



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa De Infraestructura Del Transporte (PITRA)

PROPUESTA:LM-PI-UMP-044-R4

DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Diciembre, 2017

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

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



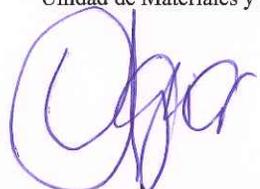
1. Informe REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas		4. Fecha del Informe Noviembre, 2017
4. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
5. Resumen <p><i>Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como "stripping" o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico o "raveling". Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interface agregado-cemento asfáltico.</i></p> <p><i>El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica, así como evaluar el efecto del uso de modificantes y/o aditivos en el desempeño de mezclas asfálticas producidas con materiales típicos del país.</i></p> <p><i>El presente documento presenta el avance del proyecto, comprendiendo los principales resultados obtenidos al mes de noviembre de 2017.</i></p>		
6. Palabras clave Daño por humedad, mezcla asfáltica, desempeño	7. Nivel de seguridad: Ninguno	8. Núm. de páginas 33
10. Preparado por: Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  <hr/> Fecha: 08 / 12 / 17		
11. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  <hr/> Fecha: 08 / 12 / 17		12. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  <hr/> Fecha: 08 / 12 / 17



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
1 INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Objetivo General.....	7
1.2 Objetivos Específicos.....	7
2 METODOLOGÍA Y ALCANCE.....	8
2.1 Selección de Materiales.....	8
2.2 Diseños de Mezcla.....	8
2.3 Ensayos de Laboratorio.....	9
2.3.1 Fase I.....	9
2.3.2 Fase II.....	9
3 RESULTADOS PRELIMINARES.....	9
3.1 Materiales.....	9
3.1.1 Agregados.....	9
3.1.2 Ligante asfáltico.....	12
3.2 Diseños de Mezcla.....	14
4 ENSAYOS DE LABORATORIO.....	18
4.1 Módulo Dinámico.....	19
4.2 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral.....	25
5 CONCLUSIONES.....	31
6 RECOMENDACIONES.....	32
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm.....	15
Figura 2. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm.....	16
Figura 3. Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente A.....	20
Figura 4. Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente B.....	22
Figura 5. Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente C.....	24
Figura 6. Comparación de módulos E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz entre Fuentes.....	25
Figura 7. Resultados de TSR de la Fuente A.....	26
Figura 8. Resultados de TSR de la Fuente B.....	28
Figura 9. Resultados de TSR de la Fuente C.....	30



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente A	10
Tabla 2. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente B	11
Tabla 3. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente C	12
Tabla 4. Propiedades de los asfaltos (Fuentes A y B)	13
Tabla 5. Propiedades de los asfaltos (Fuente C).....	14
Tabla 6. Curvas granulométricas de diseño.....	15
Tabla 7. Propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas	17
Tabla 8. Ensayos de laboratorio de Fase I y Fase II.....	18
Tabla 9. Avance de ensayos de desempeño hasta noviembre de 2017.....	18



RESUMEN EJECUTIVO

Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como “stripping” o “pérdida del recubrimiento” del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico o "raveling". Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interface agregado-cemento asfáltico.

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica, así como evaluar el efecto del uso de modificantes y/o aditivos en el desempeño de mezclas asfálticas producidas con materiales típicos del país.

El presente documento presenta el avance del proyecto, comprendiendo los principales resultados obtenidos al mes de noviembre de 2017.

1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como *stripping* o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados (1). El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (*raveling*). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico.

Para evaluar el daño de la humedad en las mezclas asfálticas existen diversos métodos. Los más utilizados en la mayoría de los países son: 1) el método de ebullición, 2) el método de tensión indirecta, 3) el método de la rueda cargada “Hamburgo” y 4) el método de inmersión-compresión.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 6 de 33
---------------------------	------------------------------------------	----------------



En la actualidad el ensayo modificado de Lottman o método de tensión indirecta (AASHTO T283) es la metodología utilizada para evaluar la susceptibilidad al daño por la presencia de agua en mezclas asfálticas en Costa Rica. Por otra parte, una gran cantidad de departamentos de transportes a nivel internacional cuentan con especificaciones, basadas en los resultados de este ensayo, para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como la incorporación de aditivos que promuevan dicha resistencia (2). Sin embargo, se ha determinado que en ciertos casos este ensayo no ha sido representativo de los resultados obtenidos en campo (3). Más aun, la metodología de ensayo ha sido criticada fuertemente por expertos, en cuanto a la capacidad para reproducir los mecanismos de falla reales de campo (4 - 6).

Aunque el uso de un ensayo como el descrito resulta de fácil aplicación para el practicante, éste puede reflejar resultados erróneos que afecten negativamente el desempeño de una mezcla asfáltica. Para evitar lo anterior se vuelve necesario proceder con una investigación y el desarrollo de un protocolo de ensayo que incorpore los parámetros y condiciones dominantes del daño causado por la presencia de humedad en mezclas asfálticas.

El desarrollo teórico del mecanismo de falla, así como la descripción de los ensayos actuales que buscan simular y predecir el daño por humedad se encuentran desglosados en la sección de Marco Teórico que aparece en el Informe LM-PI-UMP-044-R3. A continuación se presentan un breve esquema del planteamiento del proyecto y se actualizan los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la investigación hasta noviembre de 2017.

1.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica.

1.2 Objetivos Específicos

Los principales objetivos de esta línea de investigación son:

- ❖ Evaluar la resistencia al daño por humedad de mezclas típicas de Costa Rica.
- ❖ Desarrollar especificaciones técnicas para mezclas asfálticas con base en su desempeño.
- ❖ Caracterizar las propiedades y desempeño de mezclas asfálticas producidas con tecnologías de mejoramiento del desempeño.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 7 de 33
---------------------------	------------------------------------------	----------------



2 METODOLOGÍA Y ALCANCE

El cumplimiento de los objetivos abarca el diseño de mezclas que incluyan una variedad de materiales y granulometrías representativas de las mezclas típicas de Costa Rica, considerando además la inclusión de nuevas tecnologías. Posteriormente las mezclas serán sometidas a ensayos de laboratorio para evaluar su desempeño.

2.1 Selección de Materiales

Se seleccionaron 3 fuentes de agregado con diferentes orígenes geológicos y propiedades físicas que históricamente hayan presentado diferentes niveles de resistencia al daño por humedad en campo, provenientes de Barranca, Guápiles y Río Claro. Para cada fuente se realizó diseños de mezcla volumétricos Superpave para 2 granulometrías con tamaños nominales (TMN) de 12.5 y 9.5 mm. Se utilizarán dos fuentes de ligante asfáltico.

Los materiales utilizados serán caracterizados para obtener sus propiedades físicas y mecánicas con el fin de relacionarlas con el desempeño de las mezclas asfálticas.

2.2 Diseños de Mezcla

Con el fin de evaluar el efecto de distintos modificantes o aditivos en la resistencia de las mezclas al daño por humedad, para cada fuente de agregado y granulometría se realizaron diseños de mezcla volumétricos Superpave para las siguientes condiciones:

- ❖ Mezcla sin tratar (control).
- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS.
- ❖ Mezcla tratada con 1% de cal.
- ❖ Mezcla tratada con 0.5% de aditivo antidesnudante (AD).
- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS y tratada con 1% de cal.
- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS y tratada con 0.5% de aditivo antidesnudante (AD).

Estos porcentajes de modificante y aditivos corresponden a contenidos típicamente utilizados para la producción de mezclas asfálticas o recomendadas por los respectivos proveedores. Los contenidos de polímero y aditivo líquido antidesnudante son porcentajes sobre el peso del ligante asfáltico, mientras que para la cal, se trata de un porcentaje sobre el peso del agregado seco.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 8 de 33
---------------------------	------------------------------------------	----------------



2.3 Ensayos de Laboratorio

Las combinaciones descritas en el Apartado 2.2 resultan en un total de 12 mezclas para cada fuente de agregado. La evaluación del desempeño mediante ensayos de laboratorio se realizará en dos fases:

2.3.1 Fase I

Evaluar la susceptibilidad de las mezclas al daño por humedad con las siguientes técnicas:

- ❖ AASHTO T324, Ensayo Rueda de Hamburgo a 50 °C.
- ❖ AASHTO T283, Resistencia Retenida a Tensión Diametral para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP79, Módulo Dinámico para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP79, Flow Number para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

2.3.2 Fase II

Seleccionar las mezclas con mejor desempeño para evaluar resistencia a la deformación permanente en el estado sin envejecer y resistencia al agrietamiento por fatiga con envejecimiento a largo plazo.

3 RESULTADOS PRELIMINARES

A continuación, se resumen los resultados obtenidos a la fecha.

3.1 Materiales

3.1.1 Agregados

A continuación se presentan las fuentes de agregados utilizadas y sus respectivas características.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 9 de 33
---------------------------	------------------------------------------	----------------



3.1.1.1 Fuente A

Agregados provenientes del Tajo Procamar, en Barranca, Puntarenas. El material se encuentra dividido en cuatro apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Granulometrías, densidades brutas (G_b) y aparentes (G_s), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente A

Malla	Apilamiento			
	2265-13	2266-13	2267-13	2268-13
3/4"	100.0	100.0	100.0	100
1/2"	100.0	56.6	100.0	99.2
3/8"	69.7	6.46	100.0	69.1
N° 4	8.2	2.2	82.4	3.4
N° 8	5.4	1.9	55.1	2.07
N° 16	3.9	1.73	37.9	1.71
N° 30	3.0	1.61	27.7	1.55
N° 50	2.5	1.49	20.2	1.41
N° 100	2.0	1.28	14.6	1.25
N° 200	1.6	1.05	10.5	1.06
G_b	2.63	2.65	2.51	2.63
G_s	2.78	2.79	2.78	2.78
% Abs	2.0	1.9	3.9	2.0



3.1.1.2 Fuente B

Agregados provenientes del Tajo de MECO en Guápiles. El material se encuentra dividido en tres apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente B

Malla	Apilamiento		
	1573-15	1574-15	1575-15
3/4"	100.0	100.0	100.0
1/2"	100.0	72.4	99.6
3/8"	100.0	21.6	87.8
N° 4	84.7	4.45	7.33
N° 8	59.1	3.04	3.28
N° 16	40.8	2.68	2.41
N° 30	28.6	2.44	1.94
N° 50	19.8	1.92	1.62
N° 100	13.7	1.25	1.39
N° 200	9.3	1.01	1.17
Gbs	2.59	2.67	2.66
Gsa	2.78	2.78	2.79
% Abs	2.6	1.6	1.7



3.1.1.3 Fuente C

Agregados provenientes del Río Claro. El material se encuentra dividido en cuatro apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente C

Malla	Apilamiento			
	2137-16	2138-16	2139-16	2140-16
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	100.0	99.0	100.0	45.8
3/8"	100.0	39.4	98.3	2.93
N° 4	92.5	1.65	3.92	1.28
N° 8	60.0	1.2	1.93	1.05
N° 16	39.5	0.95	1.43	0.9
N° 30	26.8	0.81	1.18	0.81
N° 50	19.2	0.68	1.03	0.74
N° 100	14.3	0.56	0.91	0.66
N° 200	11.4	0.47	0.79	0.58
<i>Gbs</i>	2.49	2.61	2.60	2.64
<i>Gsa</i>	2.72	2.73	2.72	2.73
<i>% Abs</i>	3.3	1.6	1.7	1.3

3.1.2 Ligante asfáltico

La fuente de ligante asfáltico utilizado para la confección de las mezclas asfálticas con agregados de Fuentes A y B proviene de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) y se clasifica como un asfalto PG 70-22 de acuerdo a su grado de desempeño. Las propiedades de este asfalto base, así como las del asfalto modificado con SBS y tratado con agente líquido antidesnudante se muestran en la Tabla 4.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 12 de 33
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



Tabla 4. Propiedades de los asfaltos (Fuentes A y B)

Propiedad	Base	Base + 2% SBS	Base + 0.5% Antidesnudante
Densidad a 25°C, g/cm ³	1.022	1.021	1.024
Gravedad específica	1.025	1.024	1.027
Viscosidad compleja a 60°C, P	3505	6019	4026
Penetración a 25°C, 1/10 mm	53	39	48
Punto de ablandamiento, °C	49.4	52.95	51.65
Recuperación elástica, %	5.3	75.5	4.7
Grado de desempeño	PG 70 (28) - 22	PG 76 (25) - 22	PG 64 (25) - 22
J _{NR} @ 0.1 kPa (a 70°C)	2.919	1.245	2.605
J _{NR} @ 3.2 kPa (a 70°C)	3.286	1.503	2.975
$(J_{NR@3.2\text{ kPa}} - J_{NR@0.1\text{ kPa}}) / J_{NR@0.1\text{ kPa}}$	12.57	20.71	14.18

Para los resultados mostrados, puede observarse como la adición del polímero SBS tiene un efecto rigidizante en el asfalto base, el cual se ve evidenciado en una mayor viscosidad y un aumento en un grado en la clasificación de acuerdo al grado de desempeño alto. A su vez, los índices de J_{NR} también disminuyeron, mostrando una mayor resistencia a la deformación permanente. Por su parte, la inclusión de agente antidesnudante genera un efecto contrario al generado por el asfalto modificado con SBS.

La fuente de ligante asfáltico utilizado para la confección de la mezclas asfálticas con agregado de Fuente C proviene de la planta productora de MECO ubicada en San José y se clasifica como un asfalto PG 64-22 de acuerdo a su grado de desempeño. Las propiedades del asfalto base, modificado con SBS, tratado con agente líquido antidesnudante y modificado con ambos se muestran en la **Tabla 5**.



Tabla 5. Propiedades de los asfaltos (Fuente C)

Propiedad	Base	Base + SBS	Base + Antidesnudante	Base +SBS+ Antidesnudante
Densidad a 25°C, g/cm ³	1.029	1.028	1.030	1.028
Gravedad específica	1.032	1.031	1.033	1.031
Viscosidad absoluta a 60°C, P	3295	-	3122	5538
Penetración a 25°C, 1/10 mm	51	36	52	45
Punto de ablandamiento, °C	49.70	56.60	49	52.20
Recuperación elástica, %	1	70.2	0	27
Grado de desempeño	PG 64(25)-22	PG 76(25)-22	PG 64(25)-22	PG 70(25)-22
J _{NR} @ 0.1 kPa (a temp. superior)	2.1	4.25	2.3	2.95
J _{NR} @ 3.2 kPa (a temp. superior)	2.3	4.95	2.5	3.45
(J _{NR@3.2 kPa} - J _{NR@.01 kPa})/J _{NR@0.1kPa}	9.5	17.55	9.3	17.15

El asfalto base utilizado en las mezclas con agregado de la Fuente C presenta un grado de desempeño distinto al ligante utilizado para las Fuentes A y B. Esta condición representa la realidad nacional, puesto que existe evidencia de las variaciones en la naturaleza del asfalto que ingresa a RECOPE, de acuerdo a los ensayos de control de calidad realizados en el LanammeUCR.

