



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-AT-057-18

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA LOS PROYECTOS VIALES DE CONSERVACION VIAL.

Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias Zonas



Informe final
Preparado por:

Unidad de Auditoría Técnica
LanammeUCR



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.

San José, Costa Rica
Noviembre, 2018



**INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA
PARA LOS PROYECTOS VIALES DE CONSERVACION VIAL.
Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias Zonas.**

Departamento encargado del proyecto: Gerencia de Conservación de Vías y Puentes, CONAVI
Empresa contratista: detalle en

Montos originales de los contratos: ¢128.071.430.745,31 (colones)

Plazo original de ejecución: 1095 días naturales

Coordinador de Programa de Infraestructura de Transporte, PITRA:

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD

Coordinadora de Auditoría Técnica:

Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc.

Auditores:

Ing. Víctor Cervantes Calvo (Auditor Líder)

Ing. Francisco Fonseca Chaves (Auditor adjunto)

Ing. Luis Diego Herra Gómez (Auditor adjunto)

Ing. Sergio Guerrero Aguilera (Auditor adjunto)

Asesor Legal:

Lic. Miguel Chacón Alvarado

Alcance del informe:

El alcance de este informe de auditoría técnica se centró en la evaluación de los parámetros de desempeño (fatiga, deformación permanente y módulo dinámico a varias temperaturas) de todas las plantas de producción de mezcla asfáltica que despacharon para las actividades de Conservación Vial durante el 2017.



TABLA DE CONTENIDOS

1. FUNDAMENTACIÓN7

2. OBJETIVO GENERAL DE LAS AUDITORÍAS TÉCNICAS.....7

3. OBJETIVOS DEL INFORME7

4. OBJETIVO GENERAL7

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS8

6. ALCANCE DEL INFORME.....8

7. METODOLOGÍA8

8. DOCUMENTOS DE PREVALENCIA.....10

9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO11

10. AUDIENCIA A LA PARTE AUDITADA PARA ANÁLISIS DEL INFORME EN SU VERSION PRELIMINAR LM-PI-AT-057B-1812

11. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA TÉCNICA13

12. RESULTADOS DE ENSAYO DE LABORATORIO13

OBSERVACIÓN 1. LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ANALIZADAS SATISFACEN EL CRITERIO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE UTILIZADO COMO VALOR DE COMPARACIÓN, EL CUAL SE EXTRACTA DEL CARTEL DE CONSERVACIÓN VIAL PARA MEZCLAS DE ALTO DESEMPEÑO..... 14

OBSERVACIÓN 2. ALGUNAS MUESTRAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ANALIZADAS MUESTRAN VALORES CERCANOS O SUPERIORES AL VALOR DE REFERENCIA EMPLEADO PARA DEFORMACIÓN PERMANENTE MEDIANTE EL ENSAYO DE DEFORMACIÓN "RUEDA DE HAMBURGO"..... 18

OBSERVACIÓN 3. SE DETERMINA QUE ALGUNAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CONVENCIONALES ANALIZADAS CUMPLEN CON EL REQUISITO QUE SE SOLICITA PARA LA RESISTENCIA A LA FATIGA UTILIZADO COMO REFERENCIA EN EL ANÁLISIS Y ESTABLECIDO EN EL CARTEL DE CONSERVACIÓN VIAL PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTO DESEMPEÑO.22

OBSERVACIÓN 4. SE EVIDENCIA QUE TODAS LAS MUESTRAS DE MEZCLA ASFÁLTICA FABRICADAS EN LAS PLANTAS PRODUCTORAS, PARA AMBOS TIPOS DE MEZCLA (12 MM Y 19 MM) PRESENTAN VALORES DE MÓDULO DINÁMICO MAYORES A LOS VALORES HABITUALMENTE ASIGNADOS A ESTE MATERIAL EN LA METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO 93 PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS.30

13. ANÁLISIS MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE DESEMPEÑO DE RESULTADOS34

14. CONCLUSIONES53

15. RECOMENDACIONES.....55

16. REFERENCIAS56



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DETALLE DE LOS MUESTREOS REALIZADOS DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	8
TABLA 2. RESULTADOS DE ENSAYO MARSHALL A LA MEZCLA ASFÁLTICA DE 12 MM.....	9
TABLA 3. RESULTADOS DE ENSAYO MARSHALL A LA MEZCLA ASFÁLTICA DE 19 MM.....	10
TABLA 4. ZONAS ADJUDICADAS PARA CADA CONTRATISTA Y PLANTA SUPLIDORA.	11
TABLA 5. REQUISITOS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA PARA MEZCLA ASFÁLTICA POR MÉTODO MARSHALL.	15
TABLA 6. REQUISITOS DE REPETICIONES PARA FALLA POR FATIGA MEZCLA ASFÁLTICA DE MÉTODO MARSHALL.	23
TABLA 7. RESULTADOS VOLUMÉTRICOS Y DE FATIGA PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	45
TABLA 8. RESULTADOS VOLUMÉTRICOS Y DE DEFORMACIÓN PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.	48



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DE LAS PLANTAS. FUENTE: LANAMMEUCR.....	9
FIGURA 2. RESULTADOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLA DE TAMAÑO DE 12 MM.	16
FIGURA 3. RESULTADOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLA DE TAMAÑO DE 19 MM.	17
FIGURA 4. RESULTADOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA AMBOS TIPOS DE MEZCLA.	18
FIGURA 5. RESULTADOS DE RUEDA HAMBURGO PARA MEZCLA DE TAMAÑO DE 12 MM.	19
FIGURA 6. RESULTADOS DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLA DE TAMAÑO DE 19 MM.	20
FIGURA 7. RESULTADOS DE RUEDA HAMBURGO PARA AMBOS TIPOS DE MEZCLA.....	21
FIGURA 8. ÁREA DE LA FIGURA GEOMÉTRICA FORMADA POR LA ESPECIFICACIÓN DE FATIGA.	24
FIGURA 9. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA PARA LA MEZCLA DE 12,5 MM.....	25
FIGURA 9(CONT). RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA PARA LA MEZCLA DE 12,5 MM.	26
FIGURA 10. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA PARA LA MEZCLA DE 19 MM.....	27
FIGURA 11. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA PARA AMBOS TIPOS DE MEZCLA.	28
FIGURA 12. MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE TAMAÑO DE 12 MM.	31
FIGURA 13. MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA DE TAMAÑO DE 19 MM.	32
FIGURA 14. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DINÁMICO PARA AMBOS TIPOS MEZCLA ASFÁLTICA.....	33
FIGURA 15. PAQUETE ESTRUCTURAL UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MAC....	35
FIGURA 16. CANTIDAD DE CICLOS PARA PRODUCIR AGRIETAMIENTO POR FATIGA EN LA CARPETA ASFÁLTICA.....	36
FIGURA 17. RELACIÓN DE VACÍOS Y ASFALTO EFECTIVO CON LOS CICLOS PARA PRODUCIR FATIGA A UNA TEMPERATURA DE 25°C PARA TODAS LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	37
FIGURA 18. CANTIDAD DE CICLOS PARA PRODUCIR DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA CARPETA ASFÁLTICA.....	38
FIGURA 19. RELACIÓN DE VACÍOS Y ASFALTO EFECTIVO CON LOS CICLOS PARA PRODUCIR FATIGA A UNA TEMPERATURA DE 25°C PARA TODAS LAS MEZCLAS ANALIZADAS.	40
FIGURA 20. A. REPETICIONES PARA FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA, B. MAPA DE TEMPERATURAS TEMPLADAS Y ÁREAS DE INFLUENCIA POR ZONA PARA LAS PLANTAS ASFÁLTICAS (VER DISTRIBUCIÓN EN FIGURA 1).....	42
FIGURA 21.A. CANTIDAD DE CICLOS PARA DEFORMACIÓN, B. MAPA DE TEMPERATURAS CALIENTES Y ÁREAS DE INFLUENCIA SEGÚN ZONA PARA LAS PLANTAS ASFÁLTICAS (VER DISTRIBUCIÓN EN FIGURA 1).....	44
FIGURA 22. CANTIDAD DE REPETICIONES DE CARGA PARA PRODUCIR LA FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA, SEGÚN PORCENTAJE DE VACÍOS Y CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO.	46
FIGURA 23. CANTIDAD DE REPETICIONES DE CARGA PARA PRODUCIR LA FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA, SEGÚN PORCENTAJE DE VACÍOS Y CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO.	47
FIGURA 24. CANTIDAD DE REPETICIONES DE CARGA PARA PRODUCIR UNA DEFORMACIÓN DE 12 MM EN LA MEZCLA ASFÁLTICA, SEGÚN PORCENTAJE DE VACÍOS, MÓDULO DINÁMICO Y CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO.	49
FIGURA 25. CANTIDAD DE REPETICIONES DE CARGA PARA PRODUCIR UNA DEFORMACIÓN DE 12,5 MM EN LA MEZCLA ASFÁLTICA, SEGÚN TEMPERATURA Y CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO.....	50
FIGURA 26. VARIACIÓN PORCENTUAL EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA Y DEFORMACIÓN PERMANENTE DE ACUERDO CON LA VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO.....	51



INFORME FINAL DE AUDITORÍA TÉCNICA EXTERNA.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA LOS PROYECTOS VIALES DE CONSERVACION VIAL.

Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias Zonas.

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. OBJETIVO GENERAL DE LAS AUDITORÍAS TÉCNICAS

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

3. OBJETIVOS DEL INFORME

4. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este informe es valorar de forma general la calidad de la mezcla asfáltica producida por los diversos contratistas durante el 2017, para ser utilizada en los procesos de conservación vial aplicados por el CONAVI. Dicha valoración consiste en evaluar los parámetros de desempeño de fatiga, deformación permanente y módulo dinámico de las mezclas asfálticas producidas en las diferentes plantas asfálticas distribuidas en distintas zonas del país, para ello se efectúan ensayos de laboratorio y diversas determinaciones mediante modelos de desempeño.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar los parámetros de fatiga, deformación permanente y módulo dinámico a partir de los muestreos puntuales de la mezcla asfáltica realizados durante el 2017 por el LanammeUCR.
- Análisis comparativo en términos de desempeño (fatiga, deformación permanente) de las diferentes mezclas.

6. ALCANCE DEL INFORME

El estudio que realiza esta auditoría abarca un periodo de producción de aproximadamente ocho meses, comprendido entre marzo a octubre de 2017, considerando todas las plantas de producción activas en este periodo, cuya producción estuviera destinada a proyectos de conservación vial. Para este periodo se muestreo y se ensayó solamente una muestra de mezcla asfáltica para cada planta, según el tipo de mezcla producida. Los resultados analizados son los reportados en los informes de ensayo emitidos por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

7. METODOLOGÍA

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.

Durante el proceso de auditoría realizado por la Auditoría Técnica del LanammeUCR se visitaron las instalaciones de las plantas asfálticas indicadas en la Tabla 1 y se tomaron muestras de la mezcla asfáltica por un periodo definido para llevar a cabo las actividades de evaluación de la planta. Las muestras fueron tomadas de manera aleatoria, las cuales fueron posteriormente ensayadas por el Laboratorio de Mezclas Bituminosas del LanammeUCR.

Tabla 1. Detalle de los muestreos¹ realizados de mezcla asfáltica en caliente.

Planta	Identificación de muestras			
	Mezcla 12,5 mm		Mezcla 19 mm	
Conansa, Calle Blancos (Co)	30-mar-17	Co ₁₂	-	-
Hernán Solís, Abangares (HSA)	06-mar-17	HSA ₁₂	27-jun-17	HSA ₁₉
Hernán Solís, Guápiles (HSG)	15-mar-17	HSG ₁₂	19-jun-17	HSG ₁₉
Meco, Aguas Zarcas (MAZ)	-	-	06-jun-17	MAZ ₁₉
Meco, Bagaces (MB)	09-mar-17	MB ₁₂	-	-
Meco, Guápiles (MG)	14-mar-17	MG ₁₂	-	-
Meco, Río Claro (MRC)	21-mar-17	MRC ₁₂	14-jun-17	MRC ₁₉
Meco, Uruca (MU)	17-mar-17	MU ₁₂	-	-
Quebradores del Sur (QS)	22-mar-17	QS ₁₂	15-jun-17	QS ₁₉

¹ Nótese que para el periodo de estudio y para cada tipo de mezcla solamente se tomó y ensayó una muestra de mezcla asfáltica.



En la Tabla 1 se presenta el detalle de los muestreos realizados de mezcla asfáltica en caliente, especificándose la planta y el tipo de mezcla respectivo. Asimismo, en la Figura 1 se presenta una ubicación aproximada de cada una de las plantas productoras de mezcla asfáltica evaluadas.

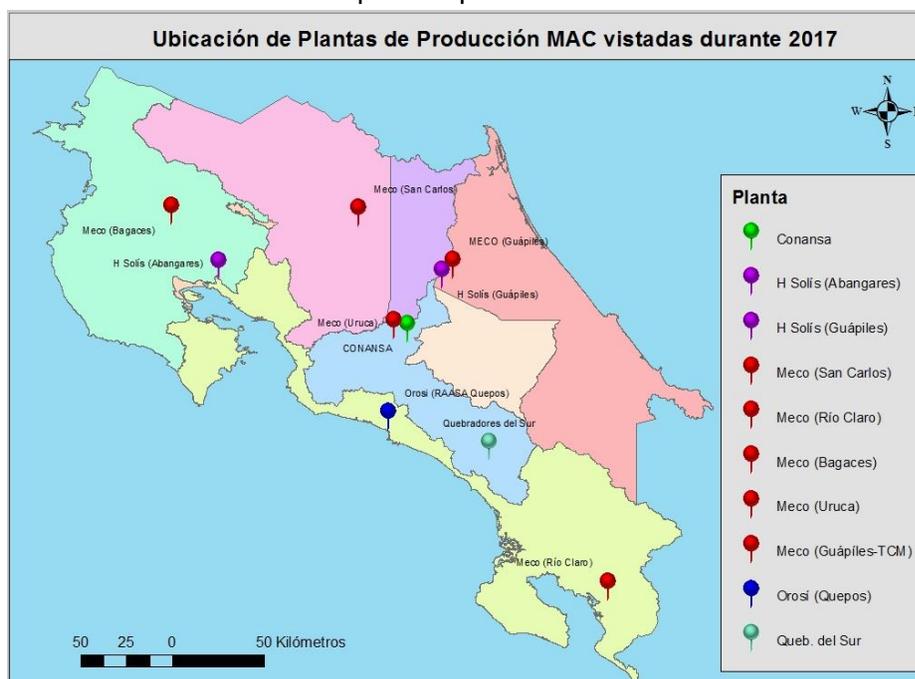


Figura 1. Ubicación de las plantas. Fuente: LanammeUCR

Además en las Tabla 2 y Tabla 3 se detallan los resultados de los ensayos Marshall para las muestras analizadas en el presente informe, esta información fue incluida en el informe LM-PI-AT-154-17 titulado " **EVALUACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PRODUCIDA EN DIFERENTES CENTROS DE PRODUCCION PARA LOS PROYECTOS VIALES DE CONSERVACION VIAL. Licitación pública No. 2014LN-000018-0CV00. Varias Zonas.**" emitido a inicios del año 2018, en el cual se abarcan las principales características físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica.

Tabla 2. Resultados de ensayo Marshall a la mezcla asfáltica de 12 mm.

Informe	Planta	Abreviación	Fecha de muestreo	Asfalto (PTM) %	Asfalto efectivo %	Vacíos %	VMA %	VFA %	Polvo/asfalto %
<i>Límite Inferior</i>				-	-	3	14	65	0,6
<i>Límite Superior</i>				-	-	5	-	75	1,3
I-0458-17	Conansa	CO ₁₂	30/03/2017	5,40	4,40	4,5	14,8	69,8	1,3
I-0269-17	Hernán Solís, Abangares	HSA ₁₂	06/03/2017	5,50	4,80	4,7	15,9	70,2	1,0
I-0390-17	Hernán Solís, Guápiles	HSG ₁₂	15/03/2017	5,80	4,20	3,9	13,9	83,0	1,4
I-0270-17	Meco, Bagaces	MB ₁₂	09/03/2017	5,90	4,70	4,9	15,9	68,9	1,1
I-0371-17	Meco Guápiles (œ)	MG ₁₂	14/03/2017	5,30	3,99	5,5	14,6	61,9	1,4
I-0454-17	Meco, Río Claro	MRC ₁₂	21/03/2017	5,90	4,30	5,8	16,0	63,6	1,2
I-0457-17	Meco Uruca	MU ₁₂	17/03/2017	5,70	4,10	4,3	14,0	69,0	1,6
I-0456-17	Quebradores del Sur, PZ	QS ₁₂	22/03/2017	5,40	4,50	4,5	15,3	70,3	1,3

œ: Muestra tomada en producción de 12mm, pero resultados determinan que es de 19mm



Tabla 3. Resultados de ensayo Marshall a la mezcla asfáltica de 19 mm.

Informe	Planta	Abreviación	Fecha de muestreo	Asfalto (PTM) %	Asfalto efectivo %	Vacíos %	VMA %	VFA %	Polvo/asfalto%
<i>Límite Inferior</i>				-	-	3	13	65	0,6
<i>Límite Superior</i>				-	-	5	-	75	1,3
I-0801-17	Hernán Solís, Abangares	HSA ₁₉	27/06/2017	5,36	4,38	5,0	15,1	67,1	1,37
I-1069-17	Hernán Solís, Guápiles	HSG ₁₉	19/06/2017	5,90	4,90	2,8	14,2	79,9	1,14
I-1090-17	Meco Agua Zarcas	MAZ ₁₉	29/09/2017	5,26	4,17	4,5	14,5	69,2	1,55
I-0757-17	Meco, Río Claro (§)	MRC ₁₉	14/06/2017	5,80	4,40	4,1	14,4	71,7	1,20
I-0795-17	Quebradores del Sur, PZ	QS ₁₉	15/06/2017	5,30	4,37	4,7	15,0	68,7	1,07

§: Muestra tomada en producción de 19mm, pero resultados determinan que es de 12mm.

De la información se denota que las mezclas asfálticas de 19 mm varias muestras mantienen contenidos de asfalto total con valores aproximados de 5,30%, mientras que las mezclas de 12 mm muestran un valor promedio de 5,60%. Este aspecto es relevante, ya que la cantidad de asfalto presente en la mezcla, -asfalto efectivo- es el que produce la adhesión con los agregados, por lo que influye en gran manera en el desempeño ante paso continuo de carga vehicular.

8. DOCUMENTOS DE PREVALENCIA

- Los trabajos del proyecto deberán ser ejecutados de conformidad con los términos del pliego de condiciones y acordes con la última versión descrita en el Sección VI Requisitos de las Obras:
- Ley de Contratación Administrativa (Ley No. 7494 del 02 de mayo de 1995) y sus reformas y su respectivo Reglamento (Decreto Ejecutivo número 33411-H del 27 de setiembre del 2006) y sus reformas.
- El cartel de licitación, incluyendo las Especificaciones Especiales, sus aclaraciones y sus enmiendas.
- La oferta adjudicataria.
- El contrato refrendado por la Gerencia de Gestión de Asuntos Jurídicos del CONAVI.
- “Especificaciones generales para la construcción de caminos, carreteras y puentes (CR-2010)”.
- El código de construcción.
- El documento titulado: “Tomo de disposiciones para la construcción y conservación vial”, contiene las disposiciones generales emitidas por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).
- Normas y diseños para la construcción de carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Plan Vial.
- Todas aquellas normas ASTM que cuenten con homologación vigente del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) regirán sobre su homologada (ver Anexo K). El contratista tendrá la obligación de verificar y aplicar toda la normativa INTECO aplicable.



9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Las plantas de producción de mezcla asfáltica ubicadas en el territorio nacional y que producen mezcla asfáltica para actividades de conservación vial en su mayoría mantienen una disposición del proceso de producción de forma continua (Plantas Continuas). Siendo -para el periodo de estudio de marzo a setiembre de 2017- la única con proceso discontinuo (Planta de Bache) la planta de Conansa, ubicada en Calle Blancos.

En la Tabla 4, se muestra el detalle de las contrataciones y las empresas adjudicatarias, así como la asociación general de cada una de las plantas con las zonas a las cuales suplen mezcla asfáltica.

Tabla 4. Zonas adjudicadas para cada contratista y planta suplidora.

