado. Los resultados del retrocálculo para este carril se muestran en la Figura A.8..

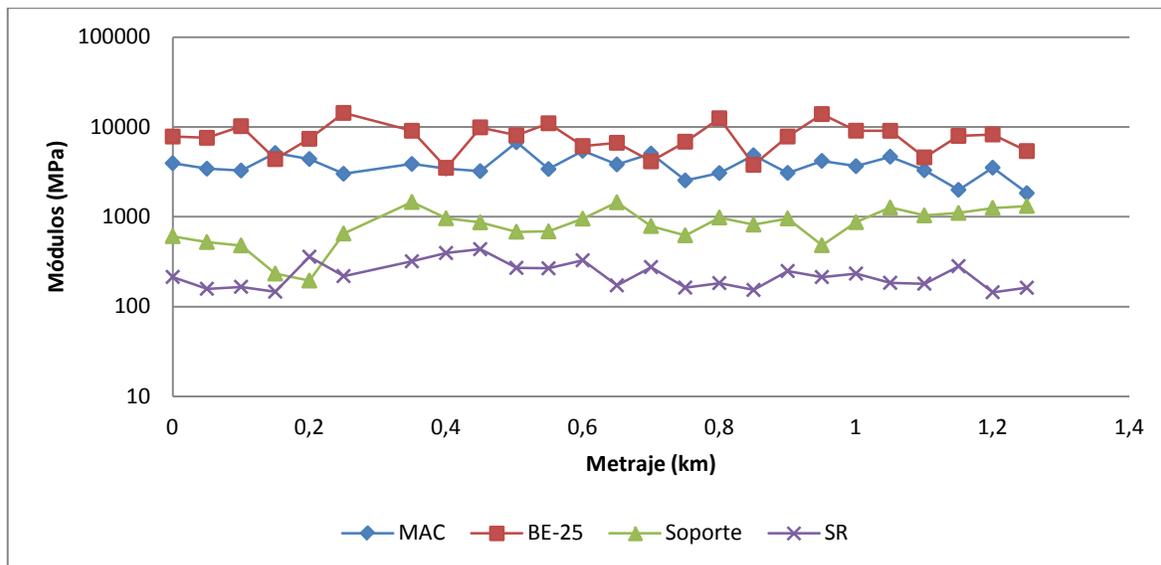


Figura A. 8 Comportamiento del módulo de los materiales por estación - Tramo FW2b

Dado que los datos mostrados en la figura anterior son específicos de cada punto analizado, es necesario presentar un valor que describa las características mecánicas predominantes en el sector. Por tanto, a continuación se presenta el valor promedio ($E_{Promedio}$) y percentil 16 (E_{P16}) del módulo resiliente de cada material. Cabe destacar que el valor E_{P16} es el que se considera como definitivo para cada material ya que este considera la variabilidad estadística presente en la información generada. Esta metodología pretende contar un análisis más conservador de las propiedades mecánicas de los materiales colocados en la vía.

Tabla A 8. Módulos retrocalculados - Tramo FW2b. Carril interno

Material	E_{P16} (psi)	$E_{Promedio}$ (psi)	Desv. Est.
MAC *	393.411	528.097	1,342
BEC	731.615	1.078.048	1,474
Soporte	67.227	111.299	1,656
SR	23.291	32.297	1,387

* $T_{aire} = 25^{\circ}C$, $f = 5,45$ HZ

De igual forma que para los casos anteriores, la tendencia observada en los módulos se repite para este caso en donde se presenta una disminución del módulo de los materiales con la profundidad. Lo anterior no se espera para la capa de BE-25 ya que es normal que esta sea la capa con mayor rigidez relativa. Se nota también que la variabilidad encontrada en el proceso es considerable y esta se puede atribuir a aspectos como la variación normal en las temperatura del aire durante el ensayo, condiciones de campo y algunas variaciones locales en la composición de los materiales incluida la subrasante.

Adicionalmente, se muestra en el siguiente cuadro las diferencias obtenidas al comparar los módulos E_{P16} y los asumidos en la etapa de diseño.

Tabla A 9. Comparación entre módulos de diseño y módulos retrocalculados -FW2b

Material	$E_{diseño}$ (psi)	E_{P16} (psi)	Δ
MAC *	465,000	393,411	15%
BE-25	617,120	731,615	-19%
SBG	14,933	67,227	-350%
SR	7,500	23,291	-211%

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45 \text{ HZ}$

Los resultados muestran que en este caso el valor del módulo de la MAC se encuentra por debajo del valor asumido en la etapa de diseño, por lo que este tramo es de especial cuidado respecto a la capacidad de soporte y desempeño a lo largo de la vida útil proyectada (20 años). Por otro lado, se nota que los demás materiales cumplen y hasta superan los valores supuestos inicialmente por el diseñador. Se repite en este sector la tendencia encontrada en los demás carriles, debido a que los materiales granulares presentan valores de módulo con deferencias mayores al 200% respecto a los valores de diseño. Es posible que esta condición encontrada se atribuya a un efecto de rigidez aparente en donde, debido a la presencia de una BE con alta rigidez, se dé una ligera afectación en la lectura de deflexiones por parte de los último geófonos del FWD.