3.2 Diseños de Mezcla

Para evaluar el desempeño de las mezclas y el efecto del uso de modificantes y aditivos, se procedió a realizar un total de 12 diseños de mezcla, que incluyen diferentes combinaciones de materiales para las dos granulometrías definidas. La selección de la estructura de agregado y contenido óptimo de asfalto se realizó para las mezclas de control, mientras que para las mezclas que contienen modificantes y/o aditivos, solamente se llevó a cabo una verificación del contenido óptimo de asfalto, manteniendo las mismas granulometrías.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 14 de 33
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



La **Figura 1** y la **Figura 2** presentan las granulometrías óptimas para las mezclas de tamaño nominal máximo de 9.5 y 12.5 mm, respectivamente para las 3 fuentes de agregados. Las curvas granulométricas aparecen en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Curvas granulométricas de diseño

Malla	TMN 9.5 mm			TMN 12.5 mm		
	Fuente A	Fuente B	Fuente C	Fuente A	Fuente B	Fuente C
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	100.0	100.0	100.0	95.4	95.9	94.5
3/8"	95.0	94.7	91.5	78.3	84.7	83.7
N° 4	60.0	49.0	49.7	43.3	48.5	45.1
N° 8	40.0	32.7	32.0	28.9	32.6	29.1
N° 16	25.0	22.5	21.2	20.0	22.4	19.2
N° 30	17.0	16.0	14.5	14.8	16.0	13.1
N° 50	10.0	11.4	10.4	10.9	11.4	9.5
N° 100	7.0	7.8	7.8	8.0	7.9	7.1
N° 200	5.0	5.6	6.3	5.8	5.6	5.7

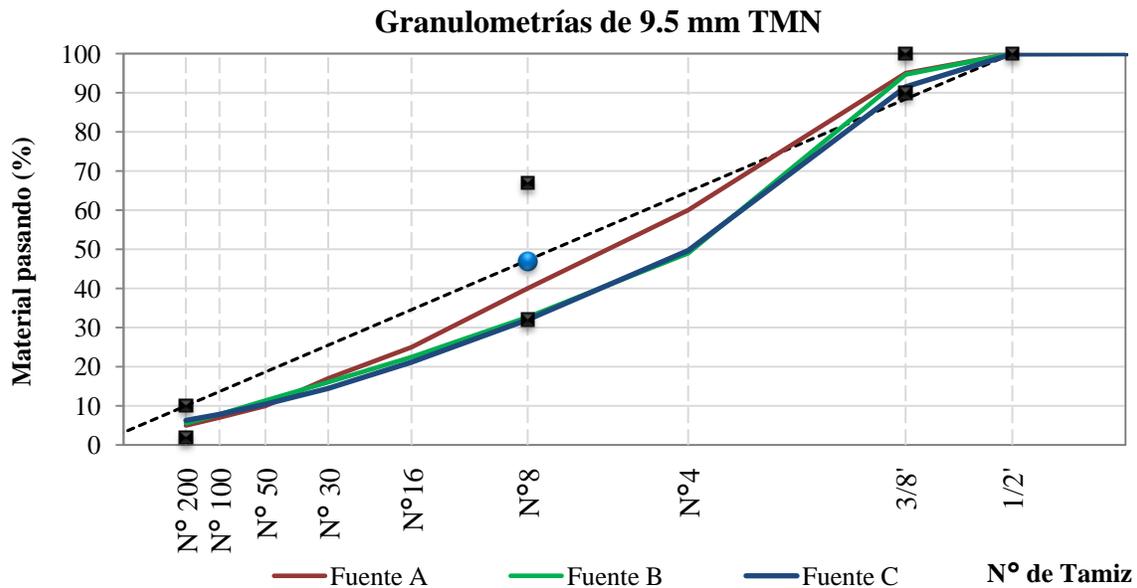


Figura 1. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm

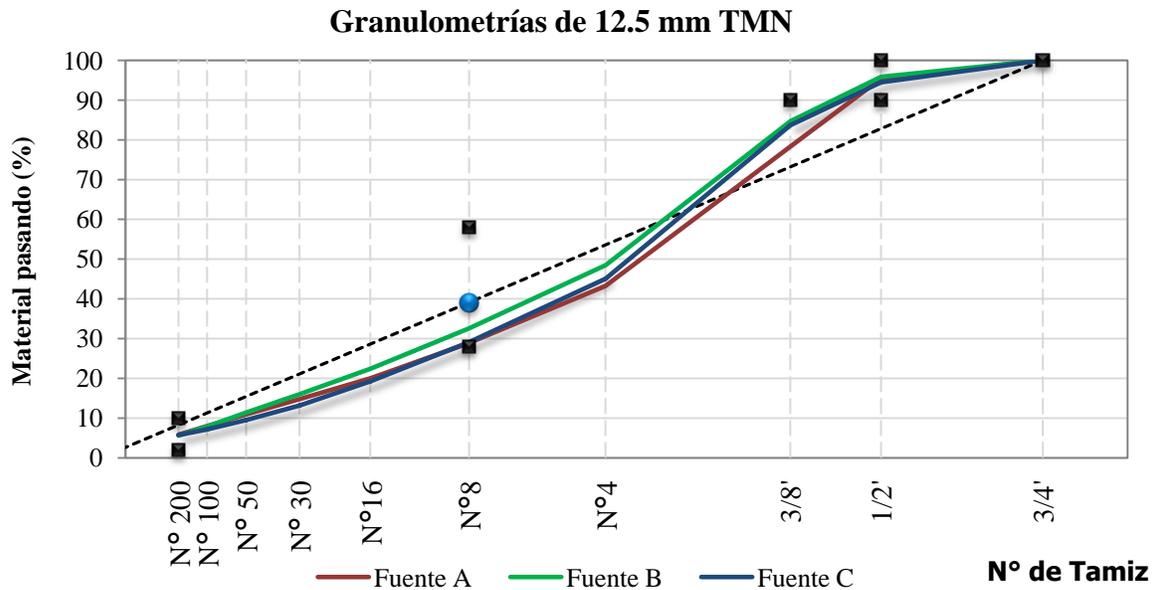


Figura 2. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm

Estas estructuras de agregado fueron utilizadas para calcular el porcentaje de asfalto óptimo, mediante la metodología Superpave para un nivel de compactación de 100 giros.

La **Tabla 7** muestra las propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas hasta el periodo de noviembre de 2017.



Tabla 7. Propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas

	Mezcla	% Asfalto	% VMA	% VFA	Polvo/asfalto
Fuente A	9.5 Control	6.5	15.5	73.7	1.0
	9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
	9.5 LAS	6.5	15.9	72.7	1.0
	9.5 SBS+LAS	6.3	15.4	72.9	1.0
	9.5 Cal	6.7	16.3	74.4	0.9
	9.5 SBS+Cal	6.6	16.0	74.4	1.0
Fuente B	9.5 Control	6.6	15.6	74.5	1.1
	9.5 SBS	6.6	15.6	74.5	1.1
	9.5 LAS	6.4	15.2	73.8	1.1
	9.5 SBS+LAS	6.7	15.7	74.7	1.1
	9.5 Cal	6.5	15.6	74.4	1.1
	9.5 SBS+Cal	6.5	15.5	74.0	1.1
Fuente C	9.5 Control	6.4	15.1	73.5	1.3
	9.5 SBS	6.3	14.9	73.4	1.3
	9.5 LAS	6.2	14.5	72.4	1.4
	9.5 SBS+LAS	6.3	14.7	75.0	1.3
	9.5 Cal	5.7	13.9	71.5	1.3
	9.5 SBS+Cal	-	-	-	-
Fuente A	12.5 Control	7.0	15.8	74.5	1.1
	12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
	12.5 LAS	6.5	14.7	72.7	1.2
	12.5 SBS+LAS	5.9	13.1	69.9	1.5
	12.5 Cal	6.0	14.0	71.5	1.3
	12.5 SBS+Cal	6.3	14.3	72.0	1.3
Fuente B	12.5 Control	6.2	14.9	73.3	1.2
	12.5 SBS	6.2	14.7	72.9	1.2
	12.5 LAS	6.1	14.5	72.1	1.2
	12.5 SBS+LAS	6.3	14.9	73.5	1.2
	12.5 Cal	5.9	14.5	72.2	1.3
	12.5 SBS+Cal	5.9	14.4	72.6	1.3
Fuente C	12.5 Control	6.3	14.9	73.3	1.2
	12.5 SBS	5.9	14.0	71.5	1.4
	12.5 LAS	5.9	13.7	70.8	1.5
	12.5 SBS+LAS	6.0	14.0	71.4	1.4
	12.5 Cal	5.6	13.3	70.2	1.6
	12.5 SBS+Cal	-	-	-	-



4 ENSAYOS DE LABORATORIO

El avance del esquema experimental se presenta en la **Tabla 9**, de acuerdo a los ensayos definidos en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Ensayos de laboratorio de Fase I y Fase II

Ensayos de laboratorio	
Módulo dinámico	MD
Resistencia Retenida a la Tensión Diametral	RRTD
FlowNumber	FN
Viga de Fatiga a Flexotracción	VF
Rueda de Hamburgo	RH

Tabla 9. Avance de ensayos de desempeño hasta noviembre de 2017

Mezcla	Asfalto	Fuente A					Fuente B					Fuente C	
		MD	RRTD	FN	VF	RH	MD	RRTD	FN	VF	RH	MD	RRTD
TMN 9.5 mm	Control	√	√	√	√		√	√	√		√	√	√
	SBS	√	√	√	√		√	√	√			√	√
	LAS	√	√	√			√	√	√			√	√
	SBS+LAS	√	√	√	√		√	√	√			√	√
	Cal	√	√	√			√	√	√		√		
	SBS+Cal	√	√	√	√		√	√	√				
TMN 12.5 mm	Control	√	√	√	√		√	√	√			√	√
	SBS	√	√	√	√		√	√	√			√	√
	LAS	√	√	√			√	√	√			√	√
	SBS+LAS	√	√	√	√		√	√	√			√	√
	Cal	√	√	√			√	√	√				
	SBS+Cal	√	√	√	√		√	√	√				



4.1 Módulo Dinámico

El ensayo de Módulo Dinámico se realizó para la condición sin acondicionar y para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento. En la **Figura 3** y la **Figura 4** se presenta gráficamente la siguiente relación:

$$\text{Razón } E^* = \frac{E_n^* \text{ ciclos de congelamiento}}{E_{\text{sin acondicionar}}^*}$$

Donde E^* corresponde al valor de módulo dinámico medido a la 20 °C y a 10 Hz, y el número de ciclos n corresponde a 1, 3 y 6 ciclos de congelamiento, según se muestra en las figuras, con base en los resultados obtenidos para los ensayos realizados en la Fuente A y Fuente B, respectivamente.

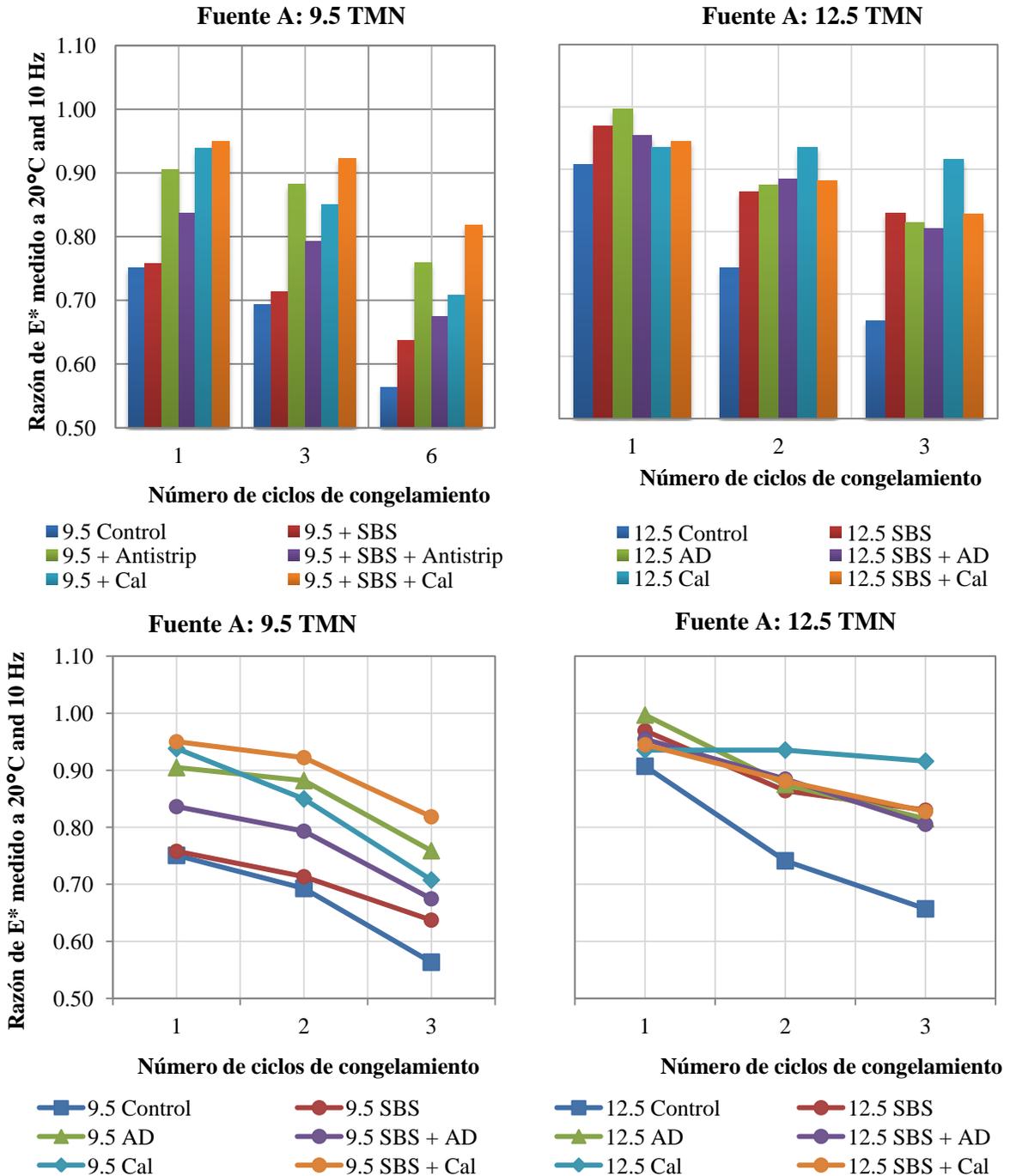


Figura 3. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente A



Los resultados presentados en la **Figura 3** evidencian una caída de rigidez importante en las mezclas de control conforme se incrementa el número de ciclos de acondicionamiento, la condición más crítica se identifica en las mezclas de TMN de 9.5 mm. Por su parte, se revela que las mezclas a las que se les adiciona Antidesnudante o Cal presentan un mejor desempeño al daño por humedad, donde la mezcla de TMN de 12.5 modificada con Cal evidencia la mayor resistencia al daño por humedad y un desempeño más consistente en los 3 niveles de daño evaluados.

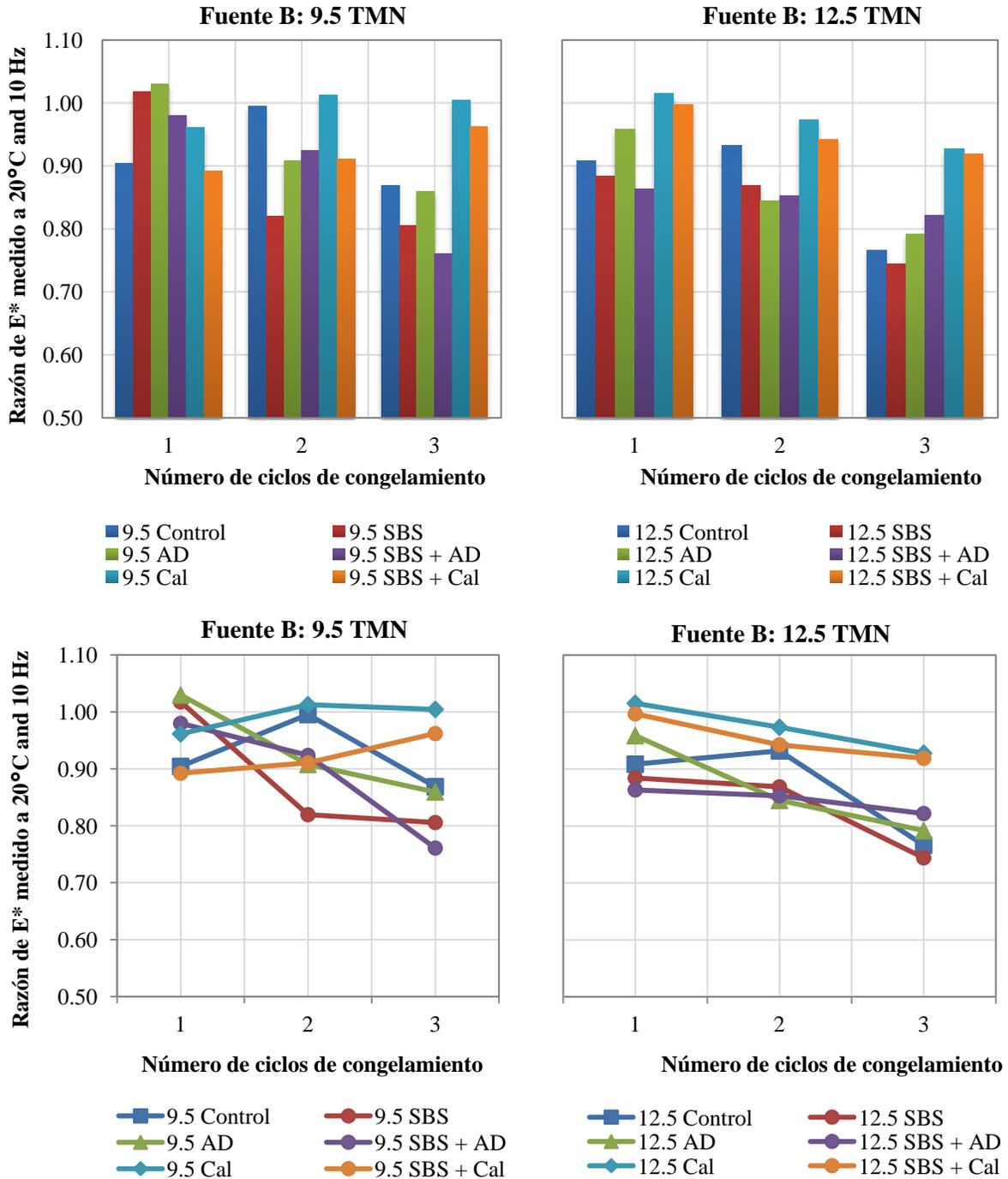


Figura 4. Resultados de razones de E* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente B



Por su parte, los resultados mostrados en la **Figura 4** revelan una variabilidad importante. Se identifica que las razones de módulo obtenidos en las mezclas con contenidos de Cal presentan el mejor desempeño al daño por humedad, consistente con los resultados obtenidos para la Fuente A. En el caso de la Fuente B, la mezcla de TMN de 9.5 modificada con Cal evidencia el mejor comportamiento ante este deterioro. Por otro lado, para el caso de la Fuente B, el efecto del Antidesnudante en la atenuación del daño no es evidente y en contraposición existe una caída de rigidez en función del incremento de ciclos de congelamiento.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 23 de 33
---------------------------	------------------------------------------	-----------------