Línea	Zona	Contratista	Planta Suplidora	Monto del contrato
Línea 19	1-4 Alajuela Sur	Conansa ^(§)	Conansa	₡ 7.275.193.567,52
Línea 1	1-1 San José	MECO	Meco Uruca	₡16,592,134,220.24
	1-2 Puriscal			
	1-9 Heredia			
Línea 2	1-4 Alajuela Sur	H. Solís	HS Guápiles	₡17,187,471,845.40
	1-5 Alajuela Norte			
	1-6 San Ramón			
Línea 3	1-3 Los Santos	H. Solís	HS Guápiles	₡17,072,283,152.02
	1-7 Cartago			
	1-8 Turrialba			
Línea 4	2-1 Liberia	H. Solís	HS Abangares	₡8,389,299,085.83
Línea 5	2-3 Santa Cruz	MECO	Meco Bagaces	₡16,577,831,320.97
	2-4 Nicoya			
Línea 6	2-2 Cañas-Upala	H. Solís	HS Abangares	₡15,048,788,609.77
	3-1 Puntarenas			
	3-2 Quepos			
Línea 7	4-1 Pérez Zeledón	Q. Sur	Q. Sur	₡7,639,012,171.00
	4-2 Buenos Aires			
Línea 8	4-3 Río Claro	MECO	Meco Río Claro	₡9,739,588,053.27
Línea 9	5-1 Guápiles	MECO	Meco Guápiles	₡11,424,348,310.39
	5-2 Limón			
Línea 10	6-1 Ciudad Quesada	MECO	Meco Aguas Zarcas	₡8,400,673,976.42
	6-2 Los Chiles			

Fuente: [§]Contratación Directa 2014CD-000140-OCV00-19 y Licitación Pública No.2014LN-000018-CV.



10. AUDIENCIA A LA PARTE AUDITADA PARA ANÁLISIS DEL INFORME EN SU VERSIÓN PRELIMINAR LM-PI-AT-057B-18

Como parte de los procedimientos de auditoría técnica, mediante oficio LM-AT-123-18 del 24 de setiembre de 2018, se envía el presente informe en versión preliminar LM-PI-AT-057B-18 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. Dicho plazo se extendía hasta el 22 de octubre de 2018. Como parte del proceso de Auditoría se realiza una reunión el lunes 05 de octubre de 2018 con el auditado con el fin de comentar aspectos relacionados con el informe. Esta reunión contó con la asistencia de los siguientes participantes:

Institución	Nombre
Conavi (Administración)	Berny Quirós Vargas (Auditoría Interna)
	Edgar Meléndez Cerda (Director Conservación Vial)
	Hugo Zuñiga Fallas (Conservación Vial)
	Joshimar Tejeda Valverde. (Auditoría Interna)
	Julio César Carvajal Saborío (Gestión Calidad Conservación Vial)
	Marlín Quesada Hidalgo (Gestión Calidad Conservación Vial)
	Manrique Aguilar Oreamuno (Auditoría Interna)
Cacisa (Verificación Calidad)	Carlos Solís Molina
	Mariam Vargas Barrantes
Castro & de la Torre (Verificación Calidad)	Luis Diego Moreira Vargas
ITP (Verificación Calidad)	Orlando Castro López
	Roger Arroyo Acosta
LGC (Verificación Calidad)	Luis Chavarría Bravo
LIMPISA (Verificación Calidad)	Oscar Elizondo Espinoza
	César Arias Mejía
	Mariana Céspedes Cedeño
OJM (Verificación Calidad)	Greivin Moya Araya
Vieto (Verificación Calidad)	Juan Carlos Vargas Rosas
LanammeUCR (Auditoría Técnica)	Francisco Fonseca Chaves (Auditor Técnico)
	Luis Diego Herra Gómez (Auditor Técnico)
	Sergio Guerrero Aguilera (Auditor Técnico)
	Víctor Hugo Cervantes Calvo (Auditor Técnico)
	Wendy Sequeira Rojas (Coordinadora Auditoría Técnica)



Al 29 de octubre de 2018, no se recibe respuesta por parte de los laboratorios de verificación, ni de la Unidad de Gestión de Calidad de la Dirección de Conservación Vial por tanto, en cumplimiento de los procedimientos de auditoría técnica se procede a emitir el informe LM-PI-AT-057-18 en su versión final para ser enviado a las instituciones que indica la ley.

11. RESULTADOS DE LA AUDITORÍA TÉCNICA

Todos los hallazgos y observaciones declarados por el equipo de auditoría técnica en este informe 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 sean necesariamente de carácter contractual, pero que obedecen a las buenas prácticas de la ingeniería, principios generales, medidas basadas en experiencia internacional o nacional. Además, 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 prevengan el riesgo potencial de incumplimiento.

PRIMERA PARTE

12. RESULTADOS DE ENSAYO DE LABORATORIO

A continuación, se analizan los resultados de ensayos de desempeño típicos, tales como deformación permanente (APA), rueda de Hamburgo, fatiga y módulo dinámico, con los que se analiza el comportamiento de la mezcla asfáltica para predecir su comportamiento durante la etapa de servicio.

SOBRE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Las deformaciones plásticas son ondulaciones que se forman frecuentemente en sentido longitudinal, específicamente en las huellas por donde circulan los neumáticos sobre el pavimento. También se pueden presentar a lo ancho del pavimento, manifestándose como desplazamiento u ondulaciones de la mezcla. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes² en las capas del pavimento producidas por aplicaciones de

² Ocorre porque el módulo de corte del material no es suficiente para evitar que ocurra deformación angular permanente.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 13 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



carga cíclica provenientes de la circulación de los vehículos. Es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente (Rico A., Del Castillo H., 1992).

Las deformaciones se examinan desde dos puntos de vista: por un lado, las deformaciones excesivas están asociadas a condiciones de falla, y por otro, porque un pavimento deformado puede dejar de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho (Rico A., Del Castillo H., 1992).

El comportamiento de la mezcla asfáltica ante la deformación plástica está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica, calidad de los agregados pétreos empleados para la fabricación de la mezcla, contenido de aire inicial³ in situ y tipo de tránsito. Por ello, se necesita que la mezcla esté elaborada con un ligante asfáltico resistente, que a temperaturas relativamente altas se comporte lo más próximo a un sólido elástico. La deformación permanente se reduce conforme aumenta la rigidez del ligante asfáltico, ya que se obtiene una mayor resistencia mecánica de la mezcla. Habitualmente, para obtener asfaltos más rígidos, se recomienda el uso de ligantes asfálticos modificados. Como se detallará más adelante, los asfaltos convencionales AC-30 utilizados en Costa Rica, muestran un comportamiento adecuado a la deformación permanente.

Desde el punto de vista del material pétreo, para reducir la susceptibilidad a la deformación permanente de mezclas asfálticas, se ha observado que influye significativamente la composición granulométrica y la calidad del agregado, mezclas más gruesas, con agregados de mayor tamaño y más cúbicos reducen la susceptibilidad significativamente.

También este tipo de mecanismo de falla está influenciado por las velocidades de operación del tráfico (a menor velocidad más tiempo de carga y mayor susceptibilidad a la deformación permanente).

Observación 1. Las mezclas asfálticas analizadas satisfacen el criterio de deformación permanente utilizado como valor de comparación, el cual se extracta del Cartel de Conservación Vial⁴ para mezclas de alto desempeño.

Mediante el ensayo de susceptibilidad a la deformación permanente efectuado con la norma AASTHO T340 "Deformación con el Analizador de Pavimentos Asfálticos" (APA) se

³ El cual depende directamente de un buen o mal proceso constructivo.

⁴ LICITACIÓN PÚBLICA No. 2014LN-000018-OCV00 "MP y R Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada"

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 14 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



determinaron valores de ahuellamientos para cada una de las mezclas asfálticas ensayadas, esto con el fin de evaluar las propiedades mecánicas y su relación con el mecanismo de falla por deformación permanente.

El ensayo consiste en simular el paso de una rueda cargada con un peso de 100 lb, sobre una manguera con una presión interna de aire de 100 psi, la cual se coloca sobre un espécimen de mezcla asfáltica; el ensayo consta de 8000 ciclos. Como parámetro de referencia se utilizó la especificación establecida en el cartel de licitación LICITACIÓN PÚBLICA No. 2014LN-000018-0CV00 "MP y R Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada" para evaluar que tan alejados se encuentran los resultados de la mezcla asfáltica convencional con las expectativas de desempeño, en cuanto a susceptibilidad a la deformación permanente. Se utiliza como valor de comparación el mayor criterio de deformación para capas de rodadura (Tipo C), por estar evaluando mezcla asfáltica convencional.

Tabla 5. Requisitos de deformación plástica para mezcla asfáltica por método Marshall.

TABLA A				
REQUISITOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBR				
Parámetro	Método de ensayo	Requisitos		
		Para usar sobre una base en una sola capa	Designación C	Designación D
Deformación plástica luego de 8000 ciclos de carga a 60°C. (2)	AASHTO T 340	≤ 2,5 mm	≤ 3,5 mm	≤ 2,5 mm

A. Mezcla asfáltica de tamaño de 12,5 mm

Los resultados de deformación permanente procedentes del ensayo en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) determinan que de acuerdo con criterios internacionales todos los valores obtenidos de deformación plástica reflejan mezclas asfálticas con un buen comportamiento a la deformación permanente.

Sin embargo, al detallar los resultados obtenidos se determina que las mezclas provenientes de las plantas HSG₁₂ y MG₁₂ son las que muestran la menor deformación de la mezcla con un valor cercano de 1,7 mm; igualmente las mezclas fabricadas en las plantas de QS₁₂, CO₁₂, MB₁₂ y HSA₁₂ muestran un valor aproximado de 2,0 mm en la capacidad de soporte de deformación de la mezcla.



Por otra parte, las mezclas de las plantas de MRC₁₂ y MU₁₂ presentan valores de 2,8 mm y 2,9 mm, respectivamente, en deformación permanente de la mezcla asfáltica.

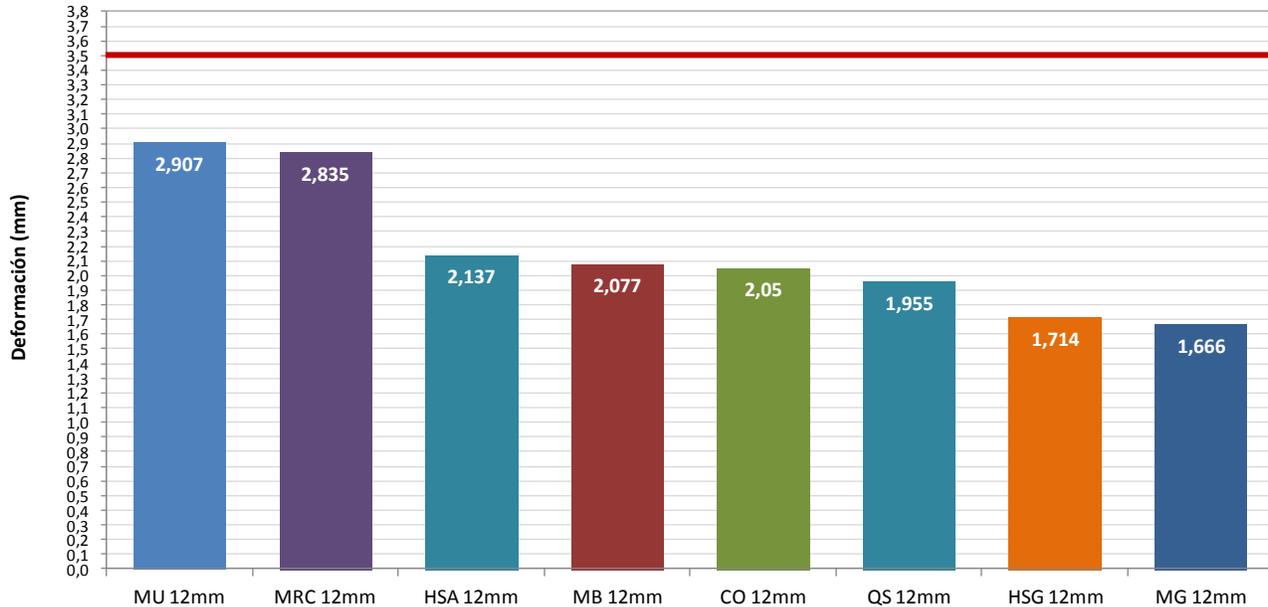


Figura 2. Resultados de deformación permanente para mezcla de tamaño de 12 mm.

B. Mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm

En cuanto al ensayo de deformación permanente en las mezclas asfálticas de 19 mm, los resultados derivados del ensayo en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA), determinan de acuerdo con criterios internacionales, mezclas asfálticas de 19mm con un buen comportamiento a la deformación permanente (ver Figura 3). Este tipo de mezclas asfálticas con tamaño de agregado más grande, son susceptibles a reportar desplazamientos mayores, por el tipo de mecanismo de falla (manguera de diámetro delgado) y la presencia de partículas grandes, que con el movimiento particular de una de ellas, afecta la medición realizada.

Sin embargo, al clasificarlas se nota que las mezclas que muestran una menor deformación son las correspondientes a las plantas de MAZ y QSPZ con valores entre 1,8 mm y 1,9 mm.

Las restantes mezclas de las plantas productoras muestran valores entre 2,464 mm y 2,649 mm para el resultado del ensayo de deformación permanente, ubicándose cercanos al valor especificado en la normativa.

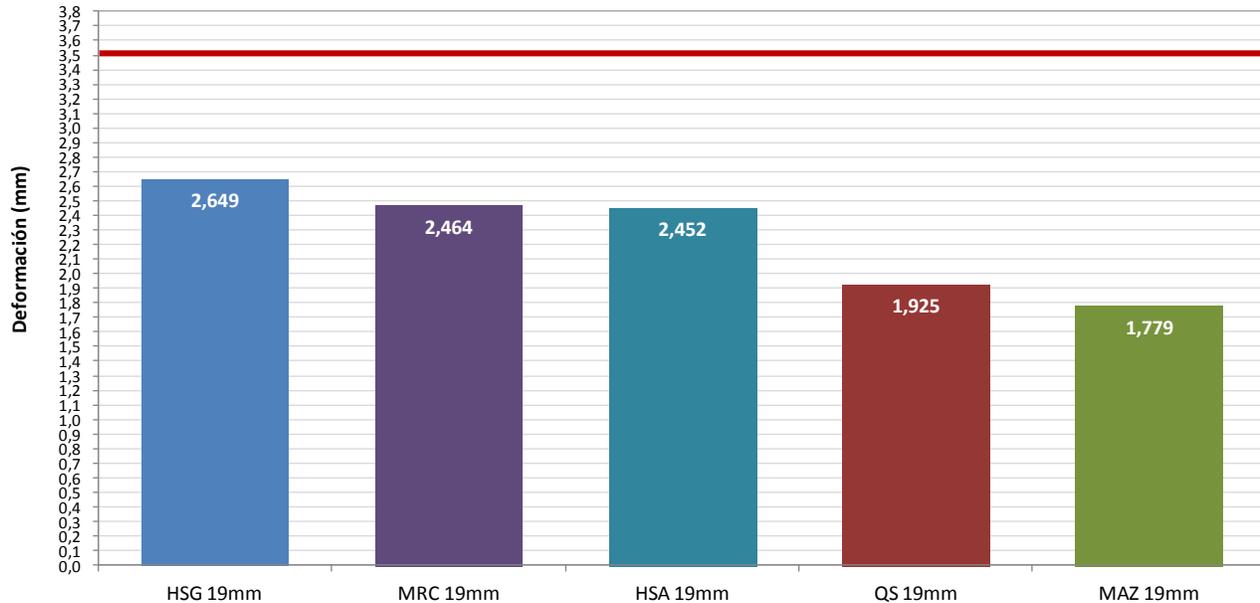


Figura 3. Resultados de deformación permanente para mezcla de tamaño de 19 mm.

C. Comparación de ambos tipos de mezcla

La propuesta de una mezcla asfáltica con agregados de mayor tamaño (tipo 19 mm), conlleva un aumento en la cantidad de partículas grandes, lo que faculta inferir que este tipo de estructura de agregado va a soportar, de mejor manera, la deformación permanente en comparación que una mezcla con agregados de menor tamaño (tipo 12 mm). Sin embargo, como se puntualizó anteriormente las mezclas con agregados de mayor tamaño son más susceptibles a resultados adversos.

Los resultados obtenidos por las mezclas asfálticas analizadas se consideran competentes para el nivel de deformaciones plásticas solicitadas para carpetas asfálticas al comparar con criterios internacionales.

Al realizar la comparación de la deformación permanente para cada uno de los tipos de mezclas asfálticas, se logra determinar que en 3 de los 4 casos de análisis (HSA, HSG y QSPZ) la mezcla de 19 mm presenta una resistencia a la deformación menor o similar a la que presenta la mezcla de 12 mm.

Solamente en el caso de la mezcla de MRC se evidencia un aumento del 15% en la resistencia a la deformación con el uso de una mezcla tipo 12 mm a una de 19 mm.



Figura 4. Resultados de deformación permanente para ambos tipos de mezcla.

Sobre los resultados evidenciados las mezclas asfálticas con granulometrías que contemplan tamaños máximos nominales mayores, presentaron algunas mostraron mayor deformación permanente, particularmente la muestra de HSG.

SOBRE LA DEFORMACIÓN MEDIANTE RUEDA DE HAMBURGO

El ensayo de la Rueda de Hamburgo tiene como finalidad medir la susceptibilidad o el desempeño de una mezcla asfáltica a la deformación permanente y al daño por humedad, de manera simultánea. El ensayo permite identificar mezclas asfálticas con estructura mineral deficiente, que sean susceptibles a la formación de roderas o deformaciones permanentes. También permite identificar si una mezcla es susceptible al daño por humedad permitiendo identificar problemas de adherencia de los agregados pétreos con el ligante asfáltico.

Observación 2. Algunas muestras de las mezclas asfálticas analizadas muestran valores cercanos o superiores al valor de referencia⁵ empleado para deformación permanente mediante el ensayo de deformación "Rueda de Hamburgo".

Durante el ensayo de la Rueda de Hamburgo se aplican 20 000 ciclos o una deformación límite de 20 mm a la muestra de mezcla asfáltica. A manera de criterio de falla de referencia

⁵Especificación tomada de normativa de la Ciudad de Hamburgo.



se utiliza la especificación definida en la ciudad de Hamburgo que es de 4 mm de deformación máxima para autopistas, para considerar que la mezcla cumple con las expectativas de desempeño en cuanto a susceptibilidad a la humedad y deformaciones permanentes. Se considera que ésta normativa es sumamente exigente, por lo que algunos estados de EU (Texas y Colorado) han establecido el límite de la especificación hasta 12,5 mm.

D. Mezcla asfáltica de tamaño de 12,5 mm

Conforme a los resultados de ensayo obtenidos en el ensayo de rueda de Hamburgo que se muestran en la Figura 5 se observa que la mayoría de la mezcla asfáltica de tamaño 12 mm resiste satisfactoriamente la deformación en presencia de humedad, esto demuestra que las mezclas asfálticas analizadas son muy competentes ante el daño por deformación permanente o ahuellamiento.

Se determina que la mezcla de QS₁₂ es la que menor valor reporta, por su parte las plantas CO₁₂, HSG₁₂, MB₁₂ y MRC₁₂ reportan valores entre 2,7 y 3,1 manifestando un comportamiento intermedio de resistencia a la deformación. Por su parte la mezcla de MG₁₂ supera ligeramente el valor de referencia empleado en este análisis, lo que evidencia que todas las muestras analizadas demuestran un excelente comportamiento al ensayo de deformación.

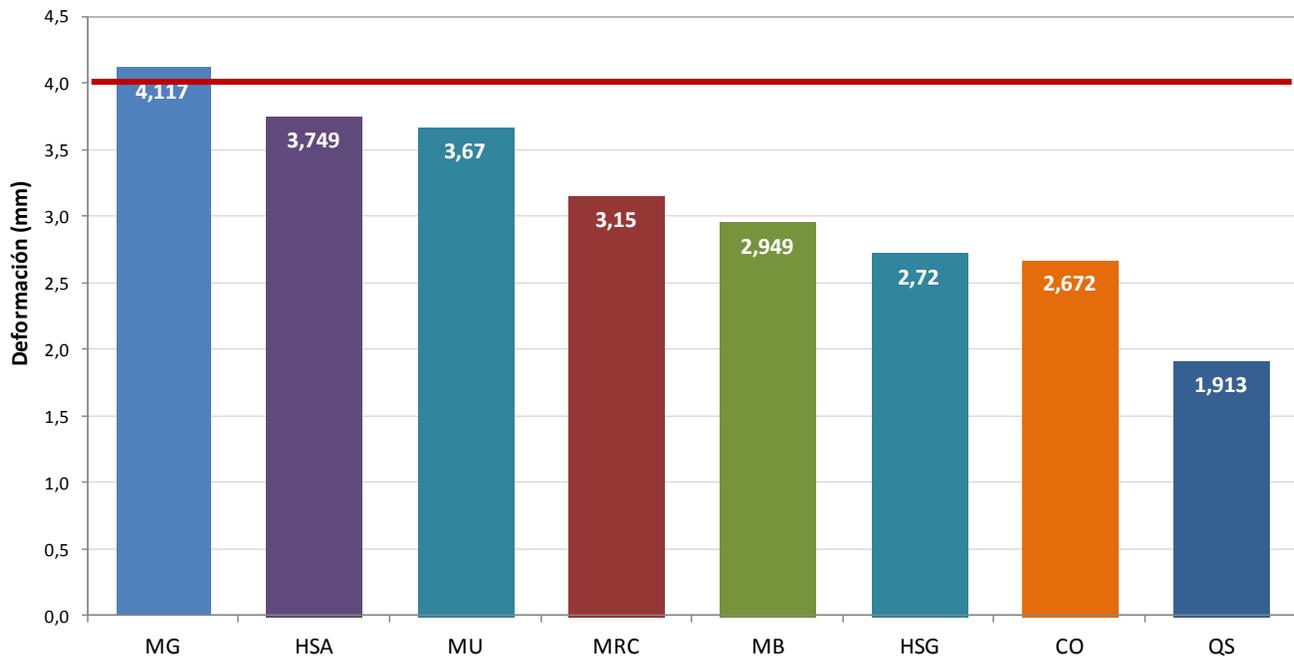


Figura 5. Resultados de Rueda Hamburgo para mezcla de tamaño de 12 mm.