Por último, el valor promedio del módulo de rigidez característico de los materiales que componen los carriles con sentido Sifón - La Abundancia se muestran a continuación.

Tabla A 10. Módulo promedio carriles sentido Sifón - La Abundancia

Material	$E_{Promedio}$ (psi)
MAC *	466.785
BE-25	656.938
Soporte	77.937
SR	23.892

* $T_{aire} = 25^{\circ}\text{C}$, $f = 5,45 \text{ HZ}$



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

ANEXO B

Caracterización de Materiales

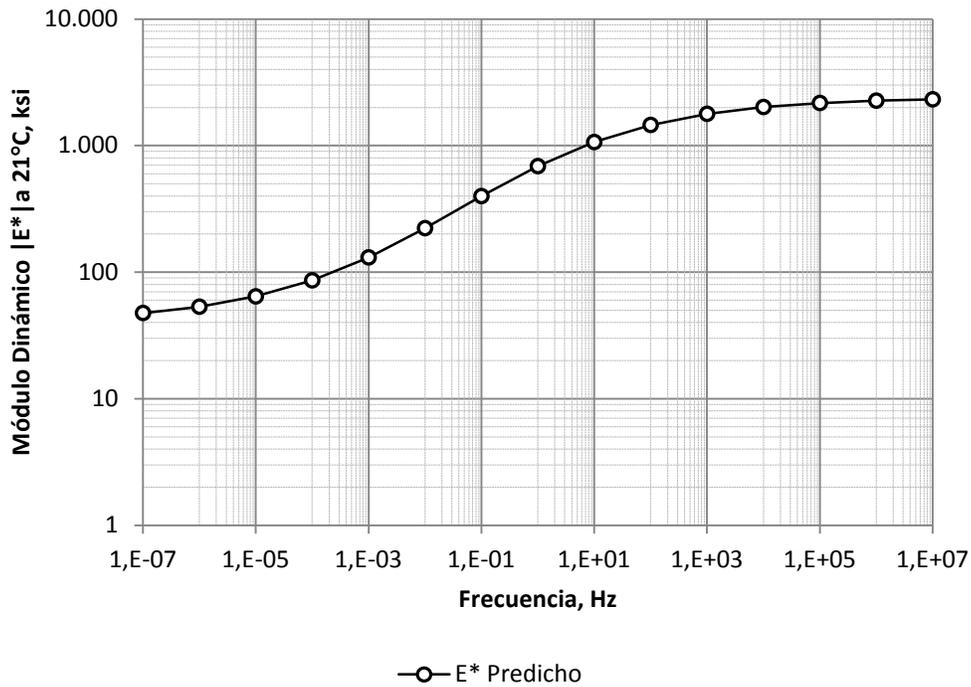


Figura B. 1. Curva de módulo dinámico de la Mezcla Asfáltica en Caliente convencional

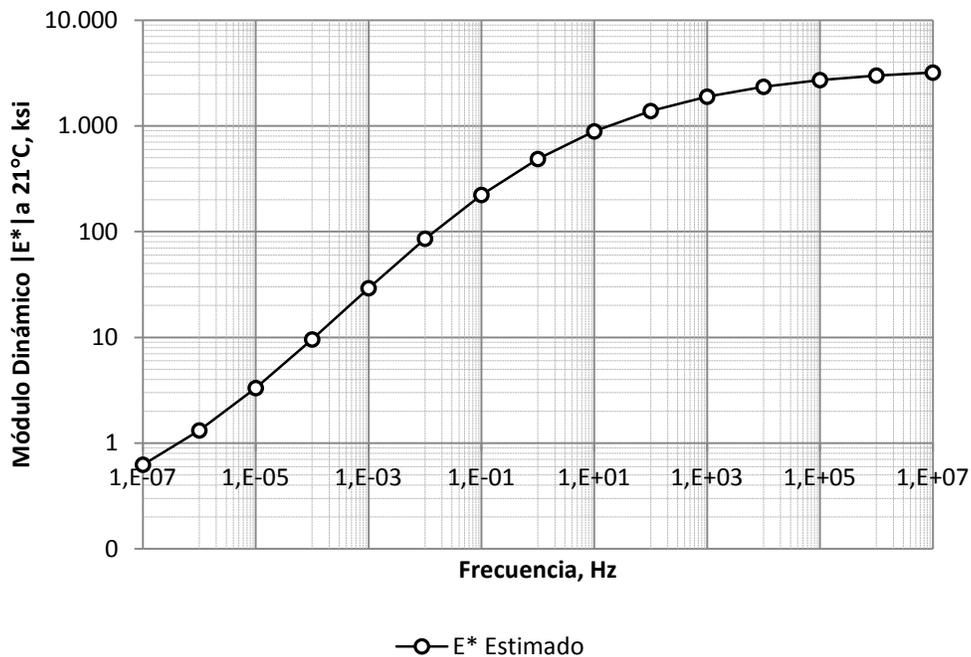


Figura B. 2. Curva de módulo dinámico de la Base Asfáltica