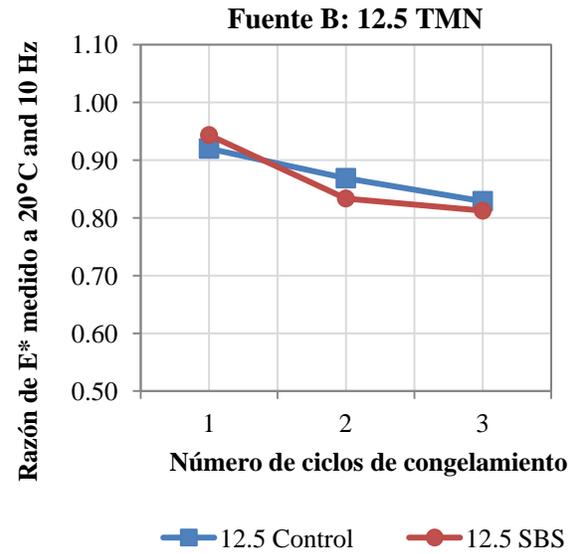
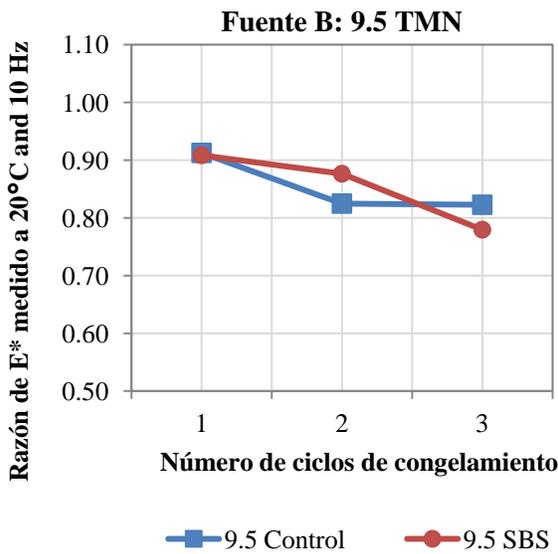
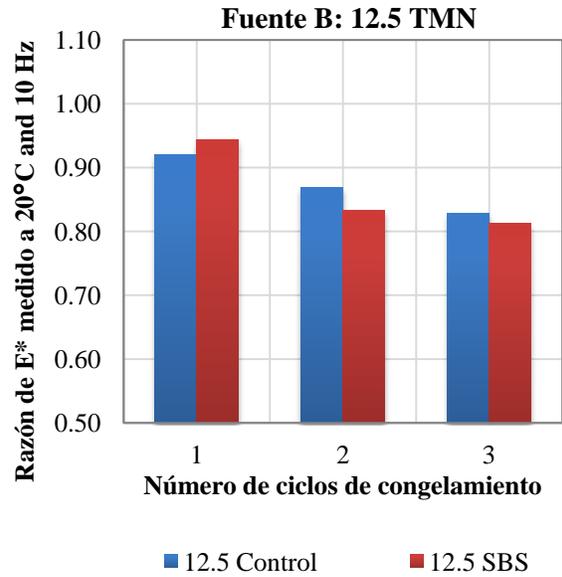
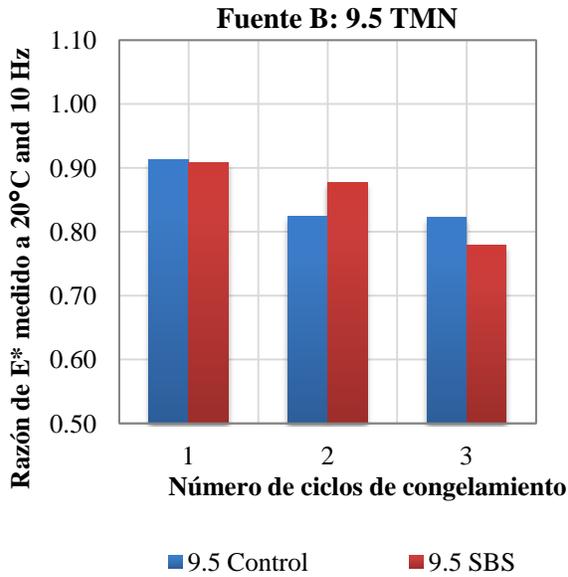


Figura 5. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente C

La **Figura 6** presenta la comparación de los módulos E^* a 20°C a 10 Hz entre las tres fuentes evaluadas. Tal y como se aprecia la Fuente C presenta las mayores magnitudes en todas las condiciones de falla.

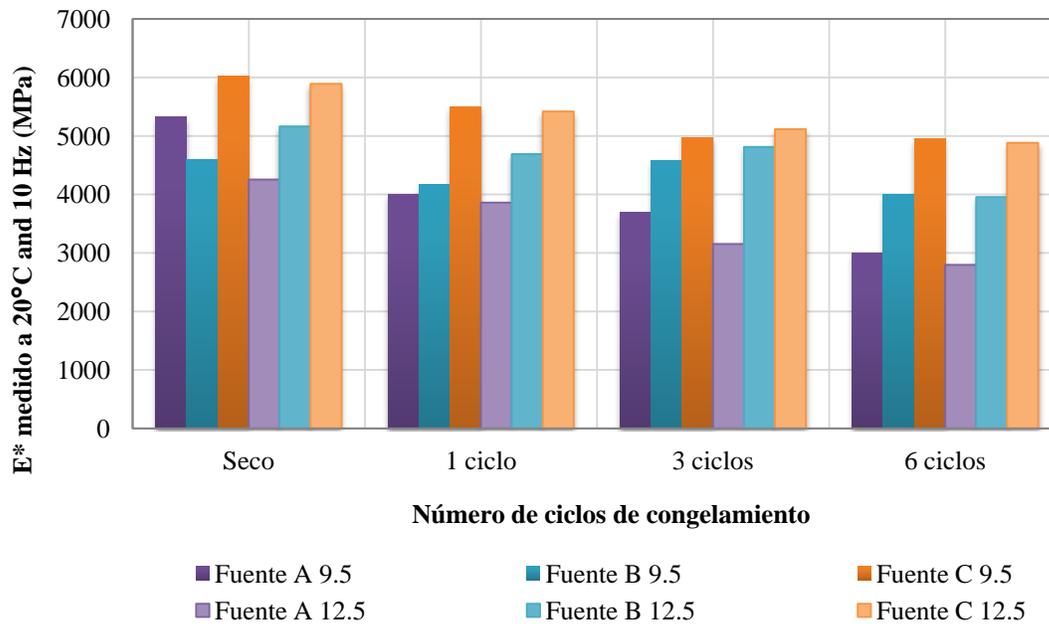


Figura 6. Comparación de módulos E* a 20°C a 10 Hz entre Fuentes

4.2 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral

El ensayo de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral como parte de la primera fase de la investigación se realizó para la condición sin acondicionar y para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

Con el objetivo de evaluar la susceptibilidad al daño por humedad se obtiene la relación TSR (*Tensile Strength Ratio*), definida por la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{RRTD_{n \text{ ciclos de congelamiento}}}{RRTD_{sin \text{ acondicionar}}}$$

Los resultados obtenidos para los ensayos realizados en la Fuente A, Fuente B y Fuente C se muestran en la **Figura 7**, **Figura 8**, y **Figura 9**; respectivamente.

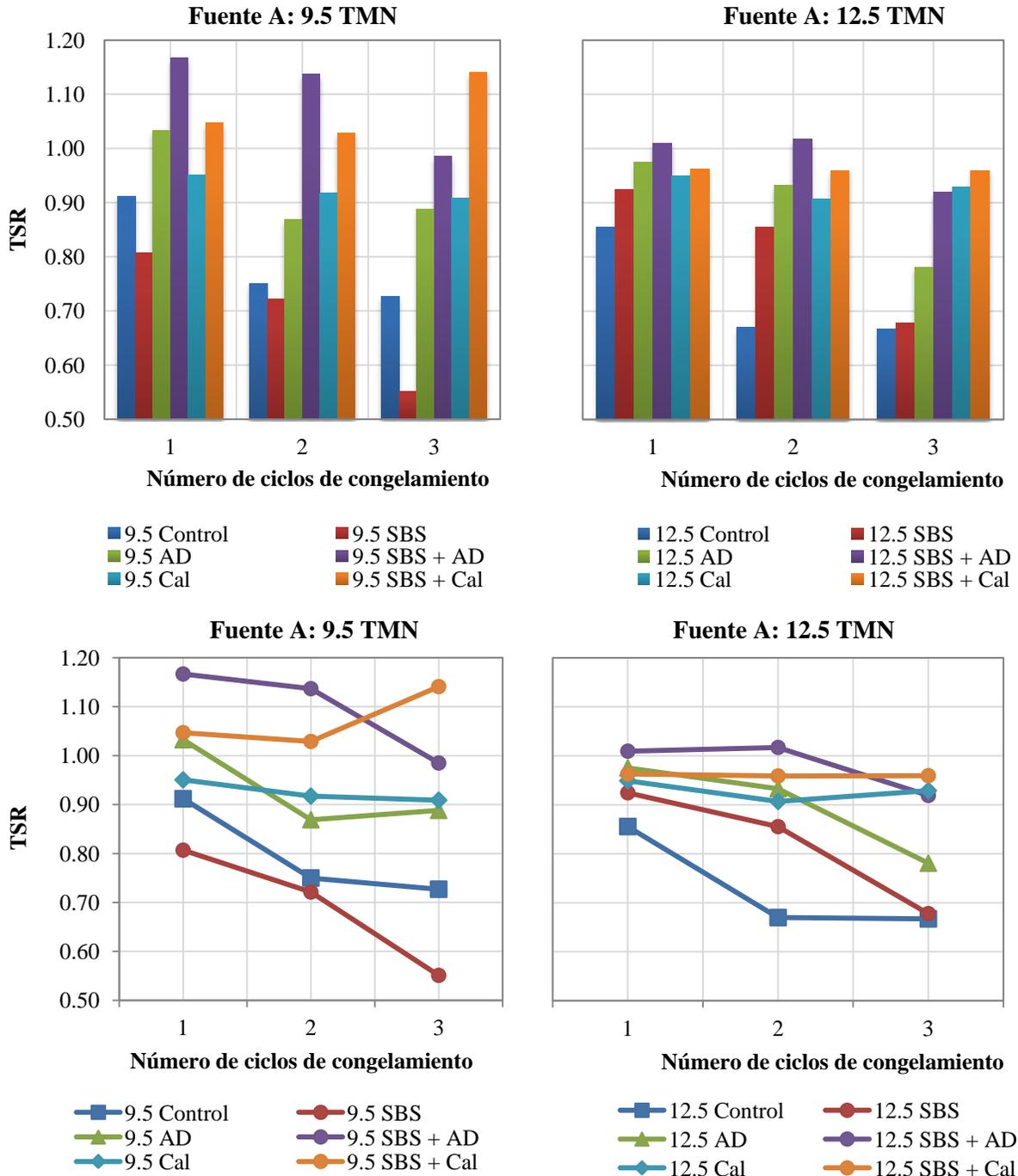


Figura 7. Resultados de TSR de la Fuente A



Los resultados mostrados en la **Figura 7** evidencian el mejor desempeño en las mezclas modificadas con SBS en adición con un agente Antidesnudante o Cal. Debe destacarse que la acción individual del modificador SBS revela susceptibilidad al daño por humedad en ambas configuraciones granulométricas.

En el caso del ensayo de RRTD y a diferencia del ensayo de Módulo Dinámico, el mejor desempeño no se obtiene para la condición con cal, lo cual revela una afectación en función del modo de falla de los especímenes.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R4	Fecha de emisión: 8 de diciembre de 2017	Página 27 de 33
---------------------------	------------------------------------------	-----------------

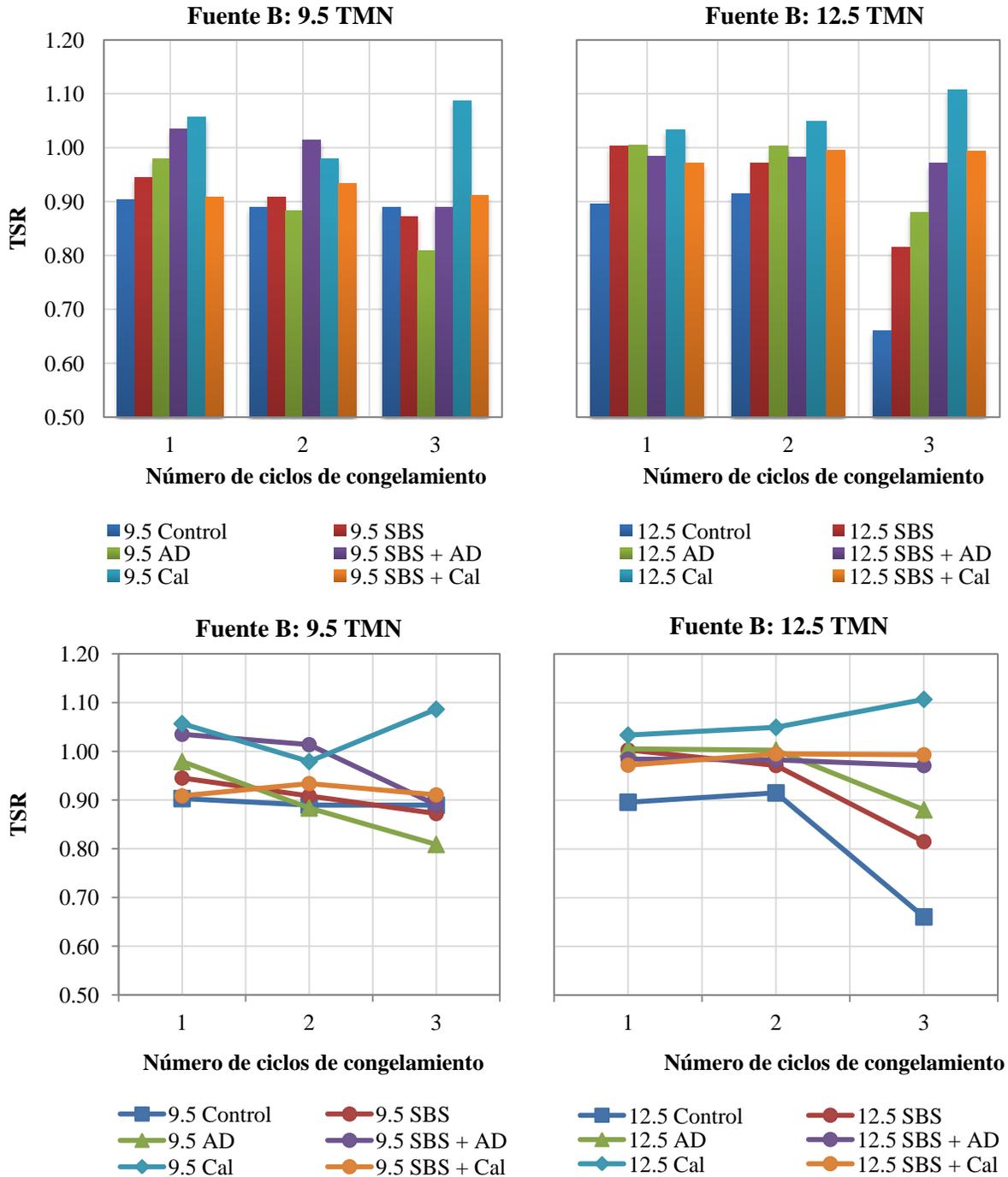


Figura 8. Resultados de TSR de la Fuente B



Para la Fuente B se obtiene un mejor desempeño en las mezclas modificadas con cal, más aún en mezclas de TMN de 12.5 mm. El aporte de resistencia al daño por humedad evidenciado en las mezclas de la fuente A producto de la adición de SBS no es significativo para los agregados de la Fuente B. Lo anterior genera un indicio de falta de compatibilidad entre el asfalto modificado con SBS y los agregados.

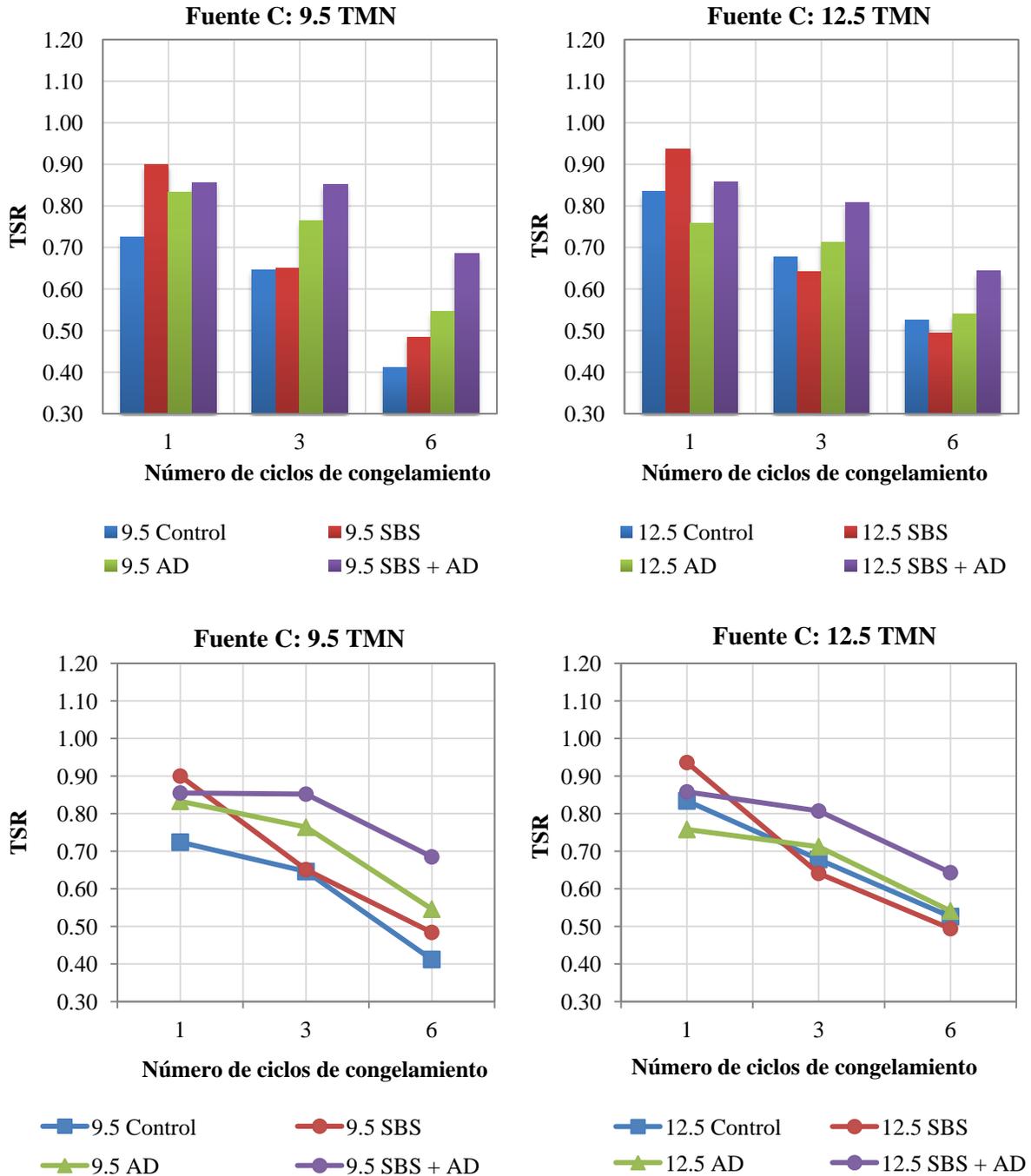


Figura 9. Resultados de TSR de la Fuente C



En todas las mezclas se evidencia una caída de resistencia pronunciada que ocurre a los 6 ciclos de hielo y deshielo. Dentro de los resultados se identifica un mejor desempeño para el tratamiento de mezcla modificada con SBS y AD en ambas configuraciones granulométricas.