Al contrastar los resultados obtenidos en el ensayo de la rueda de Hamburgo con los resultados de APA, se observa un comportamiento similar en cuanto a deformación de la mezcla asfáltica, para la mayoría de las plantas asfálticas.

Solamente en el caso de la mezcla de MG₁₂ se tiene un comportamiento confrontado, siendo el resultado en APA el de la menor magnitud de deformación permanente, en tanto que en el ensayo de rueda de Hamburgo es la de mayor deformación permanente, lo que podría inducir a que esta mezcla se ve más afectada por las condiciones de este ensayo.

E. Mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm

En cuanto a la mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm los resultados del ensayo de la rueda de Hamburgo se presentan en la Figura 6, en donde se observa que las mezclas de las plantas de HSA₁₂ y MRC₁₂ tienen una deformación mayor a la de la especificación utilizada como referencia. Sin embargo al comparar las mezclas con otros criterios internacionales, la deformación reportada es sumamente competente.

Asimismo, las mezclas de las plantas de QS₁₂, MAZ₁₂ y HSG₁₂ muestran menores deformaciones con resultados entre 2,2 a 3,6 mm para el ensayo de rueda cargada.



Figura 6. Resultados de Rueda de Hamburgo para mezcla de tamaño de 19 mm.



F. Comparación de ambos tipos de mezcla

Al observar los resultados obtenidos por ambos tipos de mezclas se determina que se consiguen niveles apropiados de deformación plástica para el ensayo de la Rueda de Hamburgo. Al comparar los resultados de deformación en presencia de humedad para el ensayo de la rueda de Hamburgo (Figura 7), se determina que a pesar que se observan diferencias entre las mezclas de 12 mm y 19 mm -mayores valores de deformación en 19mm-, se puede considerar que las diferencias se mantienen dentro del rango aceptable por especificaciones internacionales.

Analizando detalladamente se evidencia que para las mezclas fabricadas en los centros de producción de HSA y MRC se evidencian deformaciones superiores en un 60% y 84% respectivamente, entre ambos tipos de mezcla. Por su parte, las mezclas producidas en las plantas de HSG y QS muestran una menor afectación en la deformación, ya que tan solo hay un incremento de 14% para QS, en tanto HSG aumenta en un 34%.

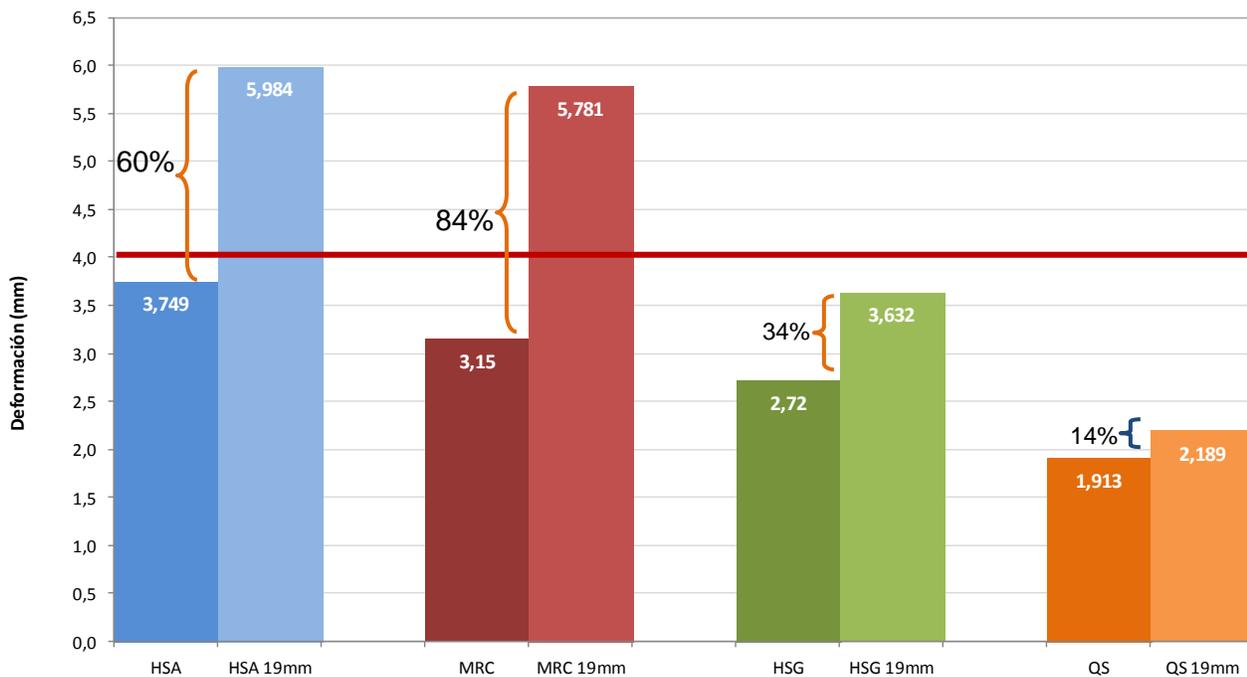


Figura 7. Resultados de Rueda Hamburgo para ambos tipos de mezcla.



SOBRE LA FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El agrietamiento por fatiga se define como un fisuramiento longitudinal a lo largo de la zona de contacto entre la llanta del vehículo y el pavimento (rodera o huella), debido al paso reiterado de cargas de tránsito lo que produce la deflexión de la carpeta produciendo la acumulación del daño por las altas deformaciones a tensión en la parte inferior de esta capa (esfuerzos de tensión), debilitándola continuamente y provocando progresivamente la falla. (Elizondo, F. Jiménez, M. 2013)

Una vez generada la falla tiene implicaciones significativas; a partir de su aparición se presenta un deterioro acelerado de la estructura del pavimento producto del ingreso de la humedad a las distintas capas del pavimento degradando y contaminando los materiales que componen la estructura y finalmente se refleja en la serviciabilidad, el confort, la seguridad y finalmente su vida útil. Este tipo de falla es una de las más comunes en las carreteras de Costa Rica. (Elizondo, F. Jiménez, M. 2013)

Observación 3. Se determina que algunas de las mezclas asfálticas convencionales analizadas cumplen con el requisito que se solicita para la resistencia a la fatiga utilizado como referencia en el análisis y establecido en el Cartel de Conservación Vial⁶ para mezclas asfálticas de alto desempeño.

El ensayo de laboratorio permite estimar la susceptibilidad a la fatiga de una capa del pavimento de MAC que estará sometida a las cargas de tránsito repetitivas, este desempeño se puede predecir ya que existe una relación entre la deformación unitaria a tensión de la parte inferior de una viga de MAC ensayada a flexión y la susceptibilidad a la fatiga.

El ensayo consiste en llevar a la fatiga una viga apoyada en cuatro puntos sometida a flexión pura (AASHTO T321) mediante la aplicación constante de una deformación unitaria a tensión en la fibra inferior de una viga; la fatiga está definida cuando se alcanza el punto de pérdida de un 50 % de la rigidez inicial. Esta relación observada ha sido asociada al comportamiento del pavimento en servicio, debido a que la deformación a tensión en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_o) está directamente relacionada con el número de repeticiones de carga (ejes) para la aparición de la grieta en el pavimento.

En el cartel de licitación LICITACIÓN PÚBLICA No.2014LN-000018-0CV00 "MP y R Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada" se establece el criterio de fatiga para una mezcla de alto desempeño, al no existir un criterio establecido para mezcla convencional se utiliza -en este estudio- el modelo indicado para cotejar la magnitud que alcanza la mezcla convencional en cuanto al comportamiento a la resistencia a la fatiga considerando capas de rodadura (mezcla Tipo D) tal como se muestra en la Tabla 6.

⁶ LICITACIÓN PÚBLICA No.2014LN-000018-0CV00 "MP y R Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada"

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 22 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



La especificación para el ensayo de falla por fatiga establece lograr una serie de cargas cíclicas que inducen una deformación unitaria constante (400 μ s y 600 μ s) en una viga de mezcla asfáltica, tal como se indica en la Tabla 6. Por lo que los puntos establecidos en la especificación⁷ se pueden representar como una línea recta en un eje logarítmico (Figura 8.a.), por lo que para considerar que una mezcla satisface los criterios de fatiga debe cumplir con ambos requerimientos o en otras palabras si alguno de los resultados se encuentra por debajo de la línea se considera que no se satisfacen los criterios de fatiga.

Para complementar este análisis y ilustrar su determinación, se observa que se establece una figura geométrica formada por la línea mencionada y la proyección hasta el eje horizontal para cada una de las deformaciones unitarias requeridas (400 μ s y 600 μ s), tal como se ejemplifica en la Figura 8.b. Por lo que se puede establecer la diferencia entre el área de la figura geométrica formada con la línea de la especificación y el área formada por la línea del resultado del ensayo a la mezcla asfáltica.

Tabla 6. Requisitos de repeticiones para falla por fatiga mezcla asfáltica de método Marshall.

TABLA A				
REQUISITOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBR				
Parámetro	Método de ensayo	Requisitos		
		Para usar sobre una base en una sola capa	Designación C	Designación D
Cantidad de repeticiones para la falla por fatiga a 20°C para un nivel de deformación unitaria controlada de:	AASHTO T 321			
400E-6 mm/mm		$\geq 450\ 000$	$\geq 450\ 000$	$\geq 300\ 000$
600 E-6 mm/mm		$\geq 50\ 000$	$\geq 50\ 000$	$\geq 30\ 000$

El plano de la especificación (Figura 8.b. sombreado gris) establece una magnitud del área que se considera el 100%. La figura formada por el resultado de ensayo (figura naranja) establece una correspondencia de "lo que le falta" a la mezcla convencional con relación a la especificación de referencia, lo que se representa con la flecha que en este caso sería un 68%. Por lo tanto, la ubicación de los resultados del ensayo (número de ciclos para la falla para ambas deformaciones) es el área de proporción (32%) con respecto a la especificación (triángulo naranja).

⁷Alcanzar 300.000 repeticiones para una deformación de 400 μ s ó 30.000 repeticiones para una deformación de 600 μ s

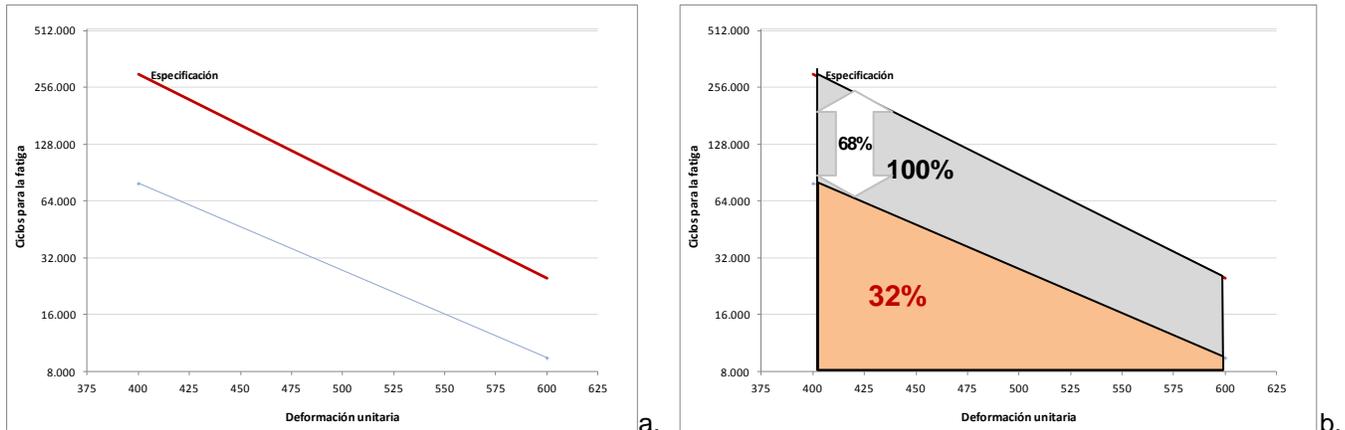


Figura 8. Área de la figura geométrica formada por la especificación de fatiga.

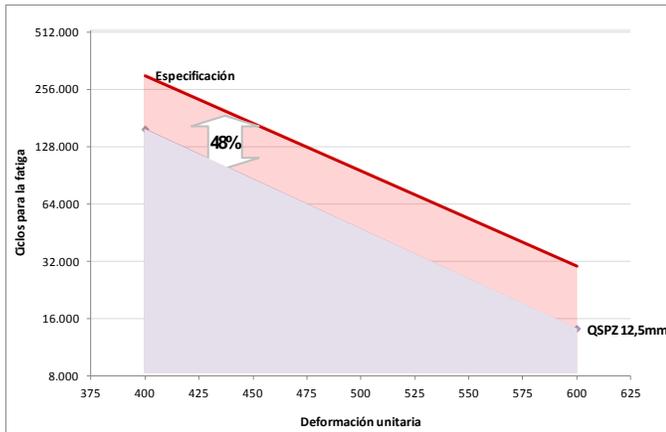
G. Mezcla asfáltica de tamaño de 12,5 mm

Del análisis de los resultados del ensayo a fatiga para la mezcla asfáltica tipo 12 mm se determina que el 94% de los valores individuales (15 de 16) se mantienen por debajo de los requisitos de la especificación establecida para una mezcla asfáltica para capa de rodadura, tal como se presenta en las gráficas a, b, c, d, e, f, g y h de la Figura 10.

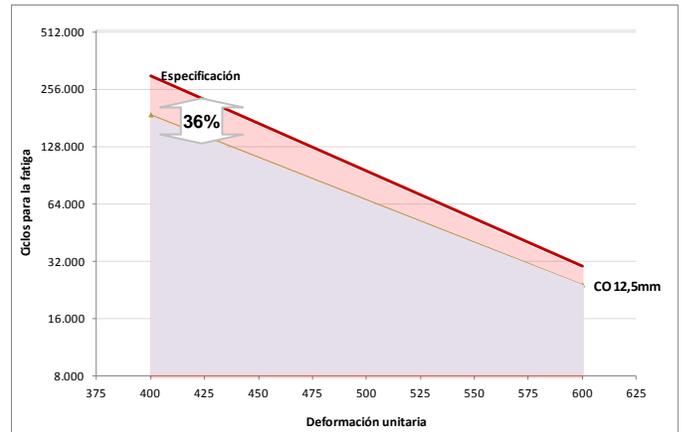
Se observa que para cumplir ambos requisitos -en cuanto a resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas- se requeriría suplir dicha característica en una magnitud aproximada del 42% para las plantas de CO₁₂ y QS₁₂. Por su parte, las plantas de MRC₁₂ MU₁₂ y HSA₁₂ determinan una reducción en la capacidad de resistir fatiga, en aproximadamente un 60%. Las plantas que manifiestan la menor resistencia a la fatiga son las de las plantas MG₁₂ y HSG₁₂ mostrando una reducción en dicha propiedad de aproximadamente el 72%.

Sin embargo, la planta de MB₁₂ (Figura 9(g)) a pesar que no cumple con la especificación señalada para la deformación de 600 μ s (por lo que se considera que esta mezcla no satisface ambos requisitos de deterioro a la fatiga) solamente requeriría aumentar escasamente la capacidad de resistencia a la fatiga, para ser una mezcla de alto desempeño y cumplir de lleno con dicha especificación sin - eventualmente - requerir la modificación de asfalto.

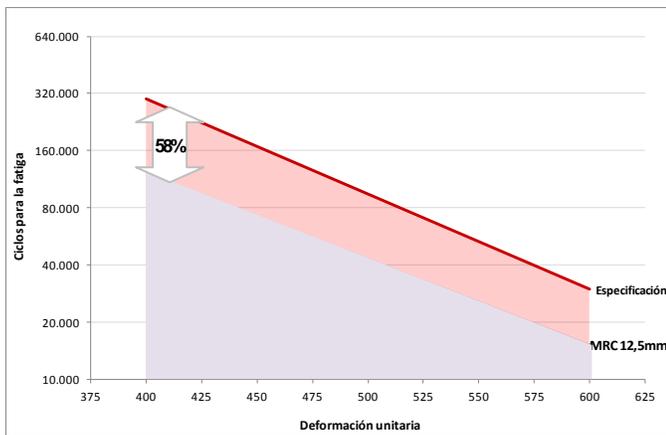
La mayoría de estos resultados obtenidos demuestran una manifiesta susceptibilidad a la fatiga del material lo cual podría incidir en la reducción de la vida útil de las carpetas asfálticas colocadas en los proyectos de conservación vial. Causa de ello podría deberse a los bajos contenidos de asfalto efectivo (Tabla 2), tal como se analizará más adelante.



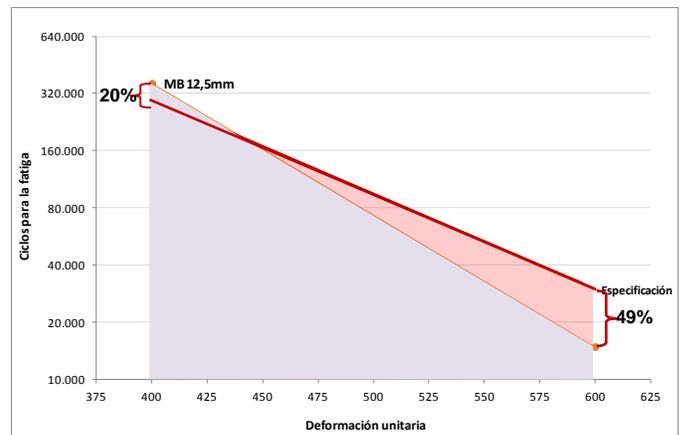
a.



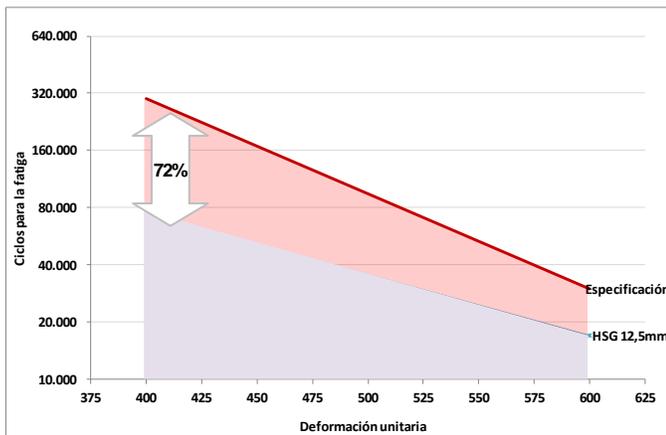
b.



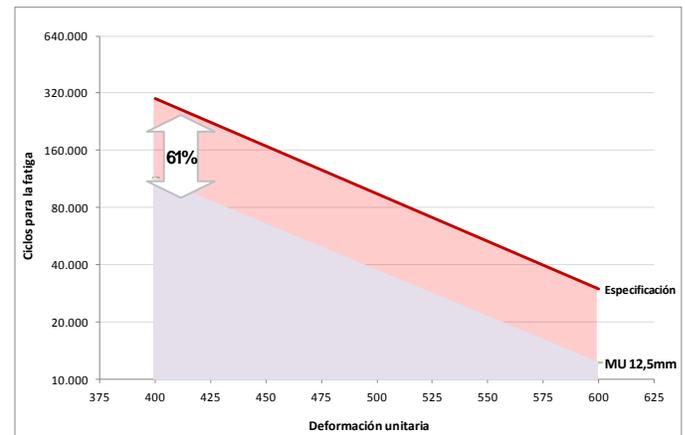
c.



d.

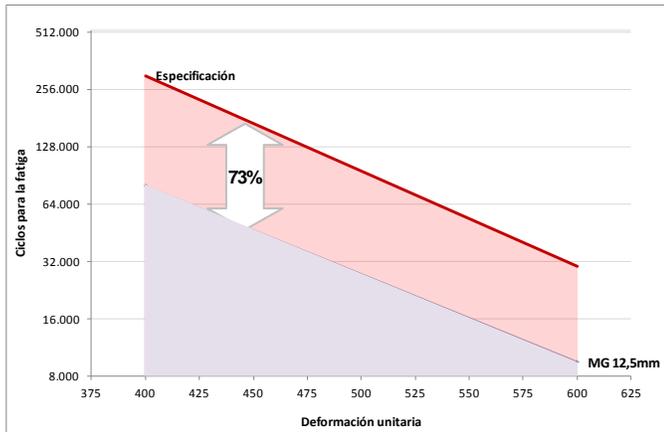


e.

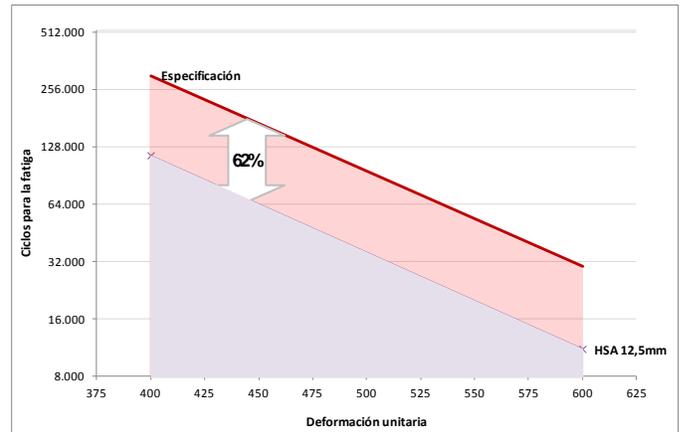


f.

Figura 9. Resultados del ensayo de fatiga para la mezcla de 12,5 mm.



g.



h.

Figura 10(cont). Resultados del ensayo de fatiga para la mezcla de 12,5 mm.

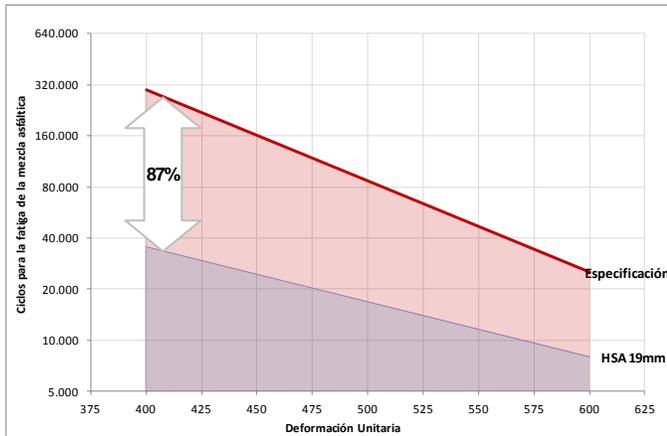
H. Mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm

Respecto a los resultados de capacidad de resistir fatiga obtenidos para la mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm, se evidencia que el 60% de los resultados (6 de 10) se encuentran por debajo de los requisitos de la especificación establecida.

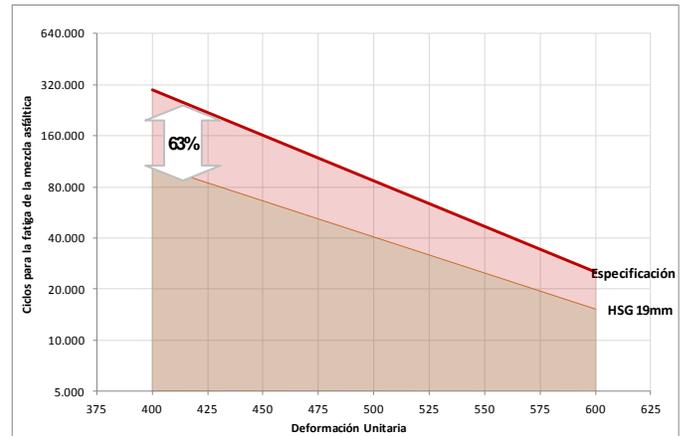
No obstante, se denota que las mezclas producidas en las plantas de MRC₁₉ y QS₁₉ (Figura 10d. y e.) demuestran tener un mejor comportamiento a la resistencia a la fatiga, con una capacidad mayor (16% y 2% respectivamente) a la establecida en la normativa de referencia para soportar la cantidad de repeticiones de carga que producen la falla a fatiga. Se debe recalcar que estas mezclas son producidas con asfalto convencional y que de acuerdo con la información de ensayo de estas mezclas se tiene una baja cantidad de asfalto efectivo como se observa en la Tabla 3.

Por su parte, las mezclas producidas en las plantas de MAZ₁₉, HSG₁₉ y HSA₁₉ presentan una carencia en la capacidad de resistir la fatiga de 31%, 63% y 87%, respectivamente.

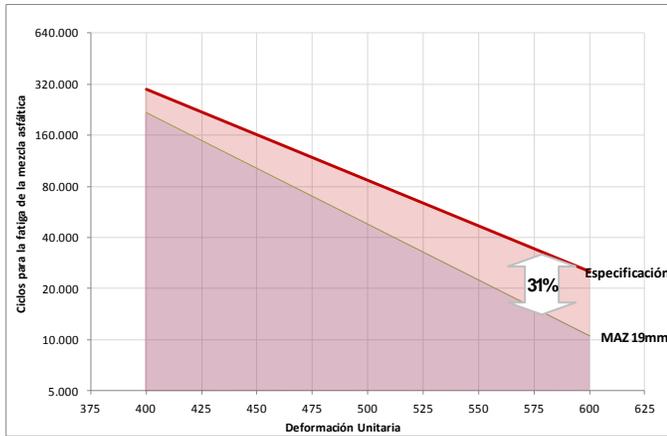
Igualmente, que las mezclas de 12,5 mm, los resultados obtenidos del ensayo de fatiga para mezclas de 19mm evidencian una mezcla asfáltica que será mayormente afectada por este comportamiento, reduciendo la vida útil durante la fase de operación de las capas asfálticas colocadas en los proyectos de conservación vial, ya que no se alcanza la capacidad mínima establecida.



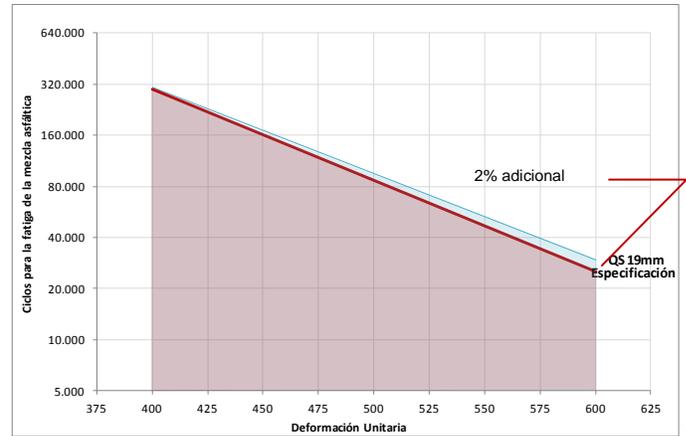
a.



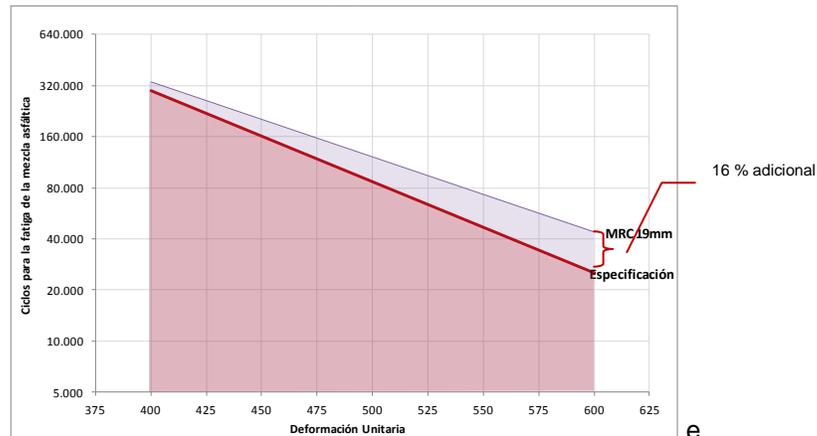
b.



c.



d.



e.

Figura 11. Resultados del ensayo de fatiga para la mezcla de 19 mm.



I. Comparación de ambos tipos de mezcla

Al realizar la comparación de las mezclas asfálticas de tipo de 12,5 mm con las mezclas de 19 mm producidas en los diferentes centros de producción incluidos en el estudio, se observa que en 2 de las 4 plantas evaluadas (MRC y QS), al pasar de 12,5 mm a 19 mm, se produce un aumento en la capacidad para resistir el paso de vehículos (carga) antes de incidir en el proceso de fatiga en la carpeta de ruedo al aumentar el tamaño nominal del agregado en la mezcla asfáltica, tal como se muestra en la Figura 12. b. y c.

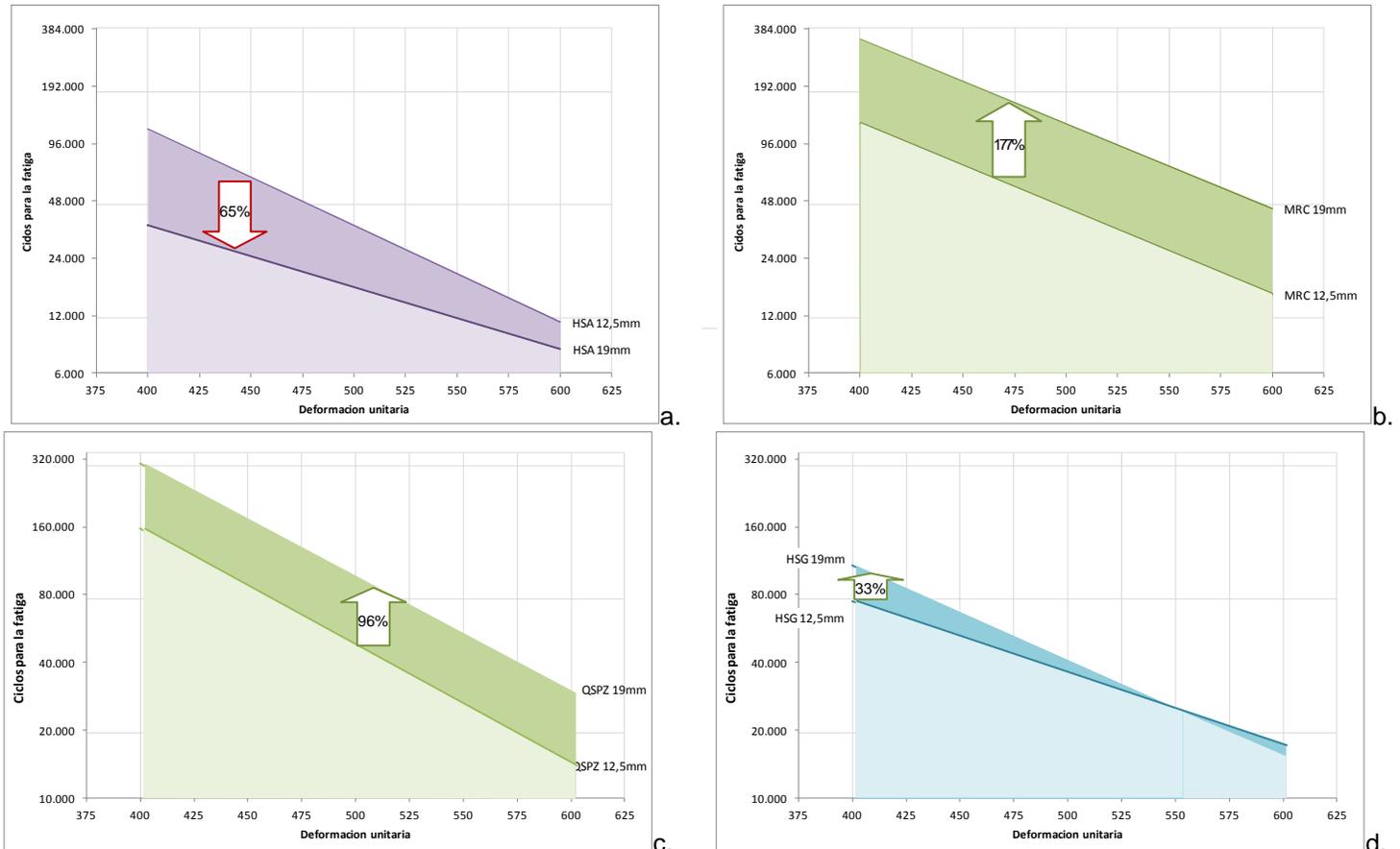


Figura 12. Comparación de resultados del ensayo de fatiga para ambos tipos de mezcla.

Se nota que para las mezclas asfálticas de las plantas de MRC y QS (Figura 12. b. y c.), con el cambio del tipo de mezcla⁸ de 12,5 mm a 19 mm se consigue un aumento sustancial en la resistencia a la fatiga del 177% y 96%, respectivamente. Para el caso de la planta HSG (Figura 12. d.), se hace evidente que el cambio origina un aumento del 33% en la resistencia

⁸ Y un aumento en la relación entre porcentaje de asfalto efectivo en la mezcla y disminución en la cantidad de vacíos (ver tablas 2 y 3)



a este tipo de falla, a pesar que como se determinó en secciones previas no se logra superar la especificación de referencia, porque no se cumplen simultáneamente los dos valores.

Contrariamente, se determina que con el cambio de tipo de mezcla para la planta HSA (Figura 12. a.) el comportamiento de la mezcla asfáltica en cuanto a la resistencia a la fatiga decae, ya que la capacidad de resistir deformación se reduce en un 65% al pasar de una mezcla de 12,5 mm a una de 19 mm, debido a una disminución en la relación entre una menor cantidad de asfalto efectivo disponible en la mezcla y un aumento en el contenido de vacíos.

SOBRE EL MÓDULO DINÁMICO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de la mezcla bituminosa, ya que esta propiedad constituye un gráfico que permite determinar la rigidez de una determinada mezcla asfáltica ante distintas condiciones de temperatura y frecuencia de aplicación de cargas. (Mateos, A. Soares, J. 2015)

Por lo tanto, el módulo dinámico puede emplearse para predecir la respuesta de la estructura del pavimento durante su operación, ante las cargas del tráfico. También se pueden pronosticar las tensiones de la carpeta asfáltica debido a deformaciones atribuidas a agentes ambientales, condiciones de tránsito vehicular y las deformaciones de las capas subyacentes. (Mateos, A. Soares, J. 2015)

De este modo, el módulo dinámico es considerado a nivel internacional desde hace ya mucho tiempo como parámetro de diseño en estructuras de pavimentos, pues permite tener claridad sobre la rigidez de la mezcla asfáltica que será utilizada ante las condiciones particulares del proyecto que se está diseñando.

Mediante el uso de programas de simulación de respuesta en estructuras de multicapa elástica (pavimentos), en complemento con los resultados de módulo dinámico obtenidos para una mezcla asfáltica de interés, es posible determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones que tendrá una determinada estructura de pavimento ante una determinada aplicación de carga. La información de los esfuerzos y deformaciones calculados mediante la aplicación de una carga estándar que simula el eje (80 kN) de un vehículo pesado se puede utilizar para estimar la vida de servicio de cada uno de los materiales que constituye al pavimento mediante la aplicación de un modelo de deterioro. En estos modelos se define la rigidez de cada una de las capas, y en particular para la mezcla asfáltica se utiliza el módulo dinámico como medida de rigidez, teniendo en cuenta la temperatura y frecuencia de aplicación de las cargas características del proyecto.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 29 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



Observación 4. Se evidencia que todas las muestras de mezcla asfáltica fabricadas en las plantas productoras, para ambos tipos de mezcla (12 mm y 19 mm) presentan valores de módulo dinámico mayores a los valores⁹ habitualmente asignados a este material en la metodología de diseño AASHTO 93 para estructuras de pavimentos.

El método que mejor determina la rigidez de la mezcla asfáltica es el ensayo de módulo dinámico (mediante cargas cíclicas a diversas temperaturas y frecuencias de carga), debido a que simula el comportamiento de las zonas específicas de tracción de la mezcla asfáltica las cuales son las responsables de la fatiga de la capa.

Los ensayos de carga cíclica, tratan de reproducir las condiciones de campo. Las condiciones de ensayo concuerdan con la velocidad (amplitud y el tiempo del pulso) de operación de los vehículos y al espesor de la carpeta asfáltica donde se presentan los esfuerzos y deformaciones. La frecuencia depende del espesor de carpeta y la velocidad de tránsito volumen de tráfico.

J. Mezcla asfáltica de tamaño de 12,5 mm

Dada la importancia del módulo dinámico se procedió a realizar estos ensayos a las muestras de mezcla asfáltica estudiadas en el presente informe, donde se prestó atención a la rigidez de las mezclas (en un espesor de 10 cm, figura 15) para una frecuencia de 10 Hz que equivale a una velocidad de 60 km/h y tres temperaturas: una temperatura alta de 34°C, una temperatura intermedia de 25° y una temperatura baja de 10°C.

Los resultados de ensayo de módulo dinámico, para una temperatura de 25°C y una velocidad de 60 km/h, revelan que las mezclas asfálticas de tamaño de 12 mm tienen módulos dinámicos mayores a los 4200 MPa (600 000 psi). De la Figura 13 se puede evidenciar que el valor del módulo es de aproximadamente 5300 MPa (770 000 psi) para las mezclas producidas en las plantas CO, MG, HSG y QS. Mientras que las mezclas de las plantas MU, HSA y MRC determinan un valor promedio de 4900 MPa (710 000 psi). En tanto que el centro productivo de MB es el que muestra el menor valor en el ensayo de módulo dinámico de 4300 MPa (620 000 psi). Cabe aclarar que el módulo dinámico no necesariamente es un parámetro de desempeño, por lo que no se puede concluir que un valor mayor es necesariamente mejor.

Al comparar estos resultados con el valor de 3100 MPa (450 000 psi) utilizado como módulo de diseño en la mayoría de los diseños de estructuras de carreteras analizados en el informe¹⁰ LM-AT-121-17, se comprueba la afirmación realizada en dicho informe que los

⁹ En el informe LM-AT-121-17 se indica que en la metodología de diseño empleada para determinar los "diseños de estructuras de carreteras" se utiliza un valor conservador de modulo dinámico.

¹⁰ En este informe se analiza la metodología de diseño para estructuras de pavimento, considerando la calidad de la información fundamental hasta si los procedimientos de diseño se aplican adecuadamente.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 30 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



profesionales de diseño utilizan un valor conservador de módulo dinámico en la metodología de diseño empleada, no se tiene claro que el ensayo de laboratorio debe realizarse para obtener un valor fiable de dicha propiedad.

Se considera que al valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica de laboratorio es necesario aplicar un "factor de escala", -ya que el resultado de laboratorio, es mayor al resultado en campo-, por efectuarse el ensayo bajo condiciones controladas. Por lo que, los valores de módulo de las mezclas asfálticas producidas en las plantas asfálticas evaluadas podrían reducirse en alguna magnitud al ser colocado en sitio, sin embargo, se considera que utilizar valores menores de módulos de 3100 MPa (valor máximo que permite AASHTO-93), serían valores conservadores.

Adicionalmente, se debe tener presente que un módulo mayor analizado mediante la metodología Mecanístico Empírica podría ser contraproducente pues desarrollaría susceptibilidad al fisuramiento. Por lo que, se vuelve fundamental la necesidad de caracterizar las mezclas mediante este ensayo de módulo dinámico, para fomentar -en el gremio profesional de vialidad- la migración al modelo mecanístico-empírico y de esta manera poder determinar un valor de módulo razonable de modo que no induzca al material a la fragilidad y por ende a la fatiga.

Eventualmente se debería correlacionar los valores de módulo obtenidos a en laboratorio con el valor que podría tener la capa de mezcla colocada, mediante la técnica de deflectometría de impacto.

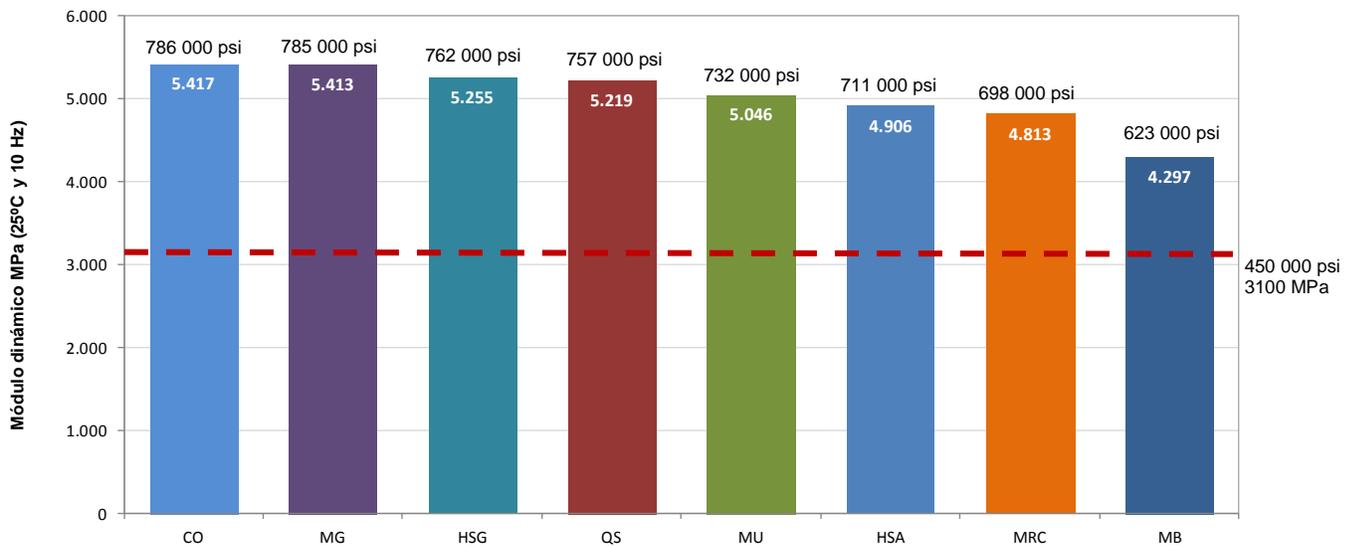


Figura 13. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica de tamaño de 12 mm.