Al realizar una comparación entre las fuentes del proyecto y los resultados del ensayo de TSR, las mezclas conformadas a partir de agregados de la Fuente C evidencian una mayor susceptibilidad al fenómeno de daño por humedad.

5 CONCLUSIONES

Con base en los resultados presentados con el avance del proyecto hasta noviembre de 2017 se enumeran las siguientes conclusiones preliminares:

- La adición de cal en la mezcla asfáltica evidencia una ganancia de resistencia al daño por humedad en los materiales analizados.
- La modificación de mezclas asfálticas a partir del uso del polímero SBS y agente antidesnudante líquido genera cambios en el desempeño de la mezcla ante deterioros típicos asociados al daño por humedad, estabilidad y agrietamiento por fatiga.
- Existe una afectación de los agentes modificadores: SBS, antidesnudante y cal, en las propiedades volumétricas de la mezcla, por lo que resulta necesario realizar una verificación del diseño en caso su incorporación.
- En términos de resistencia la Fuente C revela la mayor capacidad mecánica en las condiciones de servicio. No obstante, esta fuente revela una mayor susceptibilidad al daño por humedad, de acuerdo a los resultados del ensayo de TSR.



6 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de la investigación serán enfocadas en la selección de mejores materiales para el diseño de mezcla asfáltica. No obstante, para ello se requiere del análisis de la totalidad de mezclas propuestas para determinar de manera objetiva el efecto de modificantes y aditivos, granulometría, y fuente de agregado en el desempeño de las mezclas asfálticas, así como el efecto de la interacción de dichos factores.

Los resultados parciales obtenidos al mes de noviembre de 2017 permiten evidenciar un desempeño al daño por humedad más favorable en las mezclas conformadas a partir de las fuentes A y B. Dentro de los tratamientos en las mezclas se respalda que la adición de agentes antidesnudantes, especialmente la cal hidratada, aporta una mejora en la resistencia al fenómeno de daño por humedad, esta condición podrá ser considerada en proyectos en donde la demanda climática amerite la incorporación de este tipo de tecnología.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D.Y. & Kennedy, T.W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA Education Foundation, Lanham, MD, Third Edition, 2009.
2. Hicks R.G., L. Santucci, T. Aschenbrener. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar. San Diego. California. 2003. pp. 2-21.
3. Epps, J. A., P. E. Sebaaly, J. Penaranda, M. R. Maher, M. B. McCann, and A. J. Hand. NCHRP Report 444: Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.
4. Choubane, B., G. C. Page, and J. A. Musselman. Effects of Water Saturation Level on Resistance of Compacted Hot-Mix Asphalt Samples to Moisture-Induced Damage. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1723, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 97–106.
5. Kandhal, P., and I. Rickards. Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping: Case Histories. Asphalt Paving Technology, Vol. 70,2002, pp. 301–351.
6. Kringos N, Azari H and Scarpas A. Identification of Parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2127, 2009.



ANEXO A

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

1. Información básica:

Código:	B5A46	
Nombre del proyecto, actividad o programa:	Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas	
Programa de adscripción:	Ley 8114 Impuesto a combustibles	
Unidad base	LanammeUCR	Escuela de Ingeniería Civil
Período vigencia:	2015-2019	
Fecha de presentación:	Noviembre 2017	

2. Descripción general:

Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como *stripping* o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (*raveling*). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico.

Para evaluar el daño de la humedad en las mezclas asfálticas existen diversos métodos. Los más utilizados en la mayoría de los países son: el método de ebullición, el método de tensión indirecta, el método de la rueda cargada "Hamburgo" y el método de inmersión-compresión. En la actualidad el ensayo modificado de Lottman o método de tensión indirecta (AASHTO T283) es la metodología utilizada para evaluar la susceptibilidad al daño por la presencia de agua en mezclas asfálticas en Costa Rica. Por otra parte, una gran cantidad de departamentos de transportes a nivel internacional cuentan con especificaciones, basadas en los resultados de este ensayo, para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como la incorporación

Informe LM-PI-UMP-044-R4	Noviembre, 2017	Página 1 de 15
--------------------------	-----------------	----------------

de aditivos que promuevan dicha resistencia. Sin embargo, se ha determinado que en ciertos casos este ensayo no ha sido representativo de los resultados obtenidos en campo. Más aun, la metodología de ensayo ha sido criticada fuertemente por expertos, en cuanto a la capacidad para reproducir los mecanismos de falla reales de campo.

Aunque el uso de un ensayo como el descrito resulta de fácil aplicación para el practicante, éste puede reflejar resultados erróneos que afecten negativamente el desempeño de una mezcla asfáltica. Para evitar lo anterior se vuelve necesario proceder con una investigación y el desarrollo de un protocolo de ensayo que incorpore los parámetros y condiciones dominantes del daño causado por la presencia de humedad en mezclas asfálticas, tarea a la cual obedece el principal objetivo de la investigación.

Para el cumplimiento de tal objetivo se realiza el diseño de mezclas que incluyan una variedad de materiales y granulometrías representativas de las mezclas típicas de Costa Rica, considerando además la inclusión de nuevas tecnologías. Posteriormente las mezclas serán sometidas a ensayos de laboratorio para evaluar su desempeño.

Las recomendaciones de la investigación serán enfocadas en la selección de mejores materiales para el diseño de mezcla asfáltica. No obstante para ello se requiere del análisis de la totalidad de mezclas propuestas para determinar de manera objetiva el efecto de modificantes y aditivos, granulometría, y fuente de agregado en el desempeño de las mezclas asfálticas, así como el efecto de la interacción de dichos factores.

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

Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>1) Evaluar la resistencia al daño por humedad de mezclas típicas de Costa Rica.</p> <p>METAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar las fuentes de agregados y tipos de aditivos • Caracterizar los materiales • Diseñar 24 mezclas asfálticas con la metodología Superpave 	90%	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de los tratamientos del proyecto • Caracterización completa de agregados y asfaltos • Diseño de 20 mezclas asfálticas 	Ninguna
<p>2) Caracterizar las propiedades y desempeño de mezclas asfálticas producidas con tecnologías de mejoramiento del desempeño.</p> <p>META:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar ensayos de desempeño: Resistencia 	80%	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de desempeño en 20 mezclas asfálticas • Aplicación de 4 condiciones de acondicionamiento para los 	Equipo AMPT permaneció 3 meses del presente año fuera de servicio hasta su reparación



Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
Retenida a la Tensión Indirecta, Módulo Dinámico, Flow Number y Rueda de Hamburgo.		ensayos de Resistencia Retenida a la Tensión Indirecta, Módulo Dinámico y Flow Number.	
3) Desarrollar especificaciones técnicas para mezclas asfálticas con base en su desempeño. META: <ul style="list-style-type: none"> Generación de especificaciones nacionales 	0%		Se requiere de la totalidad de los ensayos para proceder con las especificaciones

4. Resultados globales:

<p>Resultados principales: El principal resultado de la investigación consiste en desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica.</p>
<p>Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda: El impacto del proyecto se verá reflejado a través del desarrollo de especificaciones técnicas para mezclas asfálticas con base en su desempeño, lo cual generará un beneficio en el campo de la infraestructura vial del país, mediante la generación de herramientas para una mejor selección y diseño de materiales.</p>
<p>Beneficios para la unidad académica y la Universidad de Costa Rica: Los beneficios se dirigen al sector investigación a través de la generación de conocimiento y técnicas novedosas que puedan ser aplicadas en proyectos nacionales en el ámbito de Acción social. A su vez, la generación de especificaciones corresponde un elemento fundamental en las labores de transferencia de tecnología encomendadas al LanammeUCR.</p>
<p>Interrogantes y nuevas investigaciones: La investigación puede complementarse mediante la incorporación de nuevos materiales y materiales amigables con el ambiente.</p>
<p>Actividades pendientes: Ensayos de desempeño en 4 tratamientos de mezcla asfáltica.</p>

5. Producción académica:

<p>Referencias de los artículos u otros productos que se proyectan:</p> <ul style="list-style-type: none"> Especificaciones para proyectos nacionales
<p>Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Evaluación de daño por humedad en mezclas asfálticas mediante análisis de componentes,
<p>Informe LM-PI-UMP-044-R4</p>
<p>Noviembre, 2017</p>
<p>Página 3 de 15</p>

CILA XIX 2017, Medellín Colombia, 27-30 noviembre 2017	
<ul style="list-style-type: none"> • Principal component and clustering analysis in moisture damage evaluation of HMA, Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, Enero 2016. • Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple Performance Tests 	
Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje: NA	
Otros productos: NA	

6. Trabajos de graduación y participación estudiantil:

Asistentes	Labores ejecutadas
Andrés Araya Alvarado	Apoyo en ensayos de laboratorio
Andrey Gerardo Arrieta Méndez	Apoyo en ensayos de laboratorio
Luis Gustavo Muñoz Masis	Apoyo en ensayos de laboratorio

Título de las tesis involucradas en el proyecto	Nombre de los/las estudiantes	Grado
Definición de un modelo mecánico para la estimación del módulo de la mezcla asfáltica a partir de la caracterización avanzada de morteros asfálticos	Fabiola Miranda Argüello	Máster en Ciencias en Ingeniería Civil
Correlación entre el módulo dinámico y el módulo cortante dinámico en mezclas asfálticas en caliente para la evaluación del daño por humedad	Andrés Araya Alvarado	Licenciatura en Ingeniería Civil
Comparación de procedimientos de ensayo para determinar la resistencia al agrietamiento por fatiga en mezclas asfálticas en caliente	Andrey Gerardo Arrieta Méndez	Licenciatura en Ingeniería Civil

7. Comentarios generales:

Ninguno

8. Informe financiero (adjuntar informe respectivo):

Comentarios: Ley 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria



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

Comentarios:

Anexo B

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

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

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

24 de noviembre de 2017

Ing. Fabiola Miranda Argüello

Fecha

Firma

Investigador(a) principal

Versión 20-11-2017.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

ANEXO B



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
COMITÉ ÉTICO CIENTIFICO

LanammeUCR

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

Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio*

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

Proyecto #: B5A43

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

Investigador(a) principal: Ing. Fabiola Miranda Argüello

Título de la investigación: Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas

1. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

- A la fecha no se ha enrolado ningún participante.
- Continúa el reclutamiento de participantes nuevos / revisión de registros / recolección de muestras.
- Se acabó el reclutamiento, pero los participantes permanecen recibiendo intervenciones relacionadas con la investigación.
- Ya no se recluta más y los participantes completaron las intervenciones relacionadas con la investigación. El estudio permanece activo solamente para darles seguimiento a largo plazo.

El reclutamiento se ha cerrado permanentemente, los participantes han completado todas las intervenciones relacionadas con el estudio y se ha completado el seguimiento a largo plazo. Las actividades de investigación remanentes se limitan a análisis de datos que puede requerir contacto con información sobre la que usted normalmente no tiene acceso, tal como registros médicos, académicos, especímenes de laboratorio, patología, etc.

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

2. CANTIDAD DE PARTICIPANTES

Complete con la información correspondiente:

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

Fabiola Miranda Argüello, investigadora principal, sin carga académica

Adriana Vargas Nordbeck, investigadora principal, sin carga académica

Fabricio Leiva Villacorta, investigador asociado, sin carga académica

José Pablo Aguiar Moya, investigador asociado, sin carga académica

Luis Guillermo Loría Salazar, investigador asociado, sin carga académica

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

5

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

2

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

3

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

Ninguna

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

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

B. SI NO ¿El estudio ha estado reclutando participantes?



- C. SI NO ¿Alguno de los participantes se ha retirado del estudio, ha sido sacado o se ha perdido?

Los ingenieros Adriana Vargas Nordbeck y Fabricio Leiva Villacorta renuncian a sus respectivos puestos en la Universidad de Costa Rica desde agosto de 2016.

- D. SI NO ¿Algún participante se ha quejado de la investigación?
- E. SI NO ¿Se ha publicado literatura científica relevante para esta investigación, durante este periodo, que pueda alterar las apreciaciones iniciales de riesgos o de beneficios asociados a este estudio?
- F. SI NO ¿Ha habido hallazgos preliminares, incluyendo informes interinos, manuscritos, resúmenes, publicaciones y hallazgos clínicos, que puedan tener impacto sobre el estudio?
- G. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio como los que se envían a la Vicerrectoría de Investigación, a las agencias financiadoras y otros?
- H. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio por parte de otros investigadores participantes, fuera de la UCR, para enviar a sus respectivas instituciones (estudios multicéntricos y otros)?
- I. SI NO ¿Se ha descubierto alguna otra información relevante a este estudio, sobre todo relacionada con los posibles riesgos y beneficios asociados al mismo?
- J. SI NO ¿Se ha detectado algún problema no anticipado, relacionado con riesgos para los participantes u otras personas, en la UCR o algún otro sitio donde se desarrolle el estudio?
- K. SI NO ¿Se han reportado al CEC todos los problemas no anticipados que conllevan riesgo para los participantes u otras personas, que requieren ser informados con prontitud?
- L. SI NO ¿El perfil de reacciones adversas experimentado por los participantes difiere del esperado? (reacción adversa/evento adverso significa cualquier acontecimiento desfavorable e indeseado, tanto serio como no serio, esperado o inesperado, relacionado o no con el estudio).
- M. SI NO ¿Se ha asignado a un Comité Independiente de Monitorización de Datos la revisión periódica de los riesgos para los participantes?

N. SI NO ¿Los participantes han experimentado algún beneficio derivado del estudio?

4. INFORMACIÓN SOBRE EL DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

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

5. INFORMACIÓN SOBRE CONTACTOS

Investigador principal:

Nombre:	Apellido:	Cédula #	Unidad académica:
Fabiola	Miranda	4-0211-0703	LanammeUCR
Teléfono:	Celular:	Fax:	Email:
25112794	88106902	25114440	Fabiola.miranda@ucr.ac.cr

Profesor(a) tutor(a)

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

Persona encargada del contacto con el estudio

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

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

SI NO ¿Se ha desarrollado algún nuevo conflicto de intereses para el investigador(a) principal o para el personal clave del estudio?

7. DECLARACIÓN DEL INVESTIGADOR PRINCIPAL

Adicionalmente a las respuestas anteriores, yo confirmo que el documento de consentimiento informado en uso, aprobado por el CEC, ha sido firmado, fechado y guardado en mis archivos para cada participante



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

enrolado en este estudio y una copia del mismo fue entregada a la persona que lo firmó como participante (cuando el uso de documento de consentimiento informado fue requerido). Asimismo confirmo que no se han realizado cambios en los procedimientos del estudio o en el documento de consentimiento sin previa aprobación por parte del CEC.

24 de noviembre de 2017

Firma del investigador(a) principal

Fecha

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

ANEXO C

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN

Unidad de Gestión de Proyectos

Unidad de Gestión de Calidad

Tel.: 2511-5845

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

Instrucciones

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

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

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

Las dimensiones a evaluar son las siguientes:



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

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

Evaluación del informe: Exhaustividad, Claridad, Rigurosidad.

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

TITULO DE LA PROPUESTA:

Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas

I. Autoevaluación

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

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

TITULO DE LA PROPUESTA:

Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas

II. Evaluación de alcances y logros

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

III. Evaluación del informe

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



IV. Evaluación de Vicerrectoría de Investigación

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

Versión 12-09-2012.



2. MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1. Daño por humedad en mezclas asfálticas

Objetivo: Desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica.

El proyecto de daño por humedad abarca la evaluación de mezclas asfálticas confeccionadas a partir de una variedad de materiales y granulometrías representativas de las condiciones típicas de Costa Rica. La cuantificación de daño producto de este deterioro es analizado mediante ensayos de desempeño a escala de laboratorio dispuestos en dos fases, de acuerdo con el alcance definido en el informe LM-PI-UMP-R-001-16.