Con el propósito de ilustrar el efecto de la variación en el módulo dinámico en las mezclas asfálticas en el informe LM-AT-121-17, anteriormente mencionado, se efectúa el cálculo de como cambiaría el espesor de la capa asfáltica (manteniendo un mismo paquete estructural) al considerar un incremento de tan solo el 12,5% en el valor del módulo dinámico original. El espesor de la capa asfáltica tendría una reducción de espesor, por el aumento en el valor del módulo, lo que en términos económicos (para el caso analizado en el informe) representaría una reducción de aproximadamente 82 millones de colones, en los costos de construcción.

K. Mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm

Una situación similar se observa en los resultados de ensayo de la mezcla de 19 mm con relación al módulo dinámico reportado en el informe LM-AT-121-17 en donde se evidencia que en los diseños de pavimentos analizados se utiliza como módulo dinámico estándar un valor de 3100 MPa (450 000 psi), el cual es en promedio un 60% menor que los módulos obtenidos en los ensayos realizados a las mezclas asfálticas incluidas en el presente estudio.

Los resultados de ensayo demuestran que las mezclas asfálticas de tamaño de 19 mm obtienen valores de módulo dinámico cercanos a los 5200 MPa (750 000 psi) para las mezclas producidas en las plantas MAZ y QS, mientras que las mezclas de las plantas MRC y HSA determinan un valor promedio de 3900 MPa (570 000 psi), tal como se observa en la Figura 14.

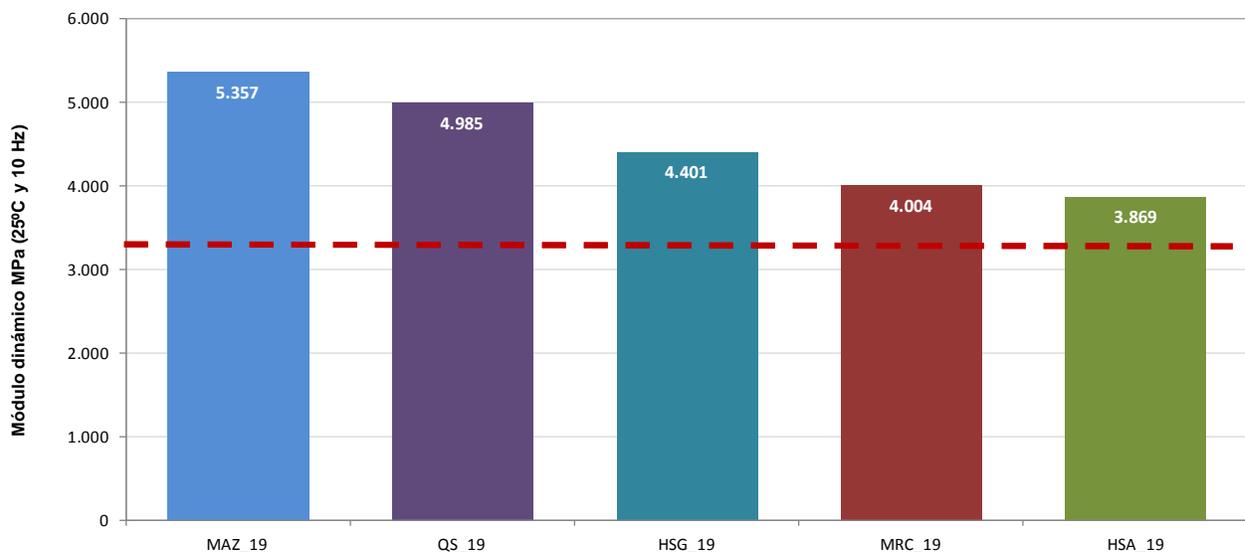


Figura 14. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica de tamaño de 19 mm.



L. Comparación de ambos tipos de mezcla

Con relación al módulo dinámico se denota que las mezclas de 19 mm tienden a mostrar un menor módulo dinámico (Figura 15), que el obtenido en las mezclas de 12 mm, disminuido aproximadamente entre un 20% a 27% para las plantas HSG, HSA y MRC. En tanto que, la planta de QS mantiene el valor del módulo dinámico similar para ambos tipos de mezcla producidos.

Estas variaciones pueden estar asociadas a diferencias en la composición granulométrica de los diferentes tipos de mezclas asfálticas que podría influir en el valor del módulo dinámico o incluso las diferencias en la demanda de contenido de asfalto, como se muestra en las Tablas 2 y 3. Carencias de contenido de asfalto en las mezclas producidas, pueden comprometer el comportamiento de una mezcla asfáltica pasando de una condición de rigidez, a comportarse como una mezcla frágil.

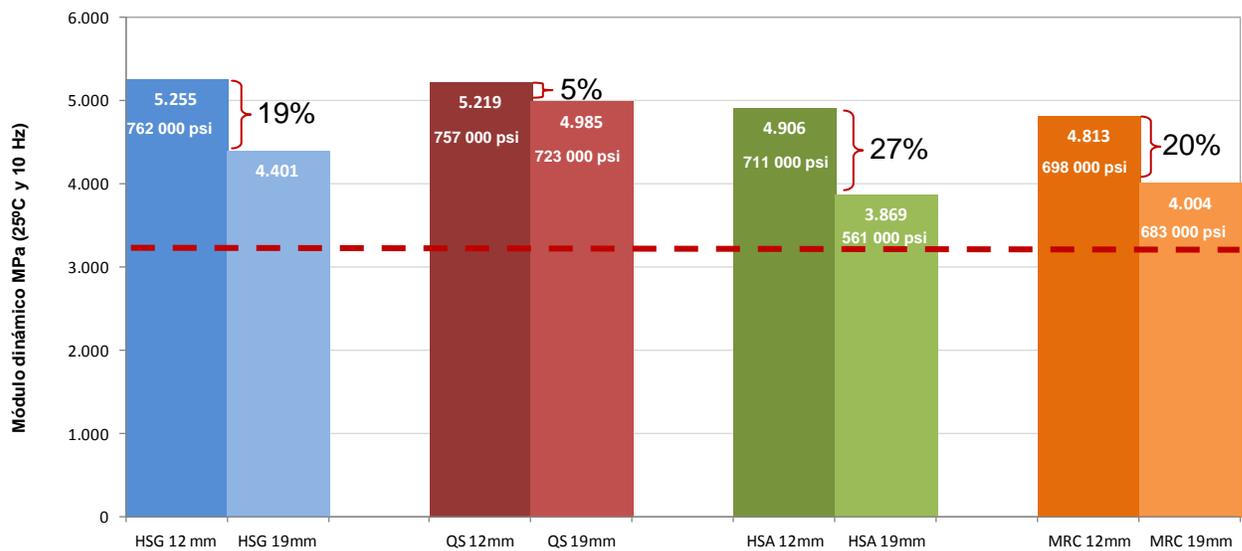


Figura 15. Comparación del módulo dinámico para ambos tipos mezcla asfáltica.



SEGUNDA PARTE

13. ANALISIS MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE DESEMPEÑO DE RESULTADOS

Los ensayos de desempeño que se realizan a la mezcla asfáltica permiten predecir su comportamiento durante la etapa de servicio, en función de la cantidad de tránsito esperado, la velocidad de circulación y el clima, entre otros elementos que se deben considerar. En las secciones siguientes se analizan los resultados de desempeño obtenidos para las mezclas fabricadas en las plantas de producción que se estudian en las secciones precedentes.

Observación 5. Se determina que las mezclas asfálticas analizadas tienen mayor resistencia a la deformación permanente y reducida resistencia para soportar deterioro por fatiga.

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA A LA TEMPERATURA DE DISEÑO (25°C)

Las actuales metodologías de diseño de pavimentos están basadas en principios mecanísticos empíricos, en donde las deformaciones y esfuerzos críticos producidos por las cargas de vehículos y el medio ambiente, son calculados usando la teoría mecanicista. Estos son relacionados empíricamente a los deterioros tales como deformaciones y agrietamientos en el pavimento. La anterior metodología utilizada (AASSHTO 93) está basada en ecuaciones limitadas de desempeño del pavimento. (NCHRP Report 673)

Los actuales modelos de predicción de deterioros han sido calibrados usando gran cantidad de datos, de secciones de pavimento de Norteamérica, lo que lo ha convertido en una potente herramienta de análisis. Además, permite establecer una relación entre las propiedades del material de la MAC y el desempeño del pavimento, que puede ser usado después de que la mezcla se ha diseñado, para verificar si esta puede proveer un desempeño aceptable para el sitio donde se va a colocar. (NCHRP Report 673)

Estas metodologías permiten predecir el desempeño (fatiga, agrietamiento y deformación permanente) de un pavimento incorporando características específicas de una mezcla asfáltica en caliente. Además, permiten diseñar una estructura nueva de pavimento o una rehabilitación de una estructura existente. (NCHRP Report 673)

M. Resistencia de la mezcla asfáltica al agrietamiento

Para efectuar el análisis de desempeño de ambos tipos de mezcla asfáltica (12 mm y 19 mm), se considera que la temperatura de la mezcla asfáltica se mantiene a 25°C, para una velocidad de operación de 60 km/h. Además se establece un paquete estructural típico invariante como se presenta en la Figura 16, considerando únicamente las propiedades particulares de cada una de las mezclas asfálticas producidas en planta y analizadas en el

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 34 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



presente informe, tales como contenido de vacíos, asfalto efectivo y módulo dinámico, entre otras.

10 cm	Carpeta asfáltica módulo = variable	Contenido de vacíos Asfalto efectivo Módulo Dinámico
20 cm	Base Granular módulo = 36,000 psi	
30 cm	Sub base Granular módulo = 15,000 psi	
infinito	Sub rasante módulo = 5,000 psi	

Figura 16. Paquete estructural utilizado para el análisis del desempeño de la MAC

Basándose en esta información, utilizando el software 3D Move y aplicando la metodología de diseño de pavimentos mecanístico-empírica (MEPDG¹¹) indicada en el Anexo A se estima la cantidad de "ciclos de carga vehicular" que se requieren para generar el origen del agrietamiento en la parte inferior de la carpeta asfáltica, tal como se presenta en la Figura 17 a y b.

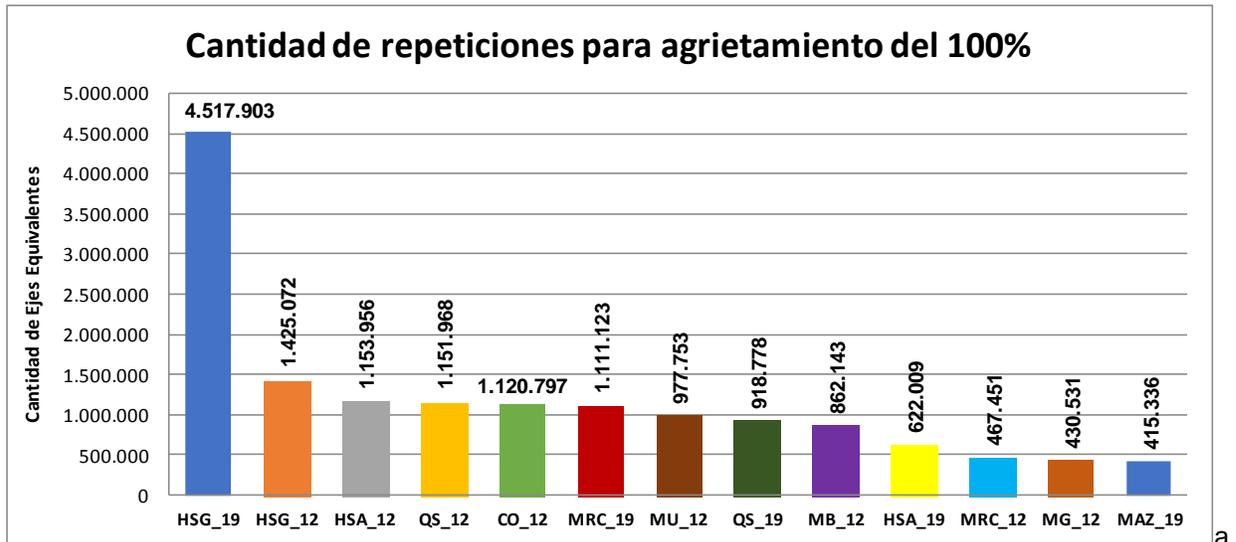
De dichas gráficas se denota que, de acuerdo con las propiedades Marshall específicas de las mezclas asfálticas analizadas (contenido de vacíos y contenido de asfalto, ver Tabla 2) las mezclas que resisten una mayor cantidad de circulación vehicular antes del inicio del deterioro por agrietamiento a fatiga, son las de las plantas de HSG₁₉, HSG₁₂, HSA₁₂, QS₁₂, CO₁₂ y para una temperatura de 25°C. Al analizar los resultados de contenido de vacíos y la cantidad efectiva de ligante asfáltico en la mezcla asfáltica¹², se evidencia que dichas plantas son las que reportan las mayores relaciones¹³ entre ambas propiedades (mayor a 1).

En tanto que las mezclas producidas en las plantas MG₁₂, MAZ₁₉ y MRC₁₂ son las mezclas que presentan una relación cercana a 0,70 entre ambas propiedades, con una tendencia a soportar una menor cantidad de ciclos de carga para que se inicie el agrietamiento en la carpeta asfáltica. Por su parte, las mezclas fabricadas en las plantas MRC₁₉, MB₁₂, MU₁₂, QS₁₉ y HSA₁₉ muestran una condición intermedia (con indicadores entre 0,90 y 0,98) de resistencia de cargas de tránsito, para alcanzar el agrietamiento en la carpeta asfáltica.

¹¹ Guía de Diseño de Pavimentos Mecanístico-Empírica, denominada por sus siglas en inglés MEPDG.

¹² Puesto que el modelo de fatiga es dependiente de estas propiedades.

¹³ Se obtiene de la división " contenido de asfalto efectivo" entre la "cantidad de vacíos" (Relación capacidad = $\frac{\text{asf.efect}}{\% \text{ vacíos}}$).



Resultados de ensayos volumétricos de las mezclas analizadas (ver Tabla 2 y 3)

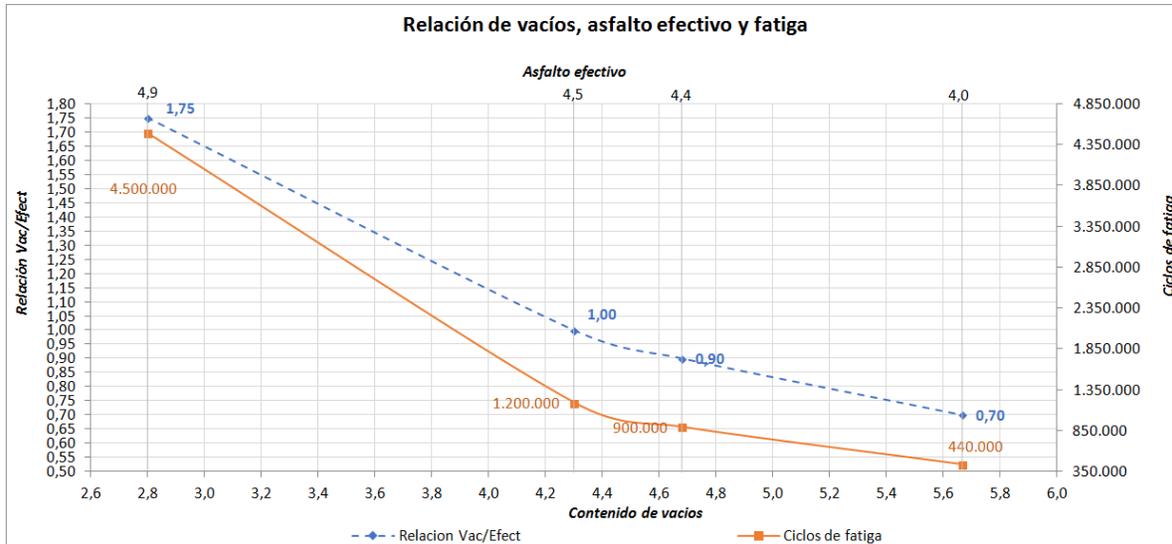
Parámetro	CO_12	HSA_12	HSA_19	HSG_12	HSG_19	MAZ_19	MB_12	MG_12	MRC_12	MRC_19	MU_12	QS_12	QS_19
% Vacíos	4,5	4,7	5,0	3,9	2,8	5,7	4,9	5,5	5,8	4,1	4,3	4,5	4,7
Asf.efectivo	4,4	4,8	4,4	4,2	4,9	3,9	4,7	3,8	4,3	4,4	4,1	4,5	4,4
Relación asf/vac	0,98	1,03	0,88	1,09	1,75	0,69	0,96	0,69	0,75	1,07	0,96	1,00	0,93

Figura 17. Cantidad de ciclos para producir agrietamiento por fatiga en la carpeta asfáltica.

De los resultados de la Figura 18 b. se observa que el contenido promedio de asfalto efectivo para las tres condiciones intermedias es relativamente similar para las mezclas asfálticas, variando tan solo de 4,0% a 4,5% en su mayoría; sin embargo, el contenido de vacíos es el factor que mayor repercusión tiene en la capacidad de resistencia de los ciclos de carga, ya que los valores van desde 2,8% hasta 5,7%, lo que produce que la capacidad de resistencia de ciclos para la fatiga vaya creciendo conforme los vacíos disminuyen.

Al analizar el comportamiento de todos estos parámetros se evidencia que porcentajes de asfalto efectivo cercanos a 5%, bajos contenidos de vacíos y por ende altas valores en la "relación de Va.Cef" (mayores a 1), es la condición donde se obtienen la mayor cantidad de ciclos para alcanzar la fatiga tal como se observa en la Figura 18 b. De hecho, de dicha figura se determina -en términos generales- que con un aumento en la cantidad de asfalto efectivo de 0,4% se consigue una mejora de aproximadamente entre 3 y 4 veces en la capacidad de resistencia a la fatiga en la mezcla asfáltica.

Además, contenidos de vacíos altos, porcentajes de asfalto efectivo de 4% y bajos valores en la "relación de Va.Cef" (cerca de 0,75) favorecen el comienzo del agrietamiento con niveles reducidos de circulación de tránsito, como se evidencia en la Figura 18 b.



a.

Parámetro	% Vacíos	Promedio	Asf.efectivo	Promedio	R.Vac/Efe	Promedio	Valores a 25°C	
							Fatiga	Promedio
HSG_19	2,8	2,8	4,9	4,90	1,75	1,75	4.517.903	4.517.903
HSG_12	3,9	4,3	4,2	4,5	1,09	1,0	1.425.072	1.210.530
MRC_19	4,1		4,4		1,07		1.111.123	
HSA_12	4,7		4,8		1,03		1.153.956	
QSPZ_12	4,5		4,5		1,00		1.151.968	
CO_12	4,5	4,7	4,4	4,4	0,98	0,9	1.120.797	900.296
MB_12	4,9		4,7		0,96		862.143	
MU_12	4,3		4,1		0,96		977.753	
QSPZ_19	4,7		4,4		0,93		918.778	
HSA_19	5,0	5,67	4,4	4,0	0,88	0,70	622.009	437.773
MRC_12	5,8		4,3		0,75		467.451	
MG_12	5,5		3,8		0,69		430.531	
MAZ_19	5,7		3,9		0,69		415.336	

b.

Figura 18. Relación de vacíos y asfalto efectivo con los ciclos para producir fatiga a una temperatura de 25°C para todas las mezclas analizadas.

N. Resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación

Con relación a la cantidad de repeticiones para generar una deformación de 12 mm en la superficie de rodamiento de la carpeta asfáltica, considerando condiciones de velocidad de operación de 60 km/h y una temperatura de 25°C para ambos tipos de mezcla asfáltica (12,5 mm y 19 mm).

Además se consideró un paquete estructural típico invariante como se presenta en la Figura 16, se obtienen los valores de "ciclos de carga vehicular" que se requieren para generar la

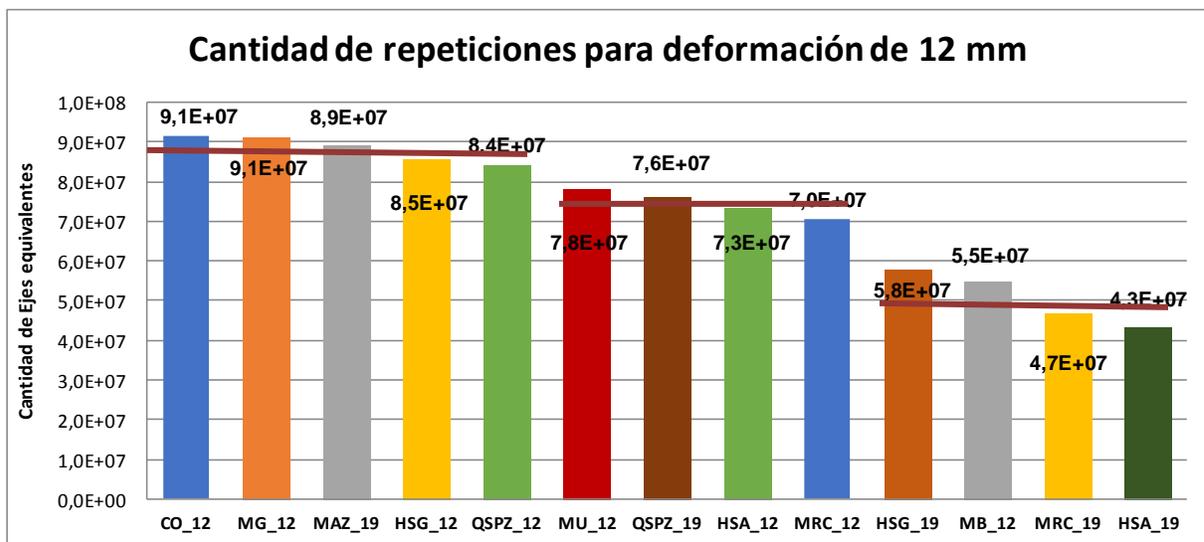
Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 37 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



deformación de 12 mm que se muestran en la Figura 19 a. y b. Para ello se utilizó el software 3D Move, se empleó la metodología de diseño de pavimentos mecanístico-empírica (MEPDG¹⁴) indicada en el Anexo B y se adoptaron las propiedades particulares de cada una de las mezclas asfálticas producidas en planta y analizadas en el presente informe, tales como contenido de vacíos, asfalto efectivo y módulo dinámico, entre otras.

Se observa que las mezclas asfálticas con una cantidad de repeticiones de carga para presentar deformación en la superficie de ruedo cercana a los 90 millones, son las que se producen en CO₁₂, MG₁₂, MAZ₁₉, HSG₁₂ y QS₁₂. En tanto, que las mezclas fabricadas en los centros de producción MU₁₂, QS₁₉, HSA₁₂ y MRC₁₂ muestran una capacidad de soportar alrededor de 75 millones de repeticiones de carga para que se manifiesten desplazamientos en la capa asfáltica.

Las mezclas elaboradas en las plantas HSG₁₉, MB₁₂, MRC₁₉ y HSA₁₉ alcanzan alrededor de 50 millones de ciclos de tránsito vehicular para llegar a presentar deformación en la superficie de ruedo. En esta condición se observa el 60% de las mezclas asfálticas de tamaño granulométrico de 19 mm.



a.

Resultados de ensayos volumétricos de las mezclas analizadas (Tabla 2 y 3)

Parámetro	CO_12	HSA_12	HSA_19	HSG_12	HSG_19	MAZ_19	MB_12	MG_12	MRC_12	MRC_19	MU_12	QS_12	QS_19
% Vacíos	4,5	4,7	5,0	3,9	2,8	5,7	4,9	5,5	5,8	4,1	4,3	4,5	4,7
Asf.efectivo	4,4	4,8	4,4	4,2	4,9	3,9	4,7	3,8	4,3	4,4	4,1	4,5	4,4
Relación asf/vac	0,98	1,03	0,88	1,09	1,75	0,69	0,96	0,69	0,75	1,07	0,96	1,00	0,93

b.

Figura 19. Cantidad de ciclos para producir deformación plástica en la carpeta asfáltica.

¹⁴ Guía de Diseño de Pavimentos Mecanístico-Empírica, denominada por sus siglas en inglés MEPDG.



De la Figura 20 a. se determina que conforme aumenta la "relación de Va.Cef " (incremento de asfalto efectivo) disminuye el potencial de la mezcla asfáltica, para generar una deformación de 12 mm. Con la disminución en una magnitud de 0,1 en dicha relación se pierde un 14% menos de ciclos de carga, esto también representa un aumento al pasar de 4,2% a 4,4% en la cantidad de asfalto efectivo y por ende la reducción en los vacíos de la mezcla en una magnitud de 0,25.

De la información presentada en la Figura 20 b. es posible derivar que un aumento en el módulo dinámico implica un mejor comportamiento ante las deformaciones de la carpeta asfáltica, ya que se logra aumentar en un 35% la cantidad de ciclos al mejorar el módulo dinámico de la mezcla en 600 MPa.

Finalmente se determina que para el espesor de 10 cm de mezcla asfáltica compactada¹⁵ se requiere aproximadamente 10 veces más cantidad de "ciclos de repeticiones de carga" para que se manifiesten una deformación permanente de 12 mm en las capas de ruedo elaboradas con las mezclas asfálticas analizadas, que para que se presente el 100% de daño por fatiga en la carpeta asfáltica.

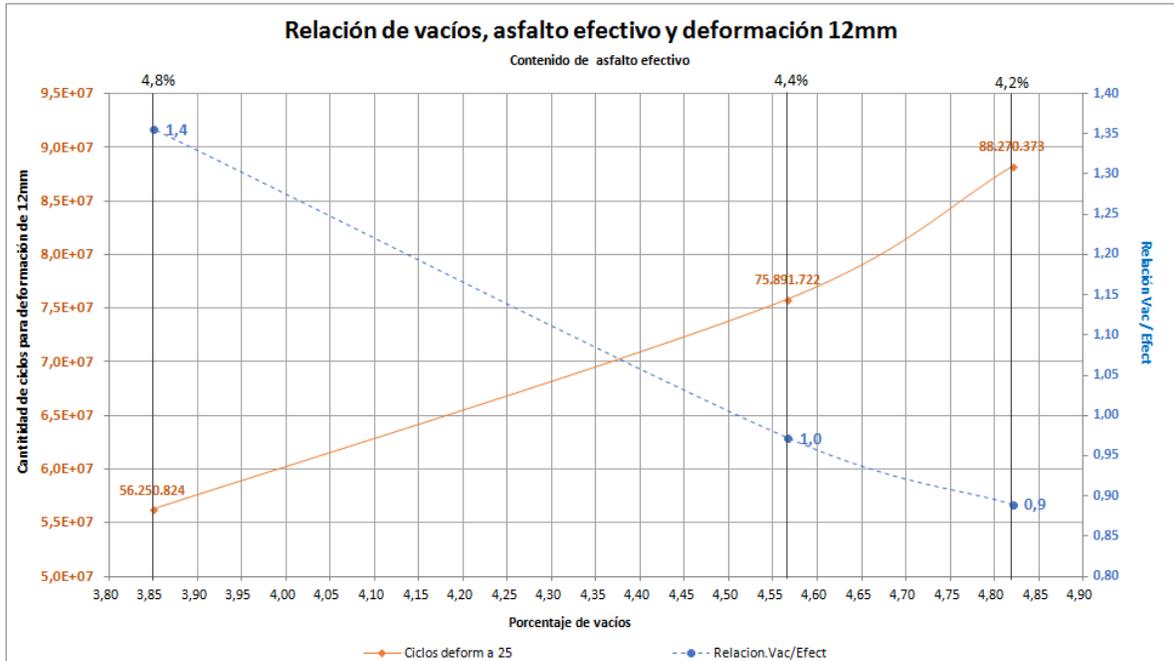
Por lo tanto, teniendo en cuenta que el ensayo se efectuó a una temperatura de 25°C y a una frecuencia de 10hz (60 kph) y se supusieran las condiciones de tránsito y distribución de vehículos que se detallan en el Anexo C, se podría estimar que en un plazo de aproximadamente 4,5 años la carpeta asfáltica llegaría a la condición total de daño. Mientras que, si solamente se viera sujeta a condiciones de deformación, tomaría teóricamente¹⁶ alrededor de 30 años para que se observe una deformación de 12,5 mm.

Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten afirmar que las mezclas asfálticas de conservación vial presenta una mayor susceptibilidad a la falla por fatiga que al mecanismo de falla por deformación permanente. A esto debe sumarse otros aspectos como el daño acelerado por efecto de la lluvia, cargas altas, altas temperaturas y capas inferiores del pavimento en condición débil.

¹⁵ Con las características específicas detalladas en la Tabla 2 para cada una de las mezclas asfálticas.

¹⁶ Después de varios años (5 años máximo) la mezcla se oxida y se rigidiza y el proceso de deformación prácticamente se detiene.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 39 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



a.

Parámetro	% Vacíos	Promedio	Asf.efectivo	Promedio	Relación asf/vac	Promedio	Modulo	Promedio	Valores a 25°C	
									Deformación	Promedio
CO_12	4,5	4,8	4,4	4,2	0,98	0,9	5417,0	5.340	91.369.996	88.270.373
MG_12	5,5		3,8		0,69		5413,0		91.207.641	
MAZ_19	5,7		3,9		0,69		5397,0		89.157.048	
HSG_12	3,9		4,2		1,09		5255,0		85.451.355	
QSPZ_12	4,5		4,5		1,00		5219,0		84.165.824	
MU_12	4,3	4,6	4,1	4,4	0,96	1,0	5046,0	4.979	78.154.459	75.891.722
QSPZ_19	4,7		4,4		0,93		4985,0		76.075.551	
HSA_12	4,7		4,8		1,03		4906,0		73.445.155	
HSG_19	2,8	3,9	4,9	4,8	1,75	1,4	4401,00	4.349	57.747.172	56.250.824
MB_12	4,9		4,7		0,96		4297,0		54.754.476	
MRC_19	4,1	4,6	4,4	4,4	1,07	1,0	4004,0	3.937	46.761.828	45.040.697
HSA_19	5,0		4,4		0,88		3869,0		43.319.567	

b.

Figura 20. Relación de vacíos y asfalto efectivo con los ciclos para producir fatiga a una temperatura de 25°C para todas las mezclas analizadas.



ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA A LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN

Considerando las temperaturas mínimas y máximas para diversas regiones de Costa Rica, se analizan las diferentes mezclas asfálticas ensayadas en el presente informe, con el fin de establecer su posible desempeño y así determinar la capacidad de resistencia que pueden proporcionar bajo estas condiciones de temperatura. Se plantean 2 posibles escenarios, uno de clima caliente en donde la mezcla asfáltica alcance una temperatura ambiente¹⁷ de 34°C considerando lugares como Guanacaste, Pérez Zeledón, Limón, entre otros y otro tipo de clima más templado, en donde se alcance unos 10°C en zonas montañosas tales como Cerro de la Muerte, Zona de los Santos entre otras regiones. Se mantienen las condiciones de velocidad enunciadas en secciones anteriores.

O. Resistencia de la mezcla asfáltica al agrietamiento por fatiga

La aparición del agrietamiento en las carreteras, inicia con la fatiga de la capa asfáltica la cual está estrechamente asociada con la cantidad de vehículos que circulan por ella, pero también se encuentra considerablemente vinculada a la temperatura a la que se vea expuesta durante su vida útil. Entre menor sea la temperatura de la capa asfáltica, ésta es más susceptible a agrietarse, ya que el asfalto se vuelve rígido y potencialmente más quebradizo (frágil), lo que favorece la formación de las grietas.

Al determinar la cantidad de repeticiones de carga que pueden soportar las diferentes mezclas asfálticas estudiadas, se puede establecer que las mezclas de las plantas asfálticas HSG₁₂, QS₁₂, HSA₁₂, MRC₁₉ y CO₁₂ pueden soportar una condición media de 2,5 millones de ciclos (análisis se presenta en el Anexo C) en condiciones de clima templado; por su parte, la mezcla producida en la planta de HSG₁₉ determina una cantidad cercana a los 11 millones de ciclos de carga.

¹⁷ Para efectos de simplificar el análisis y para una posterior comparación, se asume que el pavimento tiene la misma temperatura que la del ambiente y no se realiza el ajuste por temperatura.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 41 de 60
-------------------------	------------------	-----------------

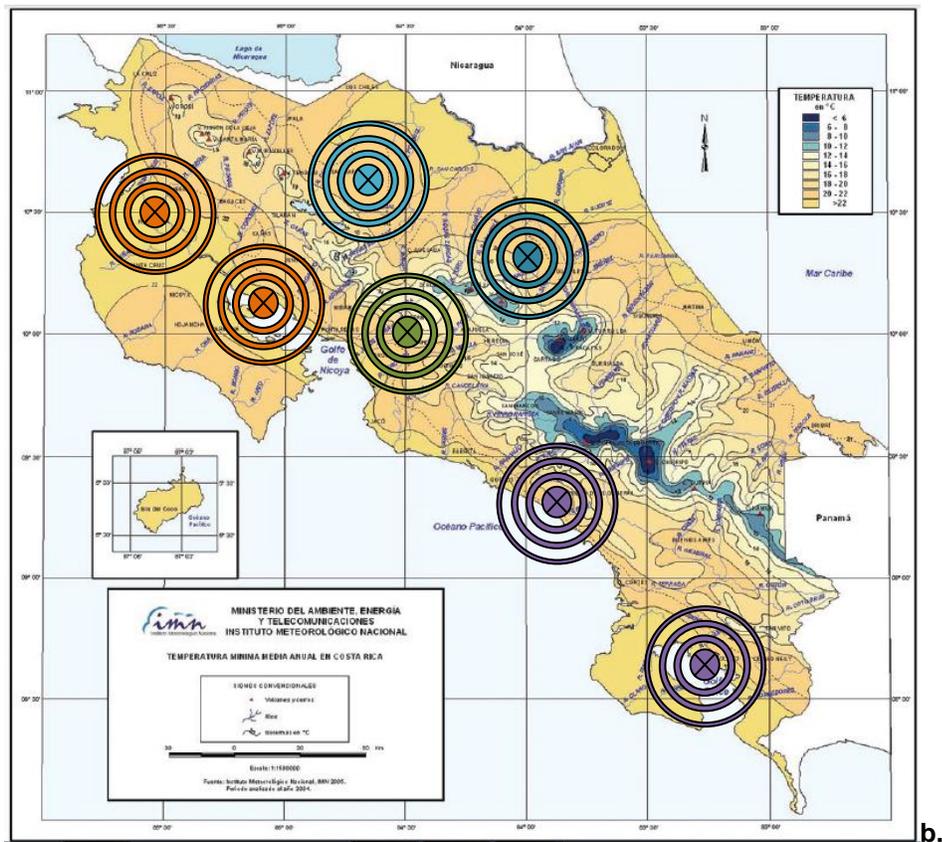
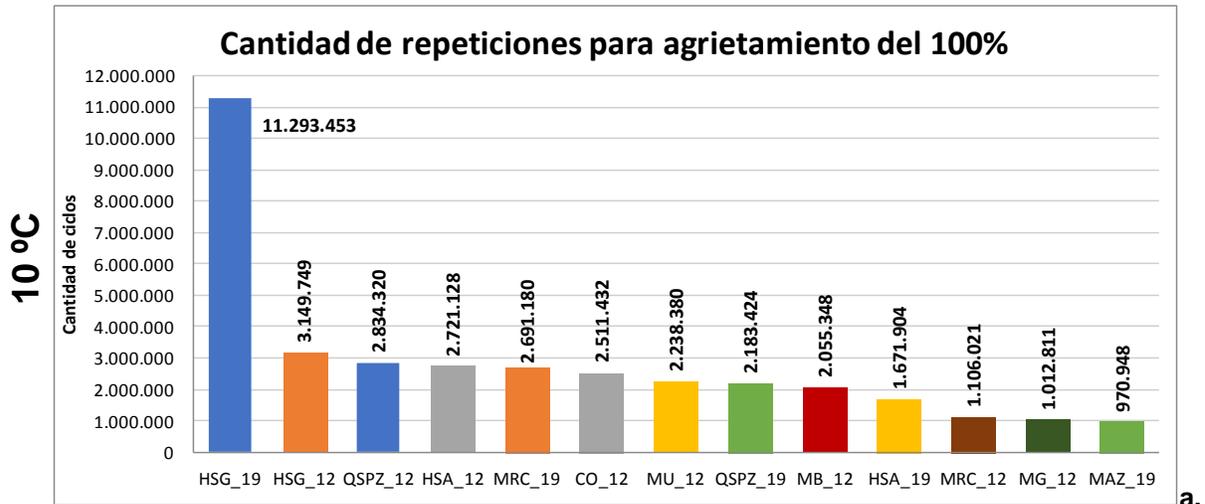


Figura 21. a. Repeticiones para fatiga de la mezcla asfáltica, b. mapa de temperaturas templadas y áreas de influencia por zona para las plantas asfálticas (ver distribución en figura 1).



De las plantas indicadas, las mezclas con mayor posibilidad de verse afectadas por condiciones de baja temperatura son las plantas HSG₁₂, QS₁₂ y CO₁₂ que tienen zonas de influencia con esta condición climática, tal como se muestra en la Figura 21. Según las condiciones de tránsito descritas en el Anexo C, y atribuyendo solamente condiciones de fatiga, se puede establecer una duración entre 2 a 3 años para que las fisuras se presenten. Sin embargo, la mezcla HSA₁₉ que es la que mejores condiciones de resistencia muestra (9 años para la fatiga) a las menores temperaturas a las que se verá sometida es aproximadamente entre 18 a 20°C ya que esta planta suministra regularmente para la provincia de Guanacaste.

Mientras que las mezclas asfálticas MU₁₂, QS₁₉, MB₁₂ y HSA₁₉ muestran una capacidad de repeticiones entre 1,5 a 2,5 millones de ciclos para que se presente la fatiga en condiciones de clima templado, en tanto las mezclas de MRC₁₂, MG₁₂ y MAZ₁₂ están próximas al millón de repeticiones. Las mezclas que se verían afectadas por clima templado MU₁₂ y QS₁₉ (según Figura 21b), para las cuales en un plazo de 1 a 1 ½ año estaría desarrollándose el agrietamiento en la capa asfáltica. Las condiciones de temperatura fría de las restantes mezclas asfálticas (MB₁₂, HSA₁₉, MRC₁₂, MG₁₂ y MAZ₁₂), son de aproximadamente entre 20 a 22°C, lo cual no afecta considerablemente la durabilidad de la mezcla asfáltica.

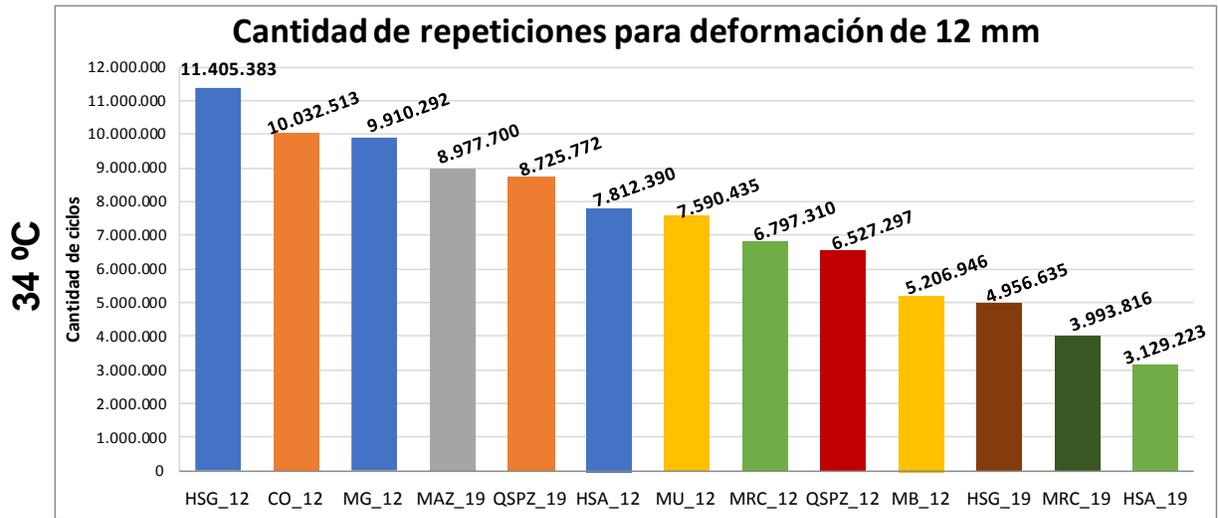
P. Resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación permanente

La deformación de la mezcla asfáltica se puede manifestar en forma de roderas o de desplazamiento de la misma, ya sea por altas cargas de tránsito o por efecto de intensas temperaturas ambientales, ya que temperaturas cercanas a los 40°C son capaces de ablandar el asfalto, y por ende ante cargas estándar, deformar la carpeta asfáltica. Es por ello que se analiza el comportamiento de deformación de las mezclas asfálticas examinadas en el presente informe, ante temperaturas extremas que se pudiesen presentar en el territorio costarricense, tal como se presenta en la Figura 22b.