La metodología de evaluación se encuentra claramente definida, alcanzando el cumplimiento del objetivo primordial del proyecto. El avance del esquema experimental se resume en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Avance del esquema experimental del proyecto de daño por humedad

Mezcla	Asfalto	Fuente 1				Fuente 2				Fuente 3			
		MD	RRTD	FN	VF	MD	RRTD	FN	VF	MD	RRTD	FN	VF
TMN 9.5 mm	Control	√	√	√	√	√	√	√		√	√		
	SBS	√	√	√	√	√	√	√					
	LAS	√	√	√		√	√	√					
	SBS+LAS	√	√	√	√	√	√	√					
	Cal	√	√	√		√	√	√					
	SBS+Cal	√	√	√	√	√	√	√					
TMN 12.5 mm	Control	√	√	√	√	√	√	√		√	√		
	SBS	√	√	√	√	√	√	√					
	LAS	√	√	√		√	√	√					
	SBS+LAS	√	√	√	√	√	√	√					
	Cal	√	√	√		√	√	√					
	SBS+Cal	√	√	√	√	√	√	√					

Donde, **MD:** Módulo Dinámico, **RRTD:** Resistencia Retenida a la Tensión Diametral, **FN:** Flow Number, **VF:** Viga a Flexotracción.



En el caso de la Fuente 3, a la fecha se ha completado el diseño de los tratamientos de control, asfalto modificado con LAS (antidesnudente líquido) y asfalto modificado con SBS. No obstante, la programación de los ensayos presenta un atraso cercano a los 2 meses producto de un fallo en el equipo Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).

Dentro de los principales hallazgos obtenidos a la fecha se destaca la alta susceptibilidad al daño por humedad agregado proveniente Río Claro (Fuente 3), respecto a los agregados provenientes de Procamar (Fuente 1) y Guápiles (Fuente 2). La razón principal corresponde a la naturaleza caliza de dicha fuente. En la siguiente Figura se presenta la comparación visual de la naturaleza de los agregados utilizados en el proyecto.



Figura 1. Agregados (a) Fuente 3: Río Claro (b) Fuente 2: Guápiles.

Los resultados obtenidos a la fecha aportan información concluyente que puede ser utilizada para externar recomendaciones y generar especificaciones en el tema de materiales permisibles para la fabricación de mezcla asfáltica para capa de rodadura en Costa Rica.

Informe LM-PI-UMP-R-001-16	Fecha de emisión: 23 de noviembre de 2017	Página 2 de 2
----------------------------	-------------------------------------------	---------------



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura
del Transporte

DAÑO POR HUMEDAD
EN MEZCLAS ASFÁLTICAS
LM-PI-UMP-044-R3

PREPARADO POR:

Ing. Fabiola Miranda Argüello

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D.



programa de infraestructura
del transporte

PITRA

San José, Costa Rica
Diciembre, 2016

UMP

Unidad de
Materiales y Pavimentos

INFORME DE DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

INF-PI-UMP-044-R3

Miranda-Argüello, Fabiola ¹; Aguiar-Moya, José Pablo ²; y Loria-Salazar, Luis Guillermo ³

1. *Ingeniera Investigadora de la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA LanammeUCR*
2. *Coordinador la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA LanammeUCR*
3. *Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR*

Palabras Clave: Daño por humedad, mezcla asfáltica, desempeño

Resumen: Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como "stripping" o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico o "raveling". Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interface agregado-cemento asfáltico.

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica, así como evaluar el efecto del uso de modificantes y/o aditivos en el desempeño de mezclas asfálticas producidas con materiales típicos del país. El presente documento presenta el avance del proyecto, comprendiendo los principales resultados obtenidos al mes de noviembre de 2016.

Referencias

1. Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A, Leiva-Villacorta, F & Loria-Salazar, L. G. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures using the Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Test. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2505, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. pp. 57–65.
2. Lottman, R. P. (1978). Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. NCHRP Report 192. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
3. Lu, Q. & Harvey, J.T. (2005). Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods. Research Report No. UCPRC-RR-2005-15, University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley.
4. Al-Qadi, I., Abuawad, I. M., & Trepanier, J. S. (2014). Effects of Various Asphalt Binder Additives/Modifiers on Moisture Susceptible Asphaltic Mixtures. Research Report FHWA-ICT-14-004, Illinois Center for Transportation, Urbana, IL.
5. Tarefder, R.A. & Zaman, A.M. (2009). Nanoscale Evaluation of Moisture Damage in Polymer Modified Asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22 No.7, pp. 714-725.

Información técnica del documento

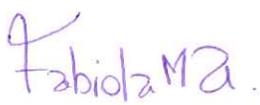
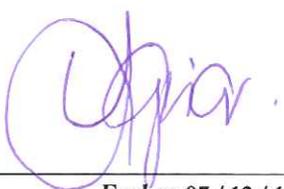
1. Informe REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas		4. Fecha del Informe Diciembre, 2016
4. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
5. Resumen <p><i>Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como "stripping" o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico o "raveling". Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interface agregado-cemento asfáltico.</i></p> <p><i>El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica, así como evaluar el efecto del uso de modificantes y/o aditivos en el desempeño de mezclas asfálticas producidas con materiales típicos del país.</i></p> <p><i>El presente documento presenta el avance del proyecto, comprendiendo los principales resultados obtenidos al mes de noviembre de 2016.</i></p>		
6. Palabras clave Daño por humedad, mezcla asfáltica, desempeño	7. Nivel de seguridad: Ninguno	8. Núm. de páginas 51
10. Preparado por: Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  <hr/> Fecha: 07 / 12 / 16		
11. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  <hr/> Fecha: 07 / 12 / 16		12. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  <hr/> Fecha: 07 / 12 / 16



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 MECANISMOS DE DAÑO POR HUMEDAD.....	8
2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD.....	8
2.2.1 MATERIALES Y DISEÑO DE MEZCLA.....	9
2.2.2 PRODUCCIÓN.....	12
2.2.3 CONSTRUCCIÓN.....	12
2.2.4 CLIMA.....	13
2.2.5 OTROS FACTORES.....	13
2.3 MECANISMOS DE FALLA DE DAÑO POR HUMEDAD.....	14
2.4 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR EL DAÑO POR HUMEDAD.....	15
2.4.1 ENSAYO DE EBULLICIÓN.....	16
2.4.2 ENSAYO DE INMERSIÓN ESTÁTICA.....	16
2.4.3 ENSAYO DE ADSORCIÓN NETA (NAT).....	16
2.4.4 ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN.....	17
2.4.5 ENSAYO DE LOTTMAN.....	17
2.4.6 ENSAYO DE LOTTMAN MODIFICADO.....	17
2.4.7 ENSAYO DE RUEDA CARGADA DE HAMBURGO.....	18
2.5 MÉTODOS PARA PREVENIR EL DAÑO POR HUMEDAD.....	19
2.5.1 ADITIVOS ANTIDESNUDANTES LÍQUIDOS.....	20
2.5.2 CAL.....	21
2.5.3 MODIFICACIÓN CON POLÍMEROS.....	22
3 METODOLOGÍA Y ALCANCE.....	22

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 3 de 51
---------------------------	------------------------------------------	----------------



3.1	SELECCIÓN DE MATERIALES	22
3.2	DISEÑOS DE MEZCLA	22
3.3	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	23
3.3.1	FASE I.....	23
3.3.2	FASE II	23
4	RESULTADOS PRELIMINARES	24
4.1	MATERIALES.....	24
4.1.1	AGREGADOS	24
4.1.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	26
4.2	DISEÑOS DE MEZCLA	28
5	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	32
5.1	MÓDULO DINÁMICO	33
5.2	RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL.....	37
5.3	FLOWNUMBER	41
5.4	RUEDA DE HAMBURGO	45
5.5	VIGA A FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS	46
6	CONCLUSIONES.....	47
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propiedades físicas de los agregados y su efecto en el desnudamiento (11)	11
Figura 2. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (2)	19
Figura 3. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm.....	29
Figura 4. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm.....	30
Figura 5. Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente A.....	34
Figura 6. Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente B.....	36
Figura 7. Resultados de TSR de la Fuente A	38
Figura 8. Resultados de TSR de la Fuente B.....	40
Figura 9. Resultados de Flow Number de la Fuente A	42
Figura 10. Resultados de Flow Number de la Fuente B.....	44
Figura 11. Resultados de Rueda de Hamburgo de la Fuente B.....	45
Figura 12. Resultados del ensayo de fatiga a deformación unitaria de 400 y 600 μ m.....	46



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que contribuyen a la formación de deterioros relacionados con la humedad (8)....	9
Tabla 2. Tipos de Mineral y su Relación con el Desnudamiento (11)	10
Tabla 3. Ensayos para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad (2).....	15
Tabla 4. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente A	24
Tabla 5. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente B	25
Tabla 6. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente C	26
Tabla 7. Propiedades de los asfaltos (Fuentes A y B)	27
Tabla 8. Propiedades de los asfaltos (Fuente C).....	28
Tabla 9. Curvas granulométricas de diseño.....	29
Tabla 10. Propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas	31
Tabla 11. Ensayos de laboratorio de Fase I y Fase II.....	32
Tabla 12. Avance de ensayos de desempeño hasta noviembre de 2016.....	32



1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos se atribuye a la presencia de agua en la mezcla asfáltica. La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como *stripping* o "pérdida del recubrimiento" del asfalto de la superficie de los agregados (1). El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (*raveling*). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico.

Para evaluar el daño de la humedad en las mezclas asfálticas existen diversos métodos. Los más utilizados en la mayoría de los países son: 1) el método de ebullición, 2) el método de tensión indirecta, 3) el método de la rueda cargada "Hamburgo" y 4) el método de inmersión-compresión. En la actualidad el ensayo modificado de Lottman o método de tensión indirecta (AASHTO T283) es la metodología utilizada para evaluar la susceptibilidad al daño por la presencia de agua en mezclas asfálticas en Costa Rica. Adicionalmente, una gran cantidad de departamentos de transportes a nivel internacional cuentan con especificaciones, basadas en los resultados de este ensayo, para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como la incorporación de aditivos que promuevan dicha resistencia (2). Sin embargo, se ha determinado que en ciertos casos este ensayo no ha sido representativo de los resultados obtenidos en campo (3). Más aun, la metodología de ensayo ha sido criticada fuertemente por expertos, en cuanto a la capacidad para reproducir los mecanismos de falla reales de campo (4 - 6).

Aunque el uso de un ensayo como el descrito resulta de fácil aplicación para el practicante, éste puede reflejar resultados erróneos que afecten negativamente el desempeño de una mezcla asfáltica. Para evitar lo anterior se vuelve necesario proceder con una investigación y el desarrollo de un protocolo de ensayo que incorpore los parámetros y condiciones dominantes del daño causado por la presencia de humedad en mezclas asfálticas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología de laboratorio para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas para las condiciones propias de Costa Rica.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 7 de 51
---------------------------	------------------------------------------	----------------



1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los principales objetivos de esta línea de investigación son:

- ❖ Evaluar la resistencia al daño por humedad de mezclas típicas de Costa Rica.
- ❖ Desarrollar especificaciones técnicas para mezclas asfálticas con base en su desempeño.
- ❖ Caracterizar las propiedades y desempeño de mezclas asfálticas producidas con tecnologías de mejoramiento del desempeño.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 MECANISMOS DE DAÑO POR HUMEDAD

El daño por humedad en pavimentos asfálticos está asociado con dos mecanismos: adhesión y cohesión (7, 8). Primero, la humedad (en forma de agua o vapor de agua) puede interactuar con el ligante asfáltico causando una reducción en cohesión que a su vez provoca una reducción en la rigidez y resistencia de la mezcla. Luego, la humedad puede penetrar entre el agregado y el asfalto, rompiendo el enlace adhesivo entre ambos y "desnudando" las partículas de agregado. Generalmente el agua penetra entre la película de asfalto y el agregado porque la superficie del agregado tiene mayor afinidad por el agua que por el ligante asfáltico. Este mecanismo asociado con el desnudamiento puede verse en términos de una reducción en el ángulo de contacto entre el asfalto y la superficie del agregado (7).

Estos mecanismos pueden estar relacionados con el agregado, el ligante asfáltico, o la interacción entre ambos materiales. Se ha mostrado que las propiedades físico-químicas del agregado mineral son más importantes para el desprendimiento inducido por la humedad, comparadas con las propiedades del ligante asfáltico (9). Los deterioros relacionados con el daño por humedad también pueden acelerarse gracias a asuntos relacionados con el diseño de mezcla y construcción (8).

2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD

Existen diversos factores que pueden contribuir a la formación de deterioros relacionados con la humedad. Como lo muestra la **Tabla 1**, dichos factores pueden estar relacionados con el diseño de mezcla, producción, construcción, medio ambiente u otros.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 8 de 51
---------------------------	------------------------------------------	----------------



Tabla 1. Factores que contribuyen a la formación de deterioros relacionados con la humedad (8)

Materiales y Diseño de Mezcla	<ul style="list-style-type: none"> • Química del agregado y el ligante asfáltico • Contenido de asfalto • Contenido de vacíos • Aditivos
Producción	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de recubrimiento del agregado y calidad del material pasando la malla No. 200 • Temperatura en la planta • Exceso de contenido de humedad en el agregado • Presencia de arcillas
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Compactación - alto contenido de vacíos en sitio • Permeabilidad - valores altos • Segregación de la mezcla • Cambios del diseño de mezcla a la producción (variabilidad en campo)
Clima	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas de alta precipitación • Ciclos de congelamiento/descongelamiento • Clima de desierto (desnudamiento por vapor)
Otros Factores	<ul style="list-style-type: none"> • Drenaje superficial • Drenaje de las capas subyacentes • Estrategias de rehabilitación inadecuadas • Alto volumen de tráfico pesado

2.2.1 Materiales y Diseño de Mezcla

El asfalto está conformado por una variedad de compuestos orgánicos, generalmente hidrocarburos de diferentes pesos moleculares y estructuras químicas generando una ligera carga negativa. Por otro lado, los agregados son compuestos inorgánicos polares formados de una amplia variedad de minerales. Agregados como el cuarzo y el granito presentan un alto porcentaje de dióxido de silicio, lo que da lugar a una carga negativa en su superficie, en cambio, agregados como el mármol y la cal presentan un alto porcentaje de carbonato de calcio, lo que genera una carga positiva (1).

Una mezcla asfáltica de agregado cargado positivamente con asfalto que contenga un compuesto ácido, cargado negativamente, genera un enlace químico resistente en presencia de agua. En el caso contrario, un agregado como el granito, cargado negativamente, requiere que el asfalto contenga un compuesto básico cargado positivamente para formar un enlace químico que sea resistente en las mismas condiciones (1). Estudios han demostrado que los agregados calizos muestran mayor

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 9 de 51
---------------------------	------------------------------------------	----------------



resistencia al daño por humedad. Los silicatos puros tienen una resistencia pobre, mientras que en los granitos varía de pobre a muy buena (10). En la **Tabla 2** se muestran las cinco categorías generales de agregados minerales y su relación con el desnudamiento.

Tabla 2. Tipos de Mineral y su Relación con el Desnudamiento (11)

Categoría	Tipo de Mineral	Roca	Comentario
Sílice	Cuarzo - SiO_4	Granito Riolita Arenisca Cuarcita	Adherentes pobres ya que el agua se adjunta gracias al enlace H.
Ferro-magnésiano	Olivine - $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ Augita - $(\text{Ca, Mg, Fe})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$ Hornablenda - $(\text{Ca, Na})_2 \cdot 3(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_5(\text{Al, Si})_8 \cdot \text{O}_{22}(\text{OH})_2$ Biotita - $\text{K}(\text{Mg, Fe}^{2+})_3(\text{Al, Fe}^{3+}) - \text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Gabro Diabasa Andesita Basalto Diorita Mica	La olivina y la augita forman sales insolubles de Mg y Ca mientras que la biotita produce sales solubles de K. La hornablenda es de carácter intermedio.
Caliza	Calcita - CaCO_3 Dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Caliza Tiza Dolomita	Generalmente buenos adherentes, pero son friables. Se someten a interacciones ácido-base y electrostáticas con el asfalto. Algunos tienen sales solubles.
Feldespatos	Albita - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ Ortoclasa - KAlSi_3O_8 Anortita - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Riolita Granito Cuarcita Gneis Arenisca Diabasa Gabro	Algunas se desnudan debido a la formación de sales solubles de Na y K. La anortita forma sales solubles de Ca que son resistentes al desnudamiento.
Arcillas	Illita Caolinita Montmorillonita	Polvo Finos	Recubrimientos finos ($< 4\mu$) y absorben agua fácilmente. Forman enlaces estables.



Además de la composición mineralógica, las propiedades físicas de los agregados también influyen en la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas. La angularidad y la heterogeneidad promueven el entramamiento de partículas y mayor vida útil. También las texturas más ásperas permiten un enlace más fuerte entre los agregados y el asfalto (10). La **Figura 1** muestra un resumen del efecto de las propiedades físicas de los agregados en la resistencia (nivel 1) y la susceptibilidad al desnudamiento (nivel 2), así como ensayos para cada propiedad (nivel 3).



Figura 1. Propiedades físicas de los agregados y su efecto en el desnudamiento (11)

El desempeño general de los pavimentos también depende del contenido de vacíos de la mezcla asfáltica. La susceptibilidad al desnudamiento aumenta al aumentar el porcentaje de vacíos, ya que hay más espacio para que la humedad penetre en la mezcla e induzca fuerzas hidrostáticas (7, 10). Contenidos de vacíos superiores al 6% pueden dar a la mezcla un grado considerablemente mayor de daño por humedad. Las mezclas de granulometría abierta son una excepción, pues los niveles de vacíos entre 15 y 25% permiten que el agua drene (12).