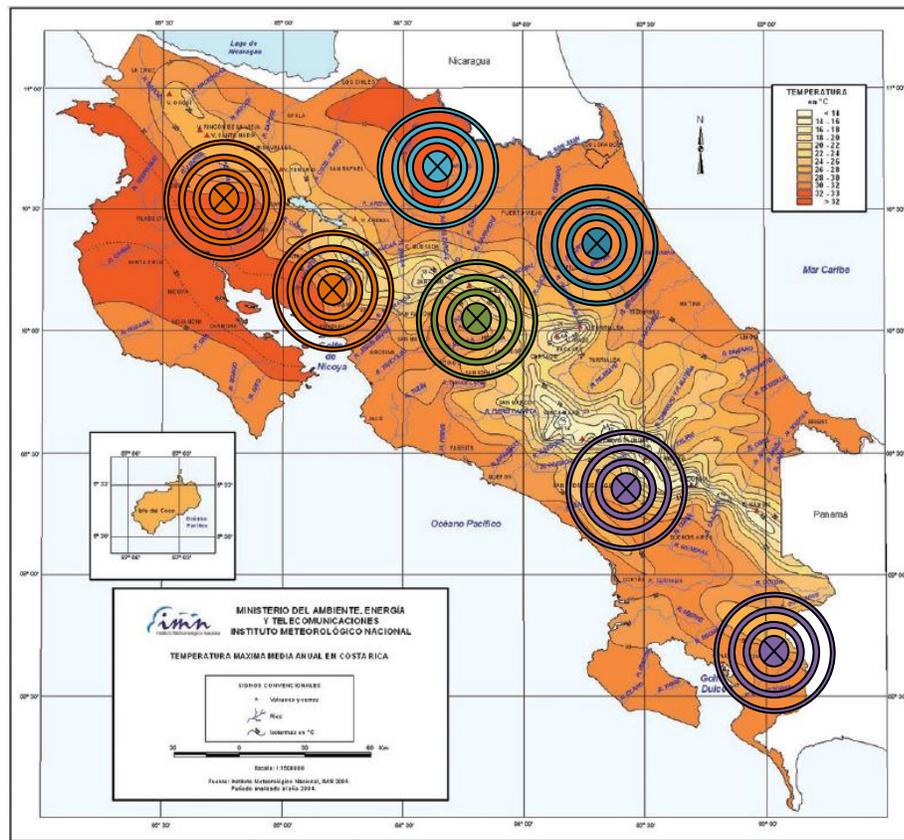
De la Figura 22a. se denota que las mezclas producidas en las plantas HSA₁₉, MRC₁₉, HSG₁₉ y MB₁₂ son las que soportan menos cantidad de repeticiones (entre 3 a 5 millones de ciclos¹⁸) para generar una deformación de 12 mm. También se debe tener en cuenta que todos estos centros de producción despachan mezcla a zonas donde se registran temperaturas altas, en particular hacia la provincia de Guanacaste con temperaturas mayores a 30°C.

¹⁸ Lo cual representa aproximadamente entre 3 y 5 años, para el esquema del Anexo C.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 43 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



a.



b.

Figura 22.a. Cantidad de ciclos para deformación, b. mapa de temperaturas calientes y áreas de influencia según zona para las plantas asfálticas (ver distribución en figura 1).



Por su parte, las mezclas producidas en las plantas QS₁₂, MRC₁₂, MU₁₂, HSA₁₂, QS₁₉ y MAZ₁₉ soportan entre 6,5 y 9 millones de repeticiones para producir una deformación de 12,5 mm, lo que se tardaría una duración de 6 a 8 años bajo el escenario planteado en el Anexo A. Las plantas ubicadas en HSA₁₂ y MAZ₁₉ serían los centros de producción que envían mezcla a regiones con registros de temperatura mayores a 30°C. Las cuatro plantas restantes se verían influenciadas por temperaturas entre las 26 °C a 28 °C para la mayoría de zonas de cobertura para despacho de mezcla asfáltica, tal como se observa en la Figura 22b.

Finalmente, se registran ciclos mayores a los 10 millones para las empresas de manufactura asfáltica MG₁₂, CO₁₂ y HSG₁₂ para mostrar una deformación de 12 mm, lo que representa un periodo de aproximadamente 9 años para que dicho deterioro se manifieste en la carpeta asfáltica. Retarda la aparición de este deterioro, que las zonas de influencia de colocación de esta mezcla tienen temperaturas intermedias 20 °C a 22 °C.

ANÁLISIS GENERAL DEL DESEMPEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Q. Resistencia de la mezcla asfáltica al agrietamiento por fatiga

Tal como se evidenció en secciones precedentes, para los resultados de fatiga y deformación permanente analizados, se logra desarrollar la fatiga en una menor cantidad de ciclos¹⁹ de ensayo, lo cual implica una reducción del tiempo de operación de las carpetas asfálticas manifestando señales de agrietamiento.

Por lo que al recopilar y analizar todos los resultados de los ensayos de fatiga para ambos tipos de mezcla y para las diferentes temperaturas, tal como se detalla en la Tabla 7, se logra establecer que existe una relación evidente entre las propiedades de las mezclas asfálticas (porcentaje de vacíos y contenido de asfalto efectivo) y la capacidad a resistir los ciclos a fatiga de las muestras estudiadas.

Tabla 7. Resultados volumétricos y de fatiga para la mezcla asfáltica en caliente.

Parámetro	% Vacíos	Promedio	Asf.efectivo	Promedio	R.Vac/Efe	Promedio	Valores a 25°C		Valores a 34°C		Valores a 10°C	
							Fatiga	Promedio	Fatiga	Promedio	Fatiga	Promedio
HSG_19	2,8	2,8	4,9	4,90	1,75	1,75	4.517.903	4.517.903	2.645.503	2.645.503	11.293.453	11.293.453
HSG_12	3,9	4,3	4,2	4,5	1,09	1,0	1.425.072	1.210.530	870.443	709.967	3.149.749	2.849.094
MRC_19	4,1		4,4		1,07		1.111.123		677.404		2.691.180	
HSA_12	4,7		4,8		1,03		1.153.956		678.650		2.721.128	
QSPZ_12	4,5		4,5		1,00		1.151.968		613.371		2.834.320	
CO_12	4,5	4,7	4,4	4,4	0,98	0,9	1.120.797	900.296	642.609	528.638	2.511.432	2.132.098
MB_12	4,9		4,7		0,96		862.143		520.379		2.055.348	
MU_12	4,3		4,1		0,96		977.753		556.527		2.238.380	
QSPZ_19	4,7		4,4		0,93		918.778		547.693		2.183.424	
HSA_19	5,0		4,4		0,88		622.009		375.984		1.671.904	
MRC_12	5,8		4,3		0,75		467.451		270.613		1.106.021	
MG_12	5,5	5,67	3,8	4,0	0,69	0,70	430.531	437.773	245.849	249.899	1.012.811	1.029.927
MAZ_19	5,7		3,9		0,69		415.336		233.234		970.948	

¹⁹ Cantidad de ejes equivalentes que está asociado con la circulación de vehículos de diferentes magnitudes.



De la información contenida en la tabla, se puede determinar que conforme la razón existente entre vacíos - asfalto efectivo ($Va.Cef$) incrementa, la cantidad de repeticiones en los ciclos de carga para provocar la fatiga también se acrecienta, tal como se ejemplifica en la Figura 23.

Se hace evidente, en la mayoría de los casos analizados, que conforme la cantidad de asfalto efectivo aumenta, la capacidad de resistencia al agrietamiento incrementa indudablemente (Figura 24). Por lo que al existir una relación inversamente proporcional con el porcentaje de vacíos ($\%Va$), al aumentar el asfalto efectivo ($\%C_{efec}$), los vacíos presentes en la mezcla asfáltica compactada decrecen, tal como se observa en la Figura 23.

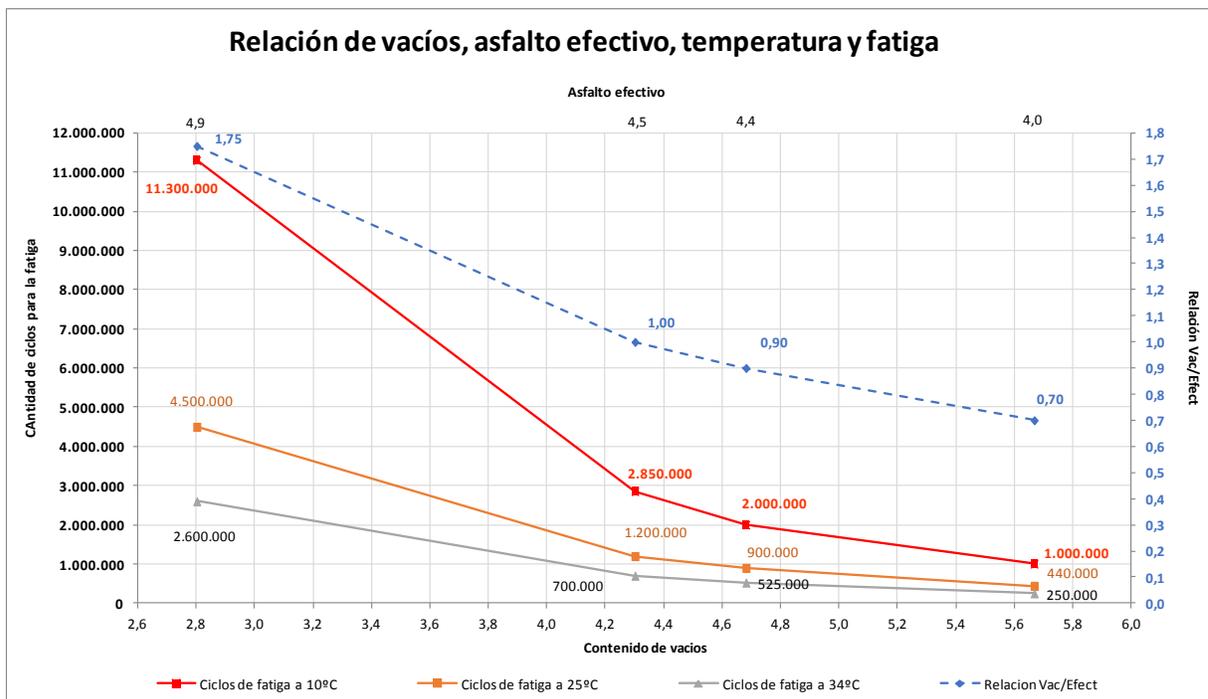


Figura 23. Cantidad de repeticiones de carga para producir la fatiga de la mezcla asfáltica, según porcentaje de vacíos y contenido de asfalto efectivo.

De la misma manera de la información presentada en la Tabla 7, se puede complementar el análisis con la condición de temperatura de la mezcla asfáltica para estudiar la resistencia a la fatiga conforme varía la cantidad de ciclos de carga. Advirtiéndose que conforme la temperatura de la mezcla se incrementa, se disminuye la capacidad de resistencia de carga de la mezcla asfáltica. Además en la Figura 24 es notoria la relación directa entre la cantidad de asfalto efectivo y el aumento en la resistencia ante los ciclos de carga, ya que a mayor cantidad de asfalto efectivo, se observa que en general las mezclas asfálticas estudiadas incrementan la cantidad de ciclos de carga para producir el agrietamiento en la capa de



mezcla asfáltica, independientemente de la condición de temperatura. Este comportamiento, también se ve reflejado por la relación existente entre el porcentaje de vacíos y el asfalto efectivo (%V / %asf._{efec}).

También es evidente que conforme la temperatura en la mezcla asfáltica aumenta, producto de la influencia del medio ambiente, decrece la capacidad de soportar los ciclos de carga vehicular. Lo que revela que pese a que disminuye la temperatura aumenta la resistencia a la fatiga. Esto quiere decir que el efecto de disminución en la deformación unitaria producto del descenso en la temperatura tiene una mayor contribución, respecto al aumento de la rigidez de la mezcla asfáltica que produce fragilidad.

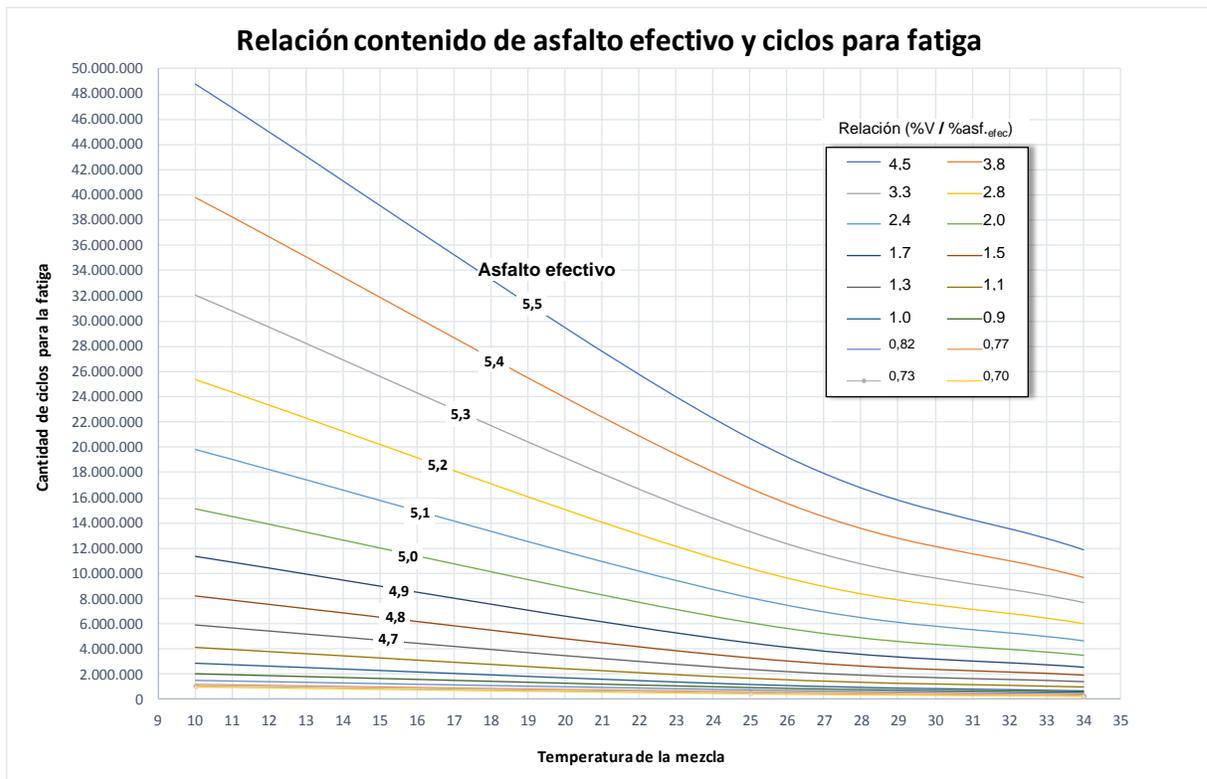


Figura 24. Cantidad de repeticiones de carga para producir la fatiga de la mezcla asfáltica, según porcentaje de vacíos y contenido de asfalto efectivo.

R. Resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación permanente

Respecto a la deformación de la mezcla asfáltica, al agrupar y analizar los resultados obtenidos para todas las mezclas estudiadas, tal como se presenta en la Tabla 8, se logra



establecer una posible relación²⁰ entre algunas de las propiedades físicas y volumétricas de la mezcla, entre estas el porcentaje de vacíos, contenido de asfalto efectivo, módulo dinámico y temperatura con la capacidad de soportar ciclos de carga vehicular que podría ocasionar una deformación de 12 mm en la carpeta asfáltica. Con la finalidad de visualizar de mejor manera esta relación probable se representa en la Figura 22.

Tabla 8. Resultados volumétricos y de deformación para la mezcla asfáltica en caliente.

Parámetro	% Vacíos	Promedio	Asf.efectivo	Promedio	R.Vac/Efe	Promedio	Modulo	Promedio	Valores a 25°C		Valores a 34°C		Valores a 10°C	
									Deformacion	Promedio	Deformacion	Promedio	Deformacion	Promedio
CO_12	4,5	4,8	4,4	4,2	0,98	0,9	5417	5340	91.369.996	88.270.373	10.032.513	9.370.637	1.772.420.965	1.834.466.861
MG_12	5,5		3,8		0,69		5413		91.207.641		9.910.292		1.923.767.750	
MAZ_19	5,7		3,9		0,69		5397		89.157.048		8.977.700		1.871.268.705	
HSG_12	3,9		4,2		1,09		5255		85.451.355		11.405.383		1.646.731.449	
QSPZ_12	4,5	4,5	1,00	5219	84.165.824	6.527.297	1.958.145.437							
MU_12	4,3	4,6	4,1	4,4	0,96	1,0	5046	4979	78.154.459	75.891.722	7.590.435	8.042.866	1.639.112.419	1.668.774.702
QSPZ_19	4,7		4,4		0,93		4985		76.075.551		8.725.772		1.715.944.603	
HSA_12	4,7		4,8		1,03		4906		73.445.155		7.812.390		1.651.267.086	
HSG_19	2,8		3,9		4,9		1,75		4401		4349		57.747.172	
MB_12	4,9	4,7	0,96	4297	54.754.476	5.206.946	1.369.878.544							
MRC_19	4,1	4,6	4,4	4,4	1,07	1,0	4004	3937	46.761.828	45.040.697	3.993.816	3.561.519	1.266.889.086	1.359.897.557
HSA_19	5,0		4,4		0,88		3869		43.319.567		3.129.223		1.452.906.028	

Se logra establecer que conforme el contenido de asfalto efectivo incrementa, se requiere una menor cantidad de repeticiones en los ciclos de carga para provocar la deformación de la mezcla asfáltica. Evidentemente, al aumentar la cantidad de asfalto que recubre las partículas granulares de la mezcla, el porcentaje de vacíos disminuye y por tanto los vacíos en el agregado mineral (VMA) también disminuyen.

²⁰ Basándose en el comportamiento de los datos presentados en la Tabla 8, se establece que existe una tendencia en las tres primeras agrupaciones, sin embargo, el ultimo conjunto muestra una progresión diferente.

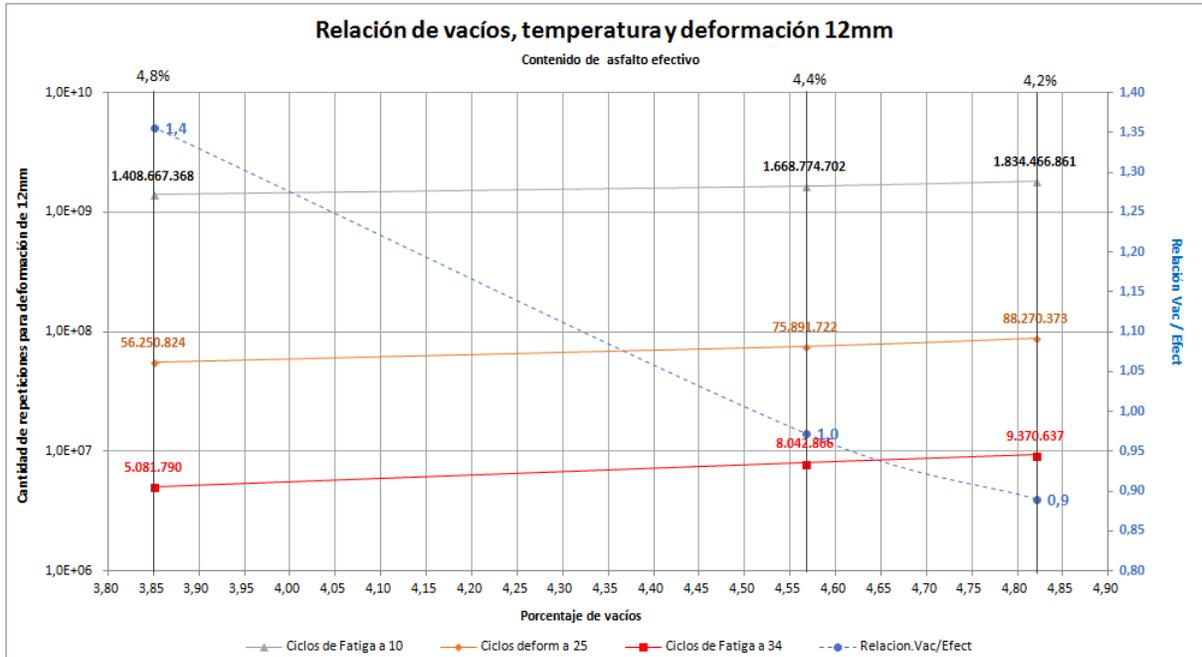


Figura 25. Cantidad de repeticiones de carga para producir una deformación de 12 mm en la mezcla asfáltica, según porcentaje de vacíos, módulo dinámico y contenido de asfalto efectivo.

De la Figura 25 también se advierte que conforme el módulo dinámico incrementa, la mezcla asfáltica desarrolla una mayor capacidad de soportar el paso de vehículos para generar la deformación de la capa asfáltica.

Al analizar el efecto de la temperatura en el comportamiento de la mezcla asfáltica (Figura 26), se logra determinar que según aumenta la temperatura en la capa asfáltica, se reduce la capacidad de resistir ciclos de carga necesarios para producir la deformación de la carpeta, en aproximadamente un 20% por cada grado centígrado de variación de temperatura en la carpeta asfáltica, esto debido a que conforme aumenta la temperatura de la carpeta el asfalto se torna más blando.