Mayores contenidos de asfalto también disminuyen el daño por humedad porque aumentan el espesor de la película de asfalto y disminuyen la permeabilidad. Mezclas con películas gruesas de asfalto son menos susceptibles al daño por humedad que aquellas con películas delgadas, ya que



solo cantidades muy pequeñas de agua pueden moverse a través de este tipo de mezclas (12). Sengoz y Agar (13) recomiendan un rango óptimo de espesor de película entre 9.5 y 10.5 μm .

2.2.2 Producción

Los dos principales aspectos que afectan la resistencia al daño por humedad de las mezclas durante la producción son la segregación y el contenido de humedad de los agregados. La segregación evita que la mezcla asfáltica sea producida de manera que cumpla con la fórmula de trabajo. Si esto sucede, los resultados de los ensayos de susceptibilidad al daño por humedad realizados durante el diseño de mezcla no son aplicables (14).

Por otro lado, si los agregados no se calientan suficiente tiempo en la planta, esto puede resultar en temperaturas de mezclado más bajas que impiden que los agregados se sequen adecuadamente. La humedad remanente en el agregado después de que este ha sido recubierto por el asfalto puede causar el desprendimiento de la película de asfalto durante su vida de servicio (9, 14). Además, a temperaturas bajas de mezclado la viscosidad del asfalto es menor, lo que le impide formar un espesor de película uniforme alrededor de las partículas (15).

Finalmente, la presencia de polvo y arcillas en el agregado puede inhibir el contacto entre el ligante asfáltico y el agregado y proporcionar canales para que el agua penetre. El asfalto recubre el polvo y no está en contacto directo con las superficie del agregado. Algunos materiales muy arcillosos pueden causar desnudamiento al emulsificar el asfalto en presencia del agua (9, 12).

2.2.3 Construcción

Varios aspectos de la construcción pueden afectar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. Las condiciones climáticas son importantes pues pueden afectar la compactación de la mezcla o atrapar humedad. Las técnicas de manipulación de la mezcla pueden influenciar la segregación y afectar su permeabilidad. Las técnicas de construcción de las juntas también pueden afectar la compactación y permeabilidad (8).

La compactación inadecuada de la mezcla asfáltica es probablemente el factor relacionado a la construcción más comúnmente responsable por el desnudamiento prematuro. Estudios han mostrado que a menos de 4-5% de contenido de vacíos en la mezcla los vacíos generalmente no están interconectados y por lo tanto es casi impermeable al agua. La mayoría de las mezclas son

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 12 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



diseñadas para un contenido de vacíos entre 3 y 5%. Durante la construcción, un contenido máximo de 8% de vacíos (al menos 92% de la gravedad específica máxima teórica) es requerido por la mayoría de agencias, suponiendo que el pavimento se densificará al contenido de vacíos de diseño luego de 2 a 3 años de tráfico. Sin embargo, la mayoría de agencias no practica buen control de compactación, lo que resulta en vacíos mayores al 8% durante la construcción. Esto puede causar desprendimiento prematuro en la superficie porque la mezcla no posee la adecuada cohesión (9).

2.2.4 Clima

Hay varios factores ambientales que pueden afectar el grado de daño por humedad aparte de la cantidad de precipitación y agua en el pavimento. El calor después de una tormenta puede crear "ampollas" en los agregados en la superficie, que pueden formar un hoyo si se revientan. Estas ampollas se forman cuando el asfalto caliente se mueve desde abajo de una gota de agua y se esparce sobre ella (12).

Las presiones y movimientos de agua debido al congelamiento y descongelamiento pueden romper la película de asfalto y causar desprendimiento. Grietas causadas por bajas temperaturas o esfuerzos de fatiga pueden promover el desnudamiento porque permiten la entrada de agua (12).

2.2.5 Otros Factores

Los problemas relacionados con la humedad no ocurren sin la presencia de agua y tráfico, los cuales proporcionan energía para romper los enlaces adhesivos y causar fallas cohesivas. El agua puede penetrar las capas del pavimento de diferentes maneras. Puede hacerlo como escorrentía a través de la superficie de la vía, principalmente por grietas superficiales, o puede entrar desde los lados y el fondo de la estructura del pavimento infiltrándose desde las cunetas o áreas con alto nivel freático (8, 9).

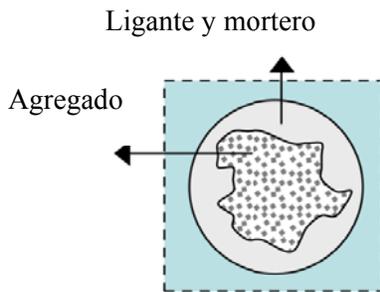
Al menos dos mecanismos (acumulación de presión de poro y socavación hidráulica) están asociados con el daño causado por las cargas cíclicas en el concreto asfáltico. Por lo tanto, se puede decir que en igualdad de condiciones de los demás factores, el incremento en las cargas de tráfico (en términos de número de repeticiones) acelera el daño por humedad (7).

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 13 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------

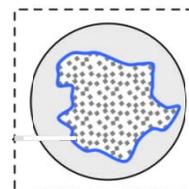


2.3 MECANISMOS DE FALLA DE DAÑO POR HUMEDAD

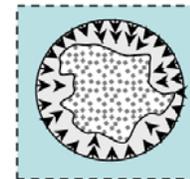
El análisis de los mecanismos de falla de daño por fatiga se desarrollan a partir de una partícula de agregado medianamente angular recubierta por una película de ligante y mortero asfáltico e inmersa en un medio de agua sometida a esfuerzos de succión, como consecuencia de un alto porcentaje de vacíos en la mezcla con baja conectividad. Los mecanismos de daño, definidos por diferentes autores, se resumen y ejemplifican a continuación:



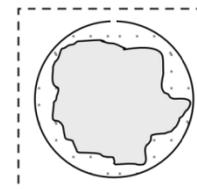
Desnudamiento: Consiste en la separación de la película de asfalto que recubre la superficie del agregado, definido como un proceso de naturaleza química y termodinámica. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)



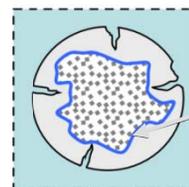
Dispersión del mortero: Proceso de naturaleza química y termodinámica que consiste en la pérdida gradual de la cohesión en el ligante o mortero asfáltico, producto de largos periodos de difusión y pérdida de material por la presencia de flujo de agua. (Little y Jones, 2003; Kringos y Scarpas 2005, 2006 y Kringos et al. 2007).



Degradación del mortero asfáltico: Proceso químico que ocurre posterior a otros eventos, en donde las capas superiores de la matriz asfáltica son sometidas a un proceso de lavado al estar expuestas a un flujo de agua constante. (15).



Desplazamiento: Proceso mecánico que consiste en la pérdida del material de la superficie del agregado, ya sea a través de la ruptura de la película de asfalto o la degradación y posterior separación del mortero de la mezcla. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)



Ruptura de la película de asfalto y formación de microgrietas: Inicia en la matriz fina y su aparición conlleva al deterioro de la estructura del material, dando paso a la aparición de discontinuidades que facilitan el transporte de humedad y por tanto acelerando el deterioro.



2.4 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR EL DAÑO POR HUMEDAD

A través de los años se han desarrollado numerosos ensayos de laboratorio para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas. Estos ensayos pueden clasificarse en dos categorías generales: 1) ensayos realizados en muestras sueltas y 2) ensayos realizados en especímenes compactados (2 - 4). La **Tabla 3** resume los diferentes ensayos propuestos para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas.

Tabla 3. Ensayos para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad (2)

Ensayos para muestras sueltas	Ensayos para muestras compactadas
<ul style="list-style-type: none"> • Azul de metileno • Desprendimiento de película • Inmersión estática • Inmersión dinámica • Inmersión química • Reacción superficial • Ebullición • Botella rotatoria • Adsorción neta (NAT) • Energía superficial • Desprendimiento neumático 	<ul style="list-style-type: none"> • Susceptibilidad al vapor • Inmersión-compresión • Inmersión Marshall • Ensayo de pedestal • Lottman • Lottman modificado • Tunnicliff-Root • ECS con módulo resiliente • Rueda cargada de Hamburgo • Analizador de pavimentos asfálticos (APA) • ECS/SPT • Congelamiento/descongelamiento múltiple

Los ensayos realizados en muestras sueltas se llevan a cabo en agregados recubiertos de asfalto en presencia de agua. Este tipo de ensayos es más simple y menos costoso que aquellos realizados en especímenes compactados, pues utilizan equipos y procedimientos más sencillos. Sin embargo, su mayor desventaja es que no son capaces de tomar en cuenta factores como presión de poro, acción del tráfico y propiedades mecánicas de la mezcla. Los resultados son en su mayoría cualitativos y su interpretación puede ser subjetiva, por lo que son más apropiados para comparar diferentes mezclas y no necesariamente para determinar si pueden ser usadas o no (2).



Por otra parte, los ensayos realizados en muestras compactadas utilizan especímenes compactados en laboratorio o núcleos extraídos en campo. Su principal ventaja es que combinan propiedades físicas y mecánicas, acción del agua/tráfico y toman en cuenta el efecto de la presión de poro. Los resultados pueden medirse de forma cuantitativa, minimizando la subjetividad. Su desventaja es que requieren de equipo más elaborado, mayor tiempo de ensayo y procedimientos más laboriosos (2).

A la fecha no hay un ensayo que haya logrado una amplia aceptación para evaluar la susceptibilidad de las mezclas al daño por humedad. A continuación se describen algunos de los ensayos más comúnmente utilizados.

2.4.1 Ensayo de Ebullición

El procedimiento para este ensayo está descrito en la norma ASTM D 3625 (5), aunque existen variaciones. El ensayo consiste en colocar una muestra de agregado recubierto de asfalto en agua hirviendo por 10 minutos. Posteriormente, se realiza una inspección visual para determinar el porcentaje de recubrimiento retenido de la muestra.

2.4.2 Ensayo de Inmersión Estática

Este ensayo está normado por el procedimiento detallado en AASHTO T 182 (6) y consiste en sumergir una muestra de mezcla asfáltica en agua a 25°C por 16 a 18 horas y observarla a través del agua para medir el porcentaje de área visible total de la superficie del agregado que retiene el recubrimiento de asfalto.

2.4.3 Ensayo de Adsorción Neta (NAT)

El ensayo de adsorción neta (NAT, por sus siglas en inglés) fue desarrollado bajo el proyecto SHRP A-003B (7) y se utiliza para determinar la afinidad y compatibilidad de combinaciones de asfalto y agregado y la susceptibilidad del sistema a la humedad. El procedimiento consiste de tres pasos. Primero, el asfalto es adsorbido por el agregado a partir de una solución de tolueno utilizando una columna de recirculación. Segundo, una pequeña cantidad de agua es introducida en la solución de tolueno y el asfalto adsorbido que es sensible a la presencia de agua es desorbido por el agregado. Por último, se determina la cantidad de asfalto que permanece en el agregado (llamado "adsorción neta"), la cual sirve como una medida de la afinidad del asfalto por el agregado en presencia del agua.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 16 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



2.4.4 Ensayo de Inmersión-Compresión

El procedimiento para este ensayo está descrito en la norma AASHTO T 165 (9), y consiste en medir la pérdida de resistencia a la compresión en muestras compactadas como resultado de la acción del agua. Para ello, se compactan seis especímenes de mezcla asfáltica, de los cuales tres se mantienen en condición seca y los otros tres se sumergen en agua a 60°C por 4 días. En ambos grupos se mide la resistencia a la compresión uniaxial a 25°C para una tasa de deformación de 5.1 mm/min y se calcula la resistencia retenida. La mayoría de agencias utiliza una razón de 70% como valor mínimo requerido (2).

2.4.5 Ensayo de Lottman

Este procedimiento fue desarrollado por Lottman bajo el proyecto NCHRP 246 (9). Nueve especímenes son compactados y divididos en tres grupos. El primer grupo es tratado como el grupo de control sin acondicionamiento. Los especímenes del grupo 2 son saturados con agua por 30 minutos. Los especímenes del grupo 3 también son saturados y luego sometidos a un ciclo de congelamiento (-18°C por 15 horas) y descongelamiento (60°C por 24 horas). Para todos los especímenes se obtiene el módulo resiliente y la tensión diametral a una tasa de 1.65 mm/min.

El grupo 2 simula el desempeño en campo de hasta 4 años. El grupo 3 simula el desempeño en campo de 4 a 12 años. En ambos casos la resistencia retenida se calcula como la razón de tensión diametral de especímenes acondicionados y de control.

2.4.6 Ensayo de Lottman Modificado

Este método fue desarrollado por Kandhal y adoptado por AASHTO en 1985 (11) y actualmente es uno de los ensayos más utilizados para determinar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas. El procedimiento es similar al del ensayo original de Lottman con algunas excepciones. Una de las modificaciones es que la saturación se lleva a cabo hasta alcanzar un nivel de 70 a 80%, en vez de utilizar un tiempo fijo de 30 minutos. Otro cambio corresponde a la temperatura y tasa de carga utilizados. El procedimiento modificado requiere una tasa de 50 mm/min a 25°C en vez de los 1.65 mm/min a 13°C. Este aumento en la tasa de carga y temperatura se implementó para permitir la falla de especímenes con un estabilómetro Marshall, el cual está disponible en la mayoría de laboratorios (2).

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 17 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



El ensayo consiste en curar la mezcla asfáltica suelta por 16 horas a 60°C, seguido por un período de envejecimiento de 2 horas a 135°C. Al menos 6 especímenes son compactados con un contenido de vacíos entre 6.5% y 7.5%. La mitad de los especímenes son sometidos a saturación y acondicionados a través de un ciclo de congelamiento (opcional) a -18°C por 16 horas, y posteriormente colocados en un baño de agua a 60°C por 24 horas. El resto de los especímenes se mantiene en condición seca. Todas las muestras se llevan a temperatura constante y se obtiene la tensión diametral.

Este ensayo fue adoptado por el sistema Superpave como el método requerido para determinar el daño por humedad, lo cual lo ha convertido en el procedimiento más utilizado para evaluar la susceptibilidad a este tipo de deterioro. Sin embargo, se trata de un ensayo empírico que tiende a dar falsos negativos o positivos en la predicción de la susceptibilidad al daño por humedad. Las principales preocupaciones con esta prueba son su reproducibilidad y su capacidad de predecir la susceptibilidad a la humedad con una confianza razonable.

2.4.7 Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo

El ensayo de rueda cargada de Hamburgo (12) mide los efectos combinados de la deformación permanente y el daño por humedad al rodar una rueda de metal a lo largo de la superficie de un espécimen de concreto asfáltico que se encuentra inmerso en agua caliente. Cada rueda pasa 20,000 veces o hasta que se alcance una deformación de 20 mm.

Los resultados del ensayo son la consolidación post compactación, la pendiente de deformación, la pendiente de desnudamiento, y el punto de inflexión de desnudamiento, como lo muestra la

Figura 2. La consolidación post compactación es la deformación medida a las 1,000 pasadas, suponiendo que la rueda está densificando la mezcla. La pendiente de deformación es el número de repeticiones necesarias para crear una deformación de 1 mm debido al flujo viscoso. La pendiente de desnudamiento está representada por el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación, después de iniciar el desnudamiento y hasta el final del ensayo. La pendiente de desnudamiento puede cuantificarse como el número de pasadas requeridas para crear una deformación de 1 mm a causa del desnudamiento. El punto de inflexión de desnudamiento es el número de pasadas en la intersección de las pendientes de deformación y desnudamiento representa la resistencia de la mezcla al daño por humedad y se asume que es el inicio del desnudamiento.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 18 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



Aschenbrener (13) encontró que existe una excelente correlación entre el desnudamiento observado en el laboratorio y el daño por humedad de pavimentos con desempeño en campo conocido. Se encontró que para pavimentos con buen desempeño, el punto de inflexión de desnudamiento era mayor a 10,000 pasadas, mientras que para pavimentos que duraron un año este valor fue menor a 3,000 pasadas. Además, se encontró que los resultados del ensayo son sensibles a propiedades del agregado como recubrimiento de polvo, contenido de arcilla y razones polvo/asfalto altas.

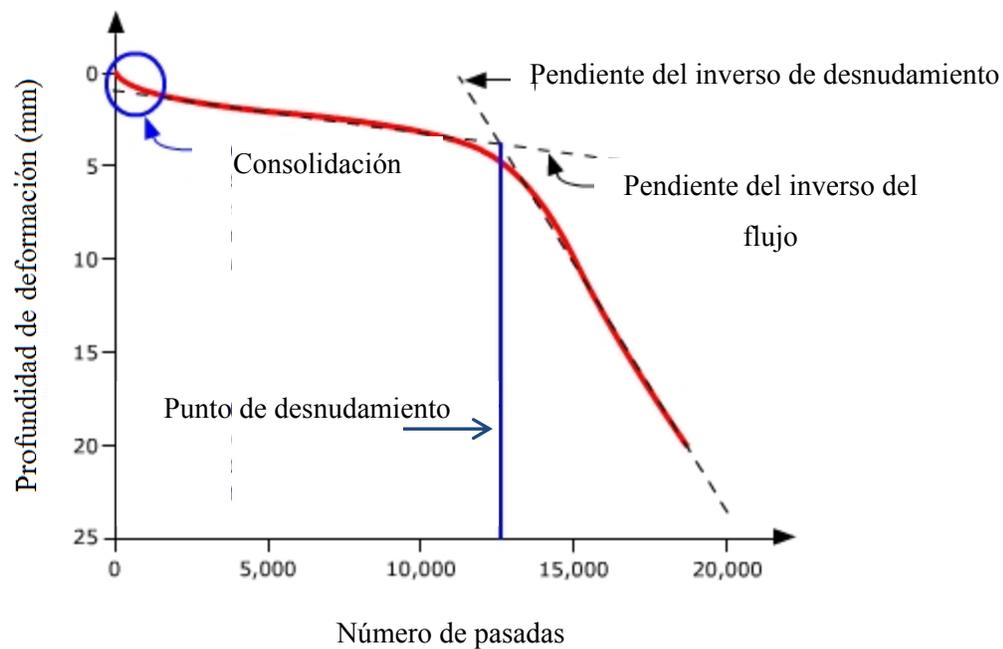


Figura 2. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (2)

A pesar de su utilidad como un ensayo de detección, este método no provee una propiedad fundamental que pueda ser utilizada para propósitos de modelación. Otra desventaja es que no existen valores recomendados para climas y niveles de tráfico específicos.

2.5 MÉTODOS PARA PREVENIR EL DAÑO POR HUMEDAD

La mejor manera de prevenir el daño por humedad es realizar ensayos de laboratorio en la mezcla asfáltica y utilizar una combinación de agregado y ligante que no se desprenda. Sin embargo, esto no siempre es posible debido muchas razones como la ausencia de agregados adecuados, mayores costos de transporte de ciertos materiales, restricciones políticas, etc. Aún cuando la mezcla tenga



un buen desempeño en el laboratorio, no existe mucha certeza de que esta se comporte de igual modo en el campo. Para tratar de que la mezcla se comporte de igual modo en el laboratorio y en el campo, se deben tomar precauciones durante la construcción del pavimento, como proporcionar drenaje adecuado, utilizar técnicas de compactación apropiadas, etc. (15).

Se ha mostrado que diferentes tipos de pre-tratamientos de los agregados pueden mejorar la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla. Estos pre-tratamientos incluyen precalentar el agregado para evaporar la humedad, lavado para remover la suciedad superficial, triturado, etc.

2.5.1 Aditivos antidesnudantes líquidos

La mayoría de agentes antidesnudantes líquidos son agentes tensoactivos (también llamados surfactantes) que al mezclarse con el ligante asfáltico reducen la tensión superficial, lo cual promueve una mayor adhesión con el agregado (1). Estos agentes generalmente son aminos o compuestos químicos que contienen aminos, los cuales son compuestos básicos fuertes derivados del amonio. La mayoría son catiónicos, diseñados para promover la adhesión entre el agregado ácido y el ligante asfáltico ácido. Algunos contienen compuestos tanto catiónicos como aniónicos y pueden mejorar la adhesión con todos los agregados y ligantes asfálticos. Unos pocos son aniónicos y están diseñados para promover la adhesión con superficies de agregados básicos (15).

La manera más simple y económica de incorporar estos aditivos a la mezcla es mezclar el antidesnudante con el ligante asfáltico en estado líquido previo a mezclarlo con el agregado. Aunque este es el método más utilizado, es ineficiente porque solo una porción del antidesnudante alcanza la interfase agregado-asfalto. Además, se debe asegurar que el aditivo sea termoestable para evitar que se desintegre y pierda su efectividad a altas temperaturas (1, 15).

Por otra parte, la aplicación directa del agente antidesnudante a la superficie del agregado es el método más eficiente y posiblemente el más efectivo. Sin embargo, una dispersión uniforme no es posible porque la cantidad de aditivo utilizada es muy poca (generalmente entre 0.5 y 1.5% por peso del ligante asfáltico) y la mezcla contiene una cantidad sustancial de finos (1).

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 20 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



2.5.2 Cal

Generalmente se utilizan tres formas de cal en las mezclas asfálticas: cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), óxido de calcio (CaO), y cal dolomítica. Muchos estudios han indicado que la cal es un agente antidesnudante muy efectivo, sin embargo, el mecanismo mediante el cual se mejora la susceptibilidad al daño por humedad no es bien comprendido. Se han postulado varios mecanismos (1):

- a) La cal interactúa con los ácidos en el ligante asfáltico que son fácilmente absorbidos en la superficie del agregado,
- b) La cal aporta iones de calcio que pueden reemplazar al hidrógeno, sodio, potasio y otros cationes en la superficie del agregado, y
- c) la cal reacciona con la mayoría de agregados silíceos para formar una corteza de silicato de calcio que tiene un enlace fuerte con el agregado y suficiente porosidad para permitir la penetración del ligante asfáltico para formar otro enlace fuerte.

La práctica general es añadir a la mezcla de 1 a 1.5% de cal por peso del agregado seco. Agregados más finos podrían requerir porcentajes más altos debido al aumento en área superficial del agregado. Existen varios métodos para incorporar la cal a la mezcla. La cal seca se añade previo al ligante asfáltico. Sin embargo, es difícil mantener el recubrimiento sobre el agregado hasta que se agregue el asfalto. Utilizar una suspensión (*slurry*) de cal aumenta la cantidad de combustible requerido para secar los agregados, y por lo tanto aumenta los costos de producción. Añadir cal seca a agregados húmedos proporciona los mismos resultados que la suspensión (15, 16).

Además de proporcionar beneficios como antidesnudante, el uso de la cal también presenta otras ventajas (17):

- 1) Actúa como relleno mineral para rigidizar el ligante asfáltico y la mezcla.
- 2) Mejora la resistencia al crecimiento de las fracturas (mejora la resistencia) a bajas temperaturas.
- 3) Altera la cinética de oxidación favorablemente e interactúa con productos de oxidación para reducir sus efectos perjudiciales.
- 4) Altera las propiedades plásticas de los finos de arcilla para mejorar la sensibilidad a la humedad y la durabilidad.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 21 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



2.5.3 Modificación con polímeros

El uso de asfaltos modificados con el polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) es uno de los métodos utilizados para producir mezclas asfálticas más resistentes al desnudamiento (18). La modificación se lleva a cabo mezclando entre 2 a 5% de polímero con el asfalto base. La adición de estas pequeñas cantidades de polímero tiene como resultado un asfalto más estable, mejorado elásticamente y resistente, que da mejor desempeño al pavimento. Aunque es bien conocido que la modificación proporciona mayor resistencia a la deformación a temperaturas altas y al agrietamiento a temperaturas bajas, se desconoce con certeza de qué forma impacta la resistencia al daño por humedad (19).

3 MÉTODOLOGÍA Y ALCANCE

Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizarán diseños de mezcla de manera que incluyan una variedad de materiales y granulometrías representativas de las mezclas típicas de Costa Rica, considerando además la inclusión de nuevas tecnologías. Las mezclas serán sometidas a ensayos de laboratorio para evaluar su desempeño.

3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Se seleccionarán 3 fuentes de agregado con diferentes orígenes geológicos y propiedades físicas que históricamente hayan presentado diferentes niveles de resistencia al daño por humedad en campo. Cada fuente se utilizará para realizar diseños de mezcla volumétricos Superpave para 2 granulometrías con tamaños nominales (TMN) de 12.5 y 9.5 mm. Se utilizarán dos fuentes de ligante asfáltico.

Los materiales utilizados serán caracterizados para obtener sus propiedades físicas y mecánicas con el fin de relacionarlas con el desempeño de las mezclas asfálticas.

3.2 DISEÑOS DE MEZCLA

Con el fin de evaluar el efecto de distintos modificantes o aditivos en la resistencia de las mezclas al daño por humedad, para cada fuente de agregado y granulometría se realizarán diseños de mezcla volumétricos Superpave para las siguientes condiciones:

- ❖ Mezcla sin tratar (control).

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 22 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS.
- ❖ Mezcla tratada con 1% de cal.
- ❖ Mezcla tratada con 0.5% de aditivo antidesnudante (AD).
- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS y tratada con 1% de cal.
- ❖ Mezcla modificada con 2% de polímero SBS y tratada con 0.5% de aditivo antidesnudante (AD).

Estos porcentajes de modificante y aditivos corresponden a contenidos típicamente utilizados para la producción de mezclas asfálticas o recomendadas por los respectivos proveedores. Los contenidos de polímero y aditivo líquido antidesnudante son porcentajes sobre el peso del ligante asfáltico, mientras que para la cal, se trata de un porcentaje sobre el peso del agregado seco.

3.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Las combinaciones descritas en el Apartado 3.2 resultarán en un total de 12 mezclas para cada fuente de agregado. La evaluación del desempeño mediante ensayos de laboratorio se realizará en dos fases:

3.3.1 Fase I

Objetivo: Evaluar la susceptibilidad de las mezclas al daño por humedad con las siguientes técnicas:

- ❖ AASHTO T324, Ensayo Rueda de Hamburgo a 50 °C.
- ❖ AASHTO T283, Resistencia Retenida a Tensión Diametral para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP79, Módulo Dinámico para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP79, FlowNumber para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

3.3.2 Fase II

Objetivo: Seleccionar las mezclas con mejor desempeño para evaluar resistencia a la deformación permanente en el estado sin envejecer y resistencia al agrietamiento por fatiga con envejecimiento a largo plazo.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 23 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



4 RESULTADOS PRELIMINARES

A continuación, se resumen los resultados obtenidos a la fecha.

4.1 MATERIALES

4.1.1 Agregados

A continuación, se desglosan las fuentes de agregados utilizadas y sus respectivas características.

4.1.1.1 Fuente A

Agregados provenientes del Tajo Procamar, en Barranca, Puntarenas. El material se encuentra dividido en cuatro apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente A

Malla	Apilamiento			
	2265-13	2266-13	2267-13	2268-13
3/4"	100	100	100	100
1/2"	61	58.4	100	99.3
3/8"	4.41	5.72	100	68.8
N° 4	2.99	1.83	82.4	2.72
N° 8	2.41	1.53	55.1	1.59
N° 16	2.02	1.41	37.9	1.34
N° 30	1.81	1.34	27.7	1.22
N° 50	1.7	1.26	20.2	1.11
N° 100	1.38	1.09	14.6	0.96
N° 200	1.11	0.91	10.5	0.79
Gbs	2.63	2.65	2.51	2.63
Gsa	2.78	2.79	2.78	2.78
% Abs	2	1.9	3.9	2



4.1.1.2 Fuente B

Agregados provenientes del MECO. El material se encuentra dividido en tres apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente B

Malla	Apilamiento		
	1573-15	1574-15	1575-15
3/4"	100.0	100.0	100.0
1/2"	100.0	72.4	99.6
3/8"	100.0	21.6	87.8
N° 4	84.7	4.5	7.3
N° 8	59.1	3.0	3.3
N° 16	40.8	2.7	2.4
N° 30	28.6	2.4	1.9
N° 50	19.8	1.9	1.6
N° 100	13.7	1.3	1.4
N° 200	9.3	1.0	1.2
<i>Gbs</i>	2.59	2.67	2.66
<i>Gsa</i>	2.78	2.78	2.79
<i>% Abs</i>	2.6	1.6	1.7



4.1.1.3 Fuente C

Agregados provenientes del Río Claro. El material se encuentra dividido en cuatro apilamientos, cuyas propiedades se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente C

Malla	Apilamiento			
	2137-16	2138-16	2139-16	2140-16
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0
1/2"	100.0	99.0	100.0	45.8
3/8"	100.0	39.4	98.3	2.9
N° 4	92.5	1.7	3.9	1.3
N° 8	60.0	1.2	1.9	1.1
N° 16	39.5	1.0	1.4	0.9
N° 30	26.8	0.8	1.2	0.8
N° 50	19.2	0.7	1.0	0.7
N° 100	14.3	0.6	0.9	0.7
N° 200	11.4	0.5	0.8	0.6
Gbs	2.49	2.61	2.6	2.64
Gsa	2.72	2.73	2.72	2.73
% Abs	3.3	1.6	1.7	1.3

4.1.2 Ligante asfáltico

La fuente de ligante asfáltico utilizado para la confección de las mezclas asfálticas con agregados de Fuentes A y B proviene de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) y se clasifica como un asfalto PG 70-22 de acuerdo a su grado de desempeño. Las propiedades de este asfalto base, así como las del asfalto modificado con SBS y tratado con agente líquido antidesnudante se muestran en la Tabla 7.



Tabla 7. Propiedades de los asfaltos (Fuentes A y B)

Propiedad	Base	Base + SBS	Base + Antidesnudante
Densidad a 25°C, g/cm ³	1.022	1.021	1.024
Gravedad específica	1.025	1.024	1.027
Viscosidad compleja a 60°C, P	3505	6019	4026
Penetración a 25°C, 1/10 mm	53	39	48
Punto de ablandamiento, °C	49.4	52.95	51.65
Recuperación elástica, %	5.3	75.5	4.7
Grado de desempeño	PG 70 (28) - 22	PG 76 (25) - 22	PG 64 (25) - 22
J _{NR} @ 0.1 kPa (a 70°C)	2.919	1.245	2.605
J _{NR} @ 3.2 kPa (a 70°C)	3.286	1.503	2.975
$(J_{NR@3.2 \text{ kPa}} - J_{NR@0.1 \text{ kPa}}) / J_{NR@0.1 \text{ kPa}}$	12.57	20.71	14.18

Para los resultados mostrados, puede observarse como la adición del polímero SBS tiene un efecto rigidizante en el asfalto base, el cual se ve evidenciado en una mayor viscosidad, menor penetración, y un aumento en un grado en el grado de desempeño alto. Los valores de J_{NR} también disminuyeron, indicando una mayor resistencia a la deformación permanente. Por su parte, la inclusión de agente antidesnudante produce un asfalto menos rígido, lo cual se ve reflejado principalmente en una disminución de un grado en el grado de desempeño alto.

La fuente de ligante asfáltico utilizado para la confección de la mezclas asfálticas con agregado de Fuente C proviene de la planta productora de MECO ubicada en y se clasifica como un asfalto PG 64-22 de acuerdo a su grado de desempeño. Las propiedades del asfalto base, modificado con SBS, tratado con agente líquido antidesnudante y modificado con ambos se muestran en la **Tabla 8**.



Tabla 8. Propiedades de los asfaltos (Fuente C)

Propiedad	Base	Base + SBS	Base + Antidesnudante	Base +SBS+ Antidesnudante
Densidad a 25°C, g/cm ³	1.029	1.028	1.030	1.028
Gravedad específica	1.032	1.031	1.033	1.031
Viscosidad compleja a 60°C, P	3295	6810	3112	5538
Penetración a 25°C, 1/10 mm	51	41	52	45
Punto de ablandamiento, °C	49.70	54.60	-	52.20
Recuperación elástica, %	1	16	-	27
Grado de desempeño	PG 64(25)-22	PG 70(25)-22	PG 64(25)-22	PG 70(25)-22
J _{NR} @ 0.1 kPa (a 70°C)	2.1	2.4	2.3	3.0
J _{NR} @ 3.2 kPa (a 70°C)	2.3	2.8	2.5	3.5
(J _{NR@3.2 kPa} - J _{NR@0.1 kPa})/J _{NR@0.1kPa}	9.5	16.7	8.7	17.0

Los resultados de las pruebas al asfalto incorporando el aditivo SBS se verificarán nuevamente debido a que los resultados que aparecen en la **Tabla 8** no son consistentes con los mostrados en la **Tabla 7**.

4.2 DISEÑOS DE MEZCLA

Para evaluar el desempeño de las mezclas y el efecto del uso de modificantes y aditivos, se procedió a realizar un total de 12 diseños de mezcla, que incluyen diferentes combinaciones de materiales para las dos granulometrías definidas. La selección de la estructura de agregado y contenido óptimo de asfalto se realizó para las mezclas de control, mientras que para las mezclas que contienen modificantes y/o aditivos, solamente se llevó a cabo una verificación del contenido óptimo de asfalto, manteniendo las mismas granulometrías.