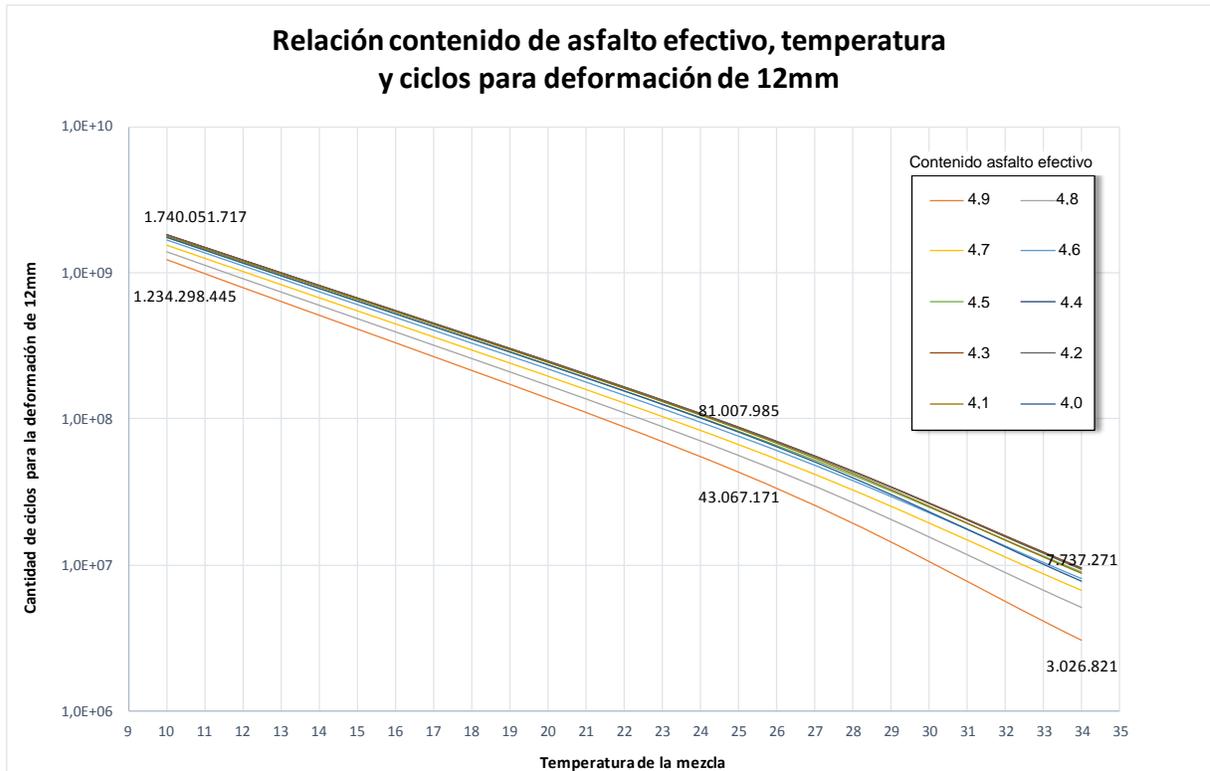


Figura 26. Cantidad de repeticiones de carga para producir una deformación de 12,5 mm en la mezcla asfáltica, según temperatura y contenido de asfalto efectivo.



S. Influencia del contenido de asfalto en el desempeño de la mezcla asfáltica

En las secciones preliminares se ha evidenciado que es notoria la influencia que tiene el contenido de asfalto efectivo²¹ en el desempeño de las mezclas asfálticas producidas en el país para los proyectos de conservación vial.

El aumento en la cantidad de asfalto efectivo genera un incremento en la capacidad de resistir mayor cantidad de ciclos de carga para que se genere el agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica, asimismo se determina que luego de muchos ciclos de carga se podría desarrollar deformación permanente en la mezcla asfáltica. Con base en todos los resultados contenidos en el presente informe, se determina la variación porcentual que se puede producir conforme se varía el contenido de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica, tal como se demuestra en la Figura 27.

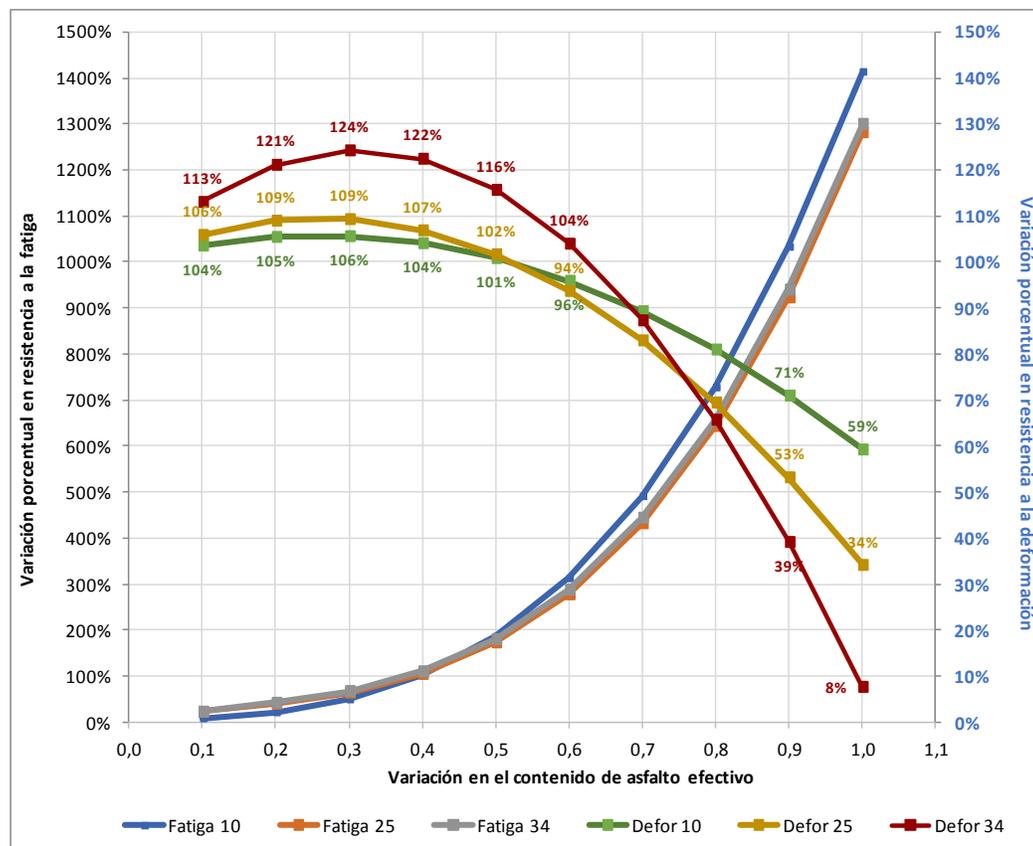


Figura 27. Variación porcentual en la resistencia a la fatiga y deformación permanente de acuerdo con la variación en el contenido de asfalto efectivo.

²¹ Se estima que las mezclas asfálticas estudiadas presentan una absorción de asfalto de alrededor de un 20% del asfalto total adicionado durante la producción de la mezcla.



De la gráfica se establece que con el aumento en el contenido de asfalto efectivo, el parámetro de desempeño que se ve más favorecido es la resistencia a la fatiga; ya que con tan solo aumentar en un 0,4% en la cantidad de asfalto se produce un incremento del 100% en la resistencia a la fatiga.

Por su parte, la resistencia a la deformación permanente no se beneficia en mayor grado con adicionar mayor cantidad de asfalto efectivo, ya que incrementos mayores en la cantidad de asfalto efectivo -entre 0,4% a 1,0%- provocan un descenso abrupto en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica. Sin embargo, se determina que aumentar la cantidad de asfalto efectivo hasta un máximo de 0,3% produce un incremento en la resistencia de los ciclos para producir la deformación (como se ve en la Figura 27).

Es por ello que, tal como se indicó en el informe LM-AT-021-14 emitido a mediados del año 2014, es imperativo aumentar los contenidos óptimos de asfalto que se han venido estableciendo en los "Diseños de Mezcla Asfáltica en Caliente" con el fin de "que los valores de asfalto efectivo aumente" y de esta manera **aumentar la vida a fatiga de los pavimentos** que se construyen tanto con las mezclas asfálticas analizadas en el presente informe, como mezclas asfálticas producidas en otros centros de manufactura, y que forman parte de las principales vías de Costa Rica.

El estado del arte a nivel mundial, con relación a diseño de mezcla asfáltica, establece el concepto de diseño balanceado de mezcla (balance mix design) el cual toma en consideración propiedades de desempeño de la mezcla, ponderando las mejores cualidades de desempeño del material, respecto a resistencia a la fatiga y de deformación permanente. Los resultados obtenidos evidencian que las técnicas de "diseño de mezcla asfáltica" a nivel nacional podrían enfocarse a regenerarse tomando en cuenta estas tendencias mundiales.

Otro aspecto relevante, desde el punto de vista constructivo y de técnicas de mantenimiento de carreteras, es el hecho que se podrían reducir los costos de las intervenciones ya que el costo de corrección de un deterioro de deformación permanente, podría implicar un perfilado y colocación posterior de una sobrecapa asfáltica²². En el caso de un deterioro por fatiga la técnica correcta de corrección es sustituir totalmente la capa o área afectada (lo que es más costoso) pudiendo tener que intervenir posibles daños en capas subyacentes por el ingreso de agua.

²² con la ventaja adicional que estaríamos generando un aporte estructural



14. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados de ensayo obtenidos por el LanammeUCR para las mezclas asfálticas manufacturadas en las diversas plantas asfálticas que se produjeron para los contratos de conservación vial en 2017, se emiten las siguientes conclusiones, con el propósito principal de aportar elementos técnicos a los procesos de mejora continua:

Deformación permanente

- a. En la totalidad de las muestras de mezcla de TM.12,5 mm y de TM.19 mm se obtienen valores mayores a la referencia utilizada para el ensayo de deformación permanente (APA). En comparación con criterios internacionales todos los valores reflejan mezclas asfálticas con un buen comportamiento a la deformación permanente.
- b. El 40% de las muestras ensayadas de 19 mm presentan resultados mayores al valor de referencia utilizado para el ensayo de Rueda de Hamburgo, mostrando ser superiores en deformación permanente, en comparación con las mezclas de 12,5mm, ya que solamente el 13% superan dicho valor. Con referencia a otros criterios generales estas mezclas se consideran con un buen comportamiento a la deformación permanente.
- c. Asimismo, se observa que al aumentar la cantidad de asfalto en la matriz pétreo - consecuentemente los vacíos disminuyen- y la carpeta se vuelve más deformable, ya que con una menor cantidad de ciclos se logra alcanzar la deformación de estudio.
- d. La capacidad de resistencia a la deformación se disminuye aproximadamente en un 20% por cada grado centígrado que aumenta la temperatura de la carpeta asfáltica en las mezclas ensayadas.
- e. Los resultados de los ensayos de desempeño de deformación permanente, evidencian que no se puede establecer diferencias significativas en términos de la utilización de una mezcla de un tamaño nominal mayor. Es decir, no se puede establecer un criterio para seleccionar entre una mezcla asfáltica u otra, según la necesidad de la ruta.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 53 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



Fatiga

- f. Se determina que el 40% de la mezcla de 19mm fabricada con asfalto convencional cumple con los criterios de mezclas de alto desempeño, tipo D. Para la mezcla de 12,5mm se tienen una tendencia que, si se aumentara la cantidad de asfalto, el 13% del producto fabricado lograría ser mezcla de alto desempeño, tipo D.
- g. Se evidencia que existe una relación directa entre la cantidad de asfalto efectivo presente y el contenido de vacíos en la mezcla, con la cantidad de ciclos que puede soportar una capa asfáltica, antes de alcanzar la fatiga. Por lo que al aumentar el asfalto efectivo en las mezclas asfálticas se logra mejorar la resistencia a la fatiga de las carpetas asfálticas.
- h. El valor de módulo dinámico de las mezclas de 19mm es aproximadamente un 20% menor que el registrado en las mezclas de 12mm.
- i. Se advierte que el valor determinado (valor real) del módulo de las mezclas estudiadas es entre un 60% a 70% mayor al valor de referencia que se utiliza en la metodología AASHTO 93 para el diseño de las capas que componen el paquete estructural.
- j. La metodología de diseño de mezcla asfáltica que se aplica actualmente, considera las mismas condiciones de tipo de asfalto y composición granulométricas para todas las condiciones de temperatura y de carga vehicular imperantes en el país y no permite discriminar las condiciones particulares de cada zona. Por lo que no se logra obtener la mezcla ideal para cada zona del país y para cada condición de tránsito particular.
- k. Se determina que algunas de las mezclas asfálticas con condiciones ventajosas para resistir fatiga (ideales para climas templados), se utilizan en regiones con altas temperaturas. Mientras que mezclas con una excelente resistencia a la deformación permanente (adecuadas para climas calientes) se emplean en zonas donde predominan temperaturas bajas. Lo que evidencia que las mezclas no se ajustan, ni se plantean para las condiciones de trabajo donde van a ser utilizadas. Por ello que, para cumplir con esas condiciones particulares, se deberá modificar el asfalto virgen, aumentando innecesariamente el costo de la mezcla producida, producto de un diseño inadecuado para las condiciones climáticas de la zona donde será colocado.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 54 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



15. RECOMENDACIONES

A continuación, se listan algunas recomendaciones para que sean consideradas por la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes, con el propósito de que se definan e implementen soluciones integrales en los proyectos que ejecuta esta dirección.

- a. Valorar incorporar en las especificaciones un porcentaje de asfalto mínimo que garantice mezclas asfálticas con mayor resistencia a la fatiga en las carpetas asfálticas de las carreteras que se construyen en Costa Rica.
- b. Enfocar la especificación de las mezclas asfálticas que se utilizan para realizar labores de conservación vial desde el punto de vista de fatiga, ya que tan solo con $1/10$ parte de las cargas se puede producir la falla por fatiga del pavimento, en comparación de obtener deformaciones plásticas.
- c. Requerir metodologías de diseño de mezclas asfálticas y de los materiales (metodología de diseño balanceado de mezcla -balance mix design-) que las componen que sean congruentes con las condiciones de cargas de tránsito y clima de la región/zona donde la carpeta asfáltica será colocada, con el fin de que se obtenga un comportamiento adecuado durante el periodo de operación de diseño.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 55 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



16. REFERENCIAS

Aguiar Moya, J. P., & Allen Monge, J. (2004). *Comparación de resistencia al agua y a la deformación permanente en mezclas asfálticas densas y SMA*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: LanammeUCR.

Arias Barrantes, E. (2014). *LM-PI-GM-INF-22-14 "Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico empíricos"*. San Pedro de Montes de Oca, San José: LanammeUCR.

Cervantes Calvo, V. H., & Fonseca Chaves, F. (2017). *LM-PI-AT-154-17 "Evaluación de la mezcla asfáltica producida en diferentes centros de producción para los proyectos viales"*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

CONAVI. (2014). Cartel de Licitación Pública No. 2014LN-000018-0CV00 MP Y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del pavimento de la red vial nacional pavimentada. San José.

Costa, I. M. (2009). *Instituto Meteorológico de Costa "Atlas Climatológico"*. San José, Costa Rica.

Epps, J., Fee, F., Foo, K., & all, a. e. (2011). *NCHRP Report 673 "A manual for desing of hot mix Asphalt"*. Washington D.C, USA: Transportarion Research Board.

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & all, e. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Sanfandila, Querétaro.

Guerrero Aguilera, S., & Herra Gómez, L. D. (2017). *LM-AT-121-17 "Evaluación de parámetros y metodología utilizada en los diseños de pavimentos"*. San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica: LanammeUCR.

Huamán Guerrero, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Leiva Villacorta, F. (2004). *Estudio del Módulo Dinámico complejo de mezclas asfálticas. Desarrollo de curvas maestras*. San Pedro de Montes de Oca, San José: LanammeUCR.

Mateos Moreno, A., & Soares, J. (2015). El módulo dinámico de la mezcla bituminosa: importancia, evaluación y estimación. *Asfalto y Pavimentación*, 64.

MOPT. (2010). *Especificaciones Generales para la construcción de Caminos, Carreteras y Puentes*. San José.

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 56 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



EQUIPO AUDITOR

Preparado por:
Ing. Francisco Fonseca Chaves.
Auditor Técnico

Preparado por:
Ing. Victor Cervantes Calvo.
Auditor Técnico

Preparado por:
Ing. Sergio Guerrero Aguilera.
Auditor Técnico

Preparado por:
Ing. Luis Diego Herra Gómez.
Auditor Técnico

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

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

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



ANEXOS

Anexo A. Metodología para determinar cantidad de ciclos que produce 100% de agrietamiento.

El procedimiento que se plantea a continuación es el recomendado por la MEPDG del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004), y matemáticamente se resume desde la ecuación 1 hasta la ecuación 6, el mismo permite estimar la cantidad de repeticiones de carga (80 KN) necesarias para la falla a fatiga de una mezcla asfáltica.

La ecuación 1 permite estimar la cantidad de repeticiones necesarias para alcanzar un 100% de daño en un pavimento asfáltico.

$$N_f = 0,00432xCxk'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1,281}$$

Ecuación 1

$$C = 10^M$$

Ecuación 2

$$M = 4,84 \left[\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right]$$

Ecuación 3

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 * h_{ac})}}}$$

Ecuación 4

Donde:

- E*: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi).
- ε_t : Deformación por tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica (in/in)
- V_b : Contenido de asfalto efectivo (%).
- V_a : Porcentaje de vacíos (%).
- k'_1 : Parámetro de corrección según tipo de grieta. (Ecuación 4).
- h_{ac} : espesor de carpeta asfáltica (in).
- C: Factor de ajuste de laboratorio a campo. (Ecuación 2 y 3).

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 58 de 60
-------------------------	------------------	-----------------



Anexo B. Metodología para determinar cantidad de ciclos que genera una deformación de 12mm

El procedimiento de cálculo en este apartado se base en las formulas y procedimientos presentes en la "Guía mecanístico- empírica de diseño de pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide MEPDG)" para la deformación permanente de la carpeta asfáltica. Se realiza el cálculo de la cantidad de ejes equivalentes utilizando la ecuación 5. Al ser una ecuación compleja para despejar la variable de interés N (cantidad de ejes) se hace uso de la herramienta "Solver" presente en el software "Microsoft Office Excel 2007".

$$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3,4488 T^{1,5606} N^{0,479244}}$$

Ecuación 5

Donde:

ϵ_p = Deformación plástica acumulada a N repeticiones de carga (in/in).

ϵ_r = Deformación vertical resiliente (in/in).

T = Temperatura de la mezcla (°F).

N = Número de repeticiones de carga.



Anexo C. Metodología para estimación de cantidad de ejes equivalentes.

Para la estimación de los ejes equivalentes se utilizó la información del Cuadro 1, además se considera un porcentaje de distribución direccional de 50%, un porcentaje de utilización del carril de 100% (carretera de dos carriles), una tasa de crecimiento de 6,9% y un TPDA inicial de 9628.

Cuadro 1. Distribución porcentual según el tipo de vehículo y factor camión.

Tipo de vehículo	FC	T%	FC*T%
Liviano	0,000	46,69%	0,000
Pickup	0,012	0,00%	0,000
C2+	0,026	17,17%	0,004
C2	0,465	8,01%	0,037
Bus-C2	1,706	2,98%	0,051
C3	1,098	1,88%	0,021
T3-S2	1,705	23,27%	0,397
T3-S2	0,000	0,00%	0,000
		Sumatoria	0,510

A partir de la información presentada en el Cuadro anterior, se procede a calcular los ejes equivalentes, para distintos periodos de diseño.

$$ESAL \text{ diseño} = TPDA_0 \cdot DS \cdot LDF \cdot 365 \cdot GY \cdot \sum (T \cdot FC)$$

Donde:

T: Porcentaje de camiones del TPD

FC: Factor camión

LDF: Factor de distribución por carril

DS: Factor de distribución direccional

TPDA₀: Tránsito promedio diario al inicio del periodo de diseño

GY: Factor de crecimiento

Además,

$$GY = \frac{(1 + r)^Y - 1}{r}$$

Donde:

r: Tasa de crecimiento

Y: Periodo de diseño

Ejemplo: Ejes equivalentes para un periodo de diseño de 10 años

$$GY = \frac{(1 + r)^Y - 1}{r} = \frac{(1 + 0,069)^{10} - 1}{0,069} = 13,751$$

$$ESAL \text{ diseño} = TPDA_0 \cdot DS \cdot LDF \cdot 365 \cdot GY \cdot \sum (T \cdot FC) = 9628 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 365 \cdot 13,751 \cdot 0,510$$

∴ *ESAL* diseño ≈ 12,32 millones de ejes equivalentes

Informe LM-PI-AT-057-18	noviembre , 2018	Página 60 de 60
-------------------------	------------------	-----------------