La **Figura 3** y la **Figura 4** presentan las granulometrías óptimas para las mezclas de tamaño nominal máximo de 9.5 y 12.5 mm, respectivamente para las 3 fuentes de agregados. Las curvas granulométricas aparecen en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Curvas granulométricas de diseño

Malla	TMN 9.5 mm			TMN 12.5 mm		
	Fuente A	Fuente B	Fuente C	Fuente A	Fuente B	Fuente C
3/4"	100	100	100.0	100	100	100.0
1/2"	100	100	99.9	95.4	95.9	94.5
3/8"	95.0	94.7	91.5	78.3	84.7	83.7
N° 4	60.0	49.0	49.7	43.3	48.5	45.1
N° 8	40.0	32.7	32.0	28.9	32.6	29.1
N° 16	25.0	22.5	21.2	20.0	22.4	19.2
N° 30	17.0	16.0	14.5	14.8	16.0	13.1
N° 50	10.0	11.4	10.4	10.9	11.4	9.5
N° 100	7.0	7.8	7.8	8.0	7.9	7.1
N° 200	5.0	5.6	6.3	5.8	5.6	5.7

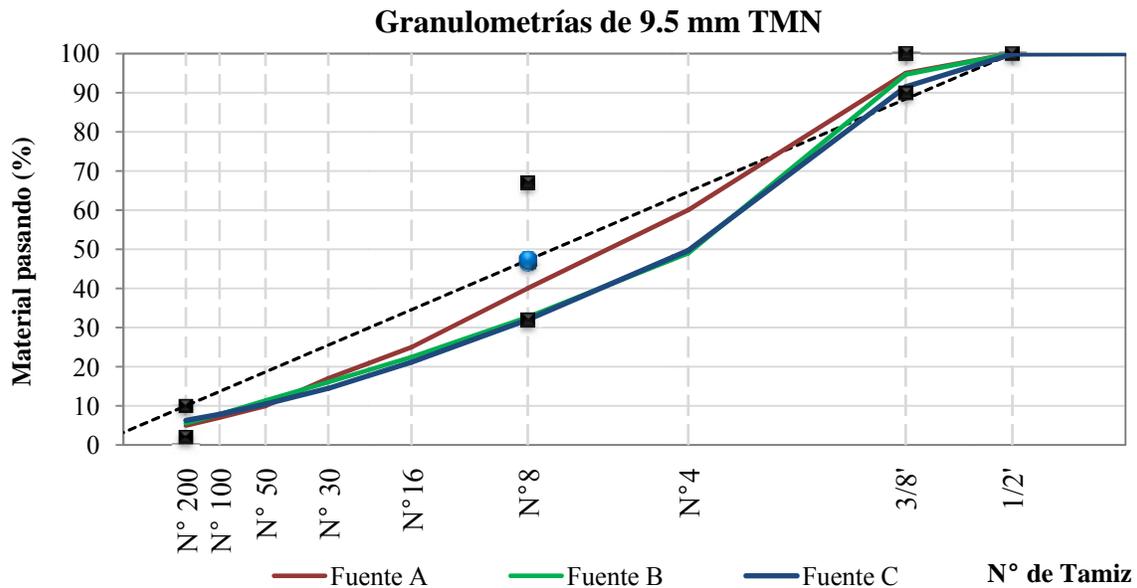


Figura 3. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm

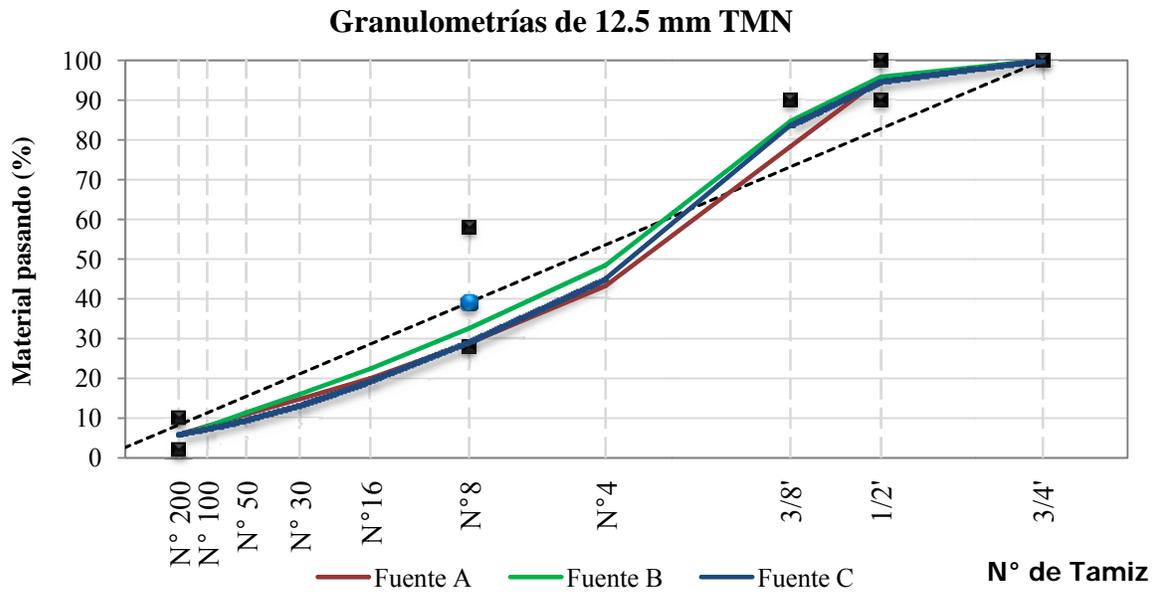


Figura 4. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm

Estas estructuras de agregado fueron utilizadas para calcular el porcentaje de asfalto óptimo, mediante la metodología Superpave para un nivel de compactación de 100 giros.

La **Tabla 10** muestra las propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas hasta el periodo de noviembre de 2016.



Tabla 10. Propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas

	Mezcla	% Asfalto	% VMA	% VFA	Polvo/asfalto
Fuente A	9.5 Control	6.5	15.5	73.7	1.0
	9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
	9.5 LAS	6.5	15.9	72.7	1.0
	9.5 SBS+LAS	6.3	15.4	72.9	1.0
	9.5 Cal	6.7	16.3	74.4	0.9
	9.5 SBS+Cal	6.6	16.0	74.4	1.0
Fuente B	9.5 Control	6.6	15.6	74.5	1.1
	9.5 SBS	6.6	15.6	74.5	1.1
	9.5 LAS	6.4	15.2	73.8	1.1
	9.5 SBS+LAS	6.7	15.7	74.7	1.1
	9.5 Cal	6.5	15.6	74.4	1.1
	9.5 SBS+Cal	6.5	15.5	74.0	1.1
Fuente C	9.5 Control	6.3	14.8	73.0	1.3
Fuente A	12.5 Control	7.0	15.8	74.5	1.1
	12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
	12.5 LAS	6.5	14.7	72.7	1.2
	12.5 SBS+LAS	5.9	13.1	69.9	1.5
	12.5 Cal	6.0	14.0	71.5	1.3
	12.5 SBS+Cal	6.3	14.3	72.0	1.3
Fuente B	12.5 Control	6.2	14.9	73.3	1.2
	12.5 SBS	6.2	14.7	72.9	1.2
	12.5 LAS	6.1	14.5	72.1	1.2
	12.5 SBS+LAS	6.3	14.9	73.5	1.2
	12.5 Cal	5.9	14.5	72.2	1.3
	12.5 SBS+Cal	5.9	14.4	72.6	1.3
Fuente C	12.5 Control	6.2	14.3	71.9	1.4



5 ENSAYOS DE LABORATORIO

El avance del esquema experimental se presenta en la **Tabla 12**, de acuerdo a los ensayos definidos en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Ensayos de laboratorio de Fase I y Fase II

Ensayos de laboratorio	
Módulo dinámico	MD
Resistencia Retenida a la Tensión Diametral	RRTD
FlowNumber	FN
Viga de Fatiga a Flexotracción	VF
Rueda de Hamburgo	RH

Tabla 12. Avance de ensayos de desempeño hasta noviembre de 2016

Mezcla	Asfalto	Fuente A					Fuente B				
		MD	RRTD	FN	VF	RH	MD	RRTD	FN	VF	RH
TMN 9.5 mm	Control	√	√	√	√		√	√	√		√
	SBS	√	√	√	√		√	√	√		
	LAS	√	√	√			√	√	√		
	SBS+LAS	√	√	√	√		√	√	√		
	Cal	√	√	√			√	√	√		√
	SBS+Cal	√	√	√	√		√	√	√		
TMN 12.5 mm	Control	√	√	√	√		√	√	√		
	SBS	√	√	√	√		√	√	√		
	LAS	√	√	√			√	√	√		
	SBS+LAS	√	√	√	√		√	√	√		
	Cal	√	√	√			√	√	√		
	SBS+Cal	√	√	√	√		√	√	√		



5.1 MÓDULO DINÁMICO

El ensayo de Módulo Dinámico, definido en la primera fase de la investigación, se realizó para la condición sin acondicionar y para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento. Dicho procedimiento en la condición inicial permite cuantificar la rigidez de la mezcla. Al someter los especímenes a ciclos de acondicionamiento, se produce un deterioro de la mezcla que genera una caída de rigidez. Esta reducción se asocia directamente a la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad; cuanto mayor sea la diferencia en módulo dinámico de los especímenes acondicionados respecto a los secos, más susceptibles son las mezclas al daño por humedad.

En la **Figura 5** y la **Figura 6** se presenta gráficamente la siguiente relación:

$$\text{Razón } E^* = \frac{E_n^* \text{ ciclos de congelamiento}}{E_{\text{sin acondicionar}}^*}$$

Donde E^* corresponde al valor de módulo dinámico medido a la 20 °C y a 10 Hz, y el número de ciclos n corresponde a 1, 3 y 6 ciclos de congelamiento, según se muestra en las figuras, con base en los resultados obtenidos para los ensayos realizados en la Fuente A y Fuente B, respectivamente.

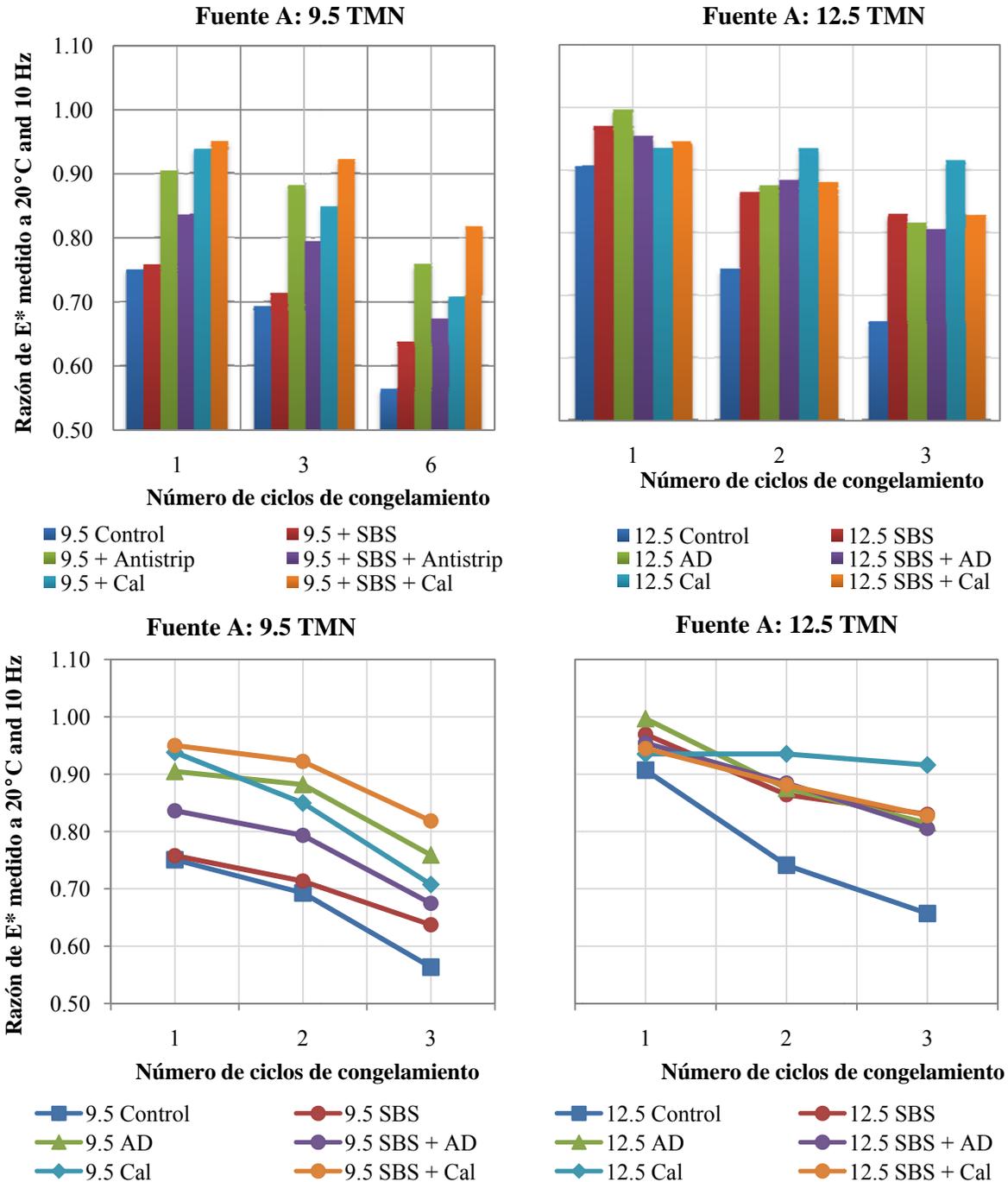


Figura 5. Resultados de razones de E* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente A



Los resultados presentados en la **Figura 5** evidencian una caída de rigidez importante en las mezclas de control conforme se incrementa el número de ciclos de acondicionamiento, la condición más crítica se identifica en las mezclas de TMN de 9.5 mm. Por su parte, se revela que las mezclas a las que se les adiciona Antidesnudante o Cal presentan un mejor desempeño al daño por humedad, donde la mezcla de TMN de 12.5 modificada con Cal evidencia la mayor resistencia al daño por humedad y un desempeño más consistente en los 3 niveles de daño evaluados.

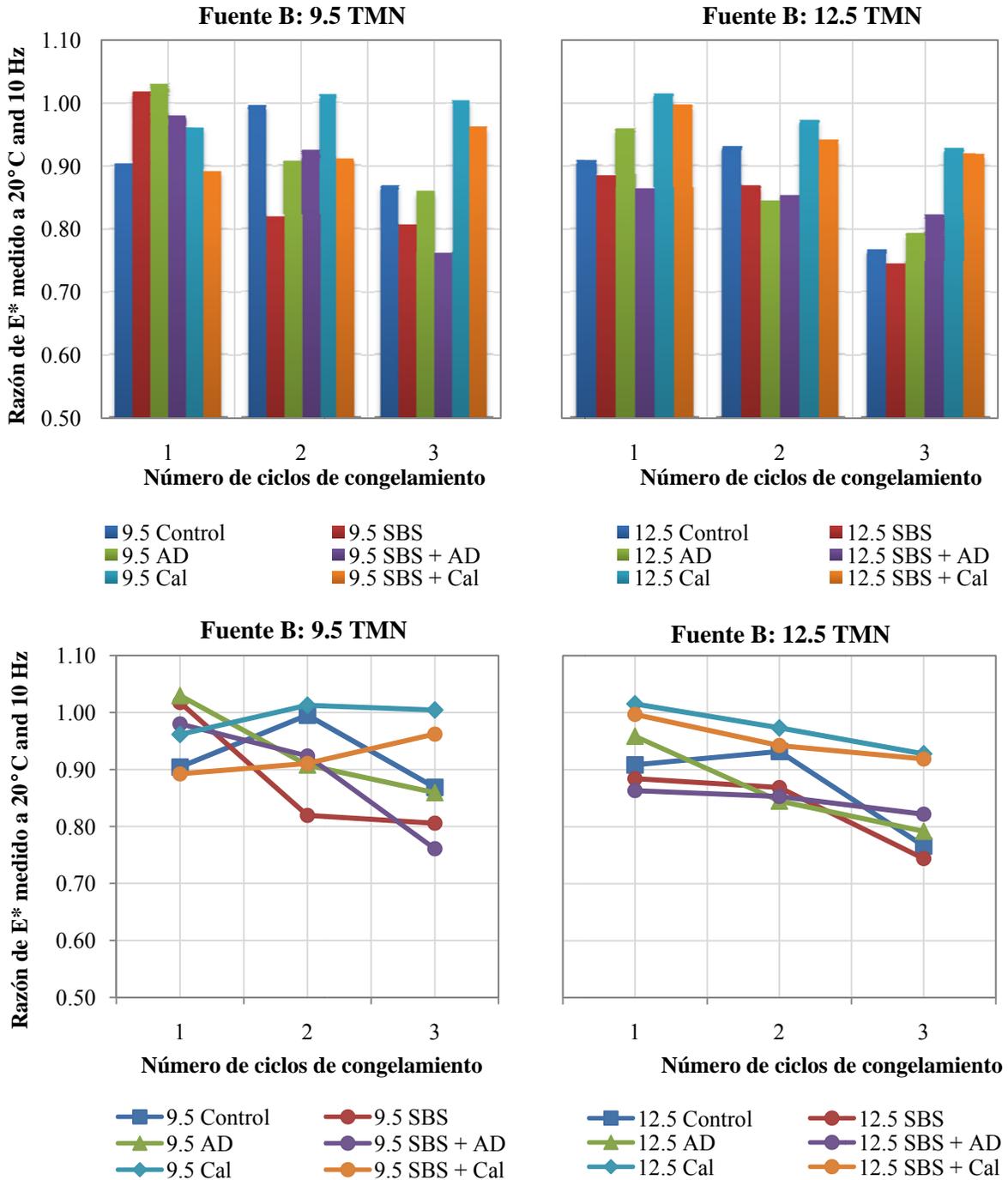


Figura 6. Resultados de razones de E* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente B



Por su parte, los resultados mostrados en la **Figura 6** revelan una variabilidad importante. Se identifica que las razones de módulo obtenidos en las mezclas con contenidos de Cal presentan el mejor desempeño al daño por humedad, consistente con los resultados obtenidos para la Fuente A. En el caso de la Fuente B, la mezcla de TMN de 9.5 modificada con Cal evidencia el mejor comportamiento ante este deterioro. Por otro lado, para el caso de la Fuente B, el efecto del Antidesnudante en la atenuación del daño no es evidente y en contraposición existe una caída de rigidez en función del incremento de ciclos de congelamiento.

5.2 RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL

El ensayo de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral como parte de la primera fase de la investigación se realizó para la condición sin acondicionar y para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

Con el objetivo de evaluar la susceptibilidad al daño por humedad se obtiene la relación TSR (*Tensile Strength Ratio*), definida por la siguiente expresión:

$$TSR = \frac{RRTD_{n \text{ ciclos de congelamiento}}}{RRTD_{sin \text{ acondicionar}}}$$

Los resultados obtenidos para los ensayos realizados en la Fuente A y Fuente B se muestran en la **Figura 7** y **Figura 8**; respectivamente.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 37 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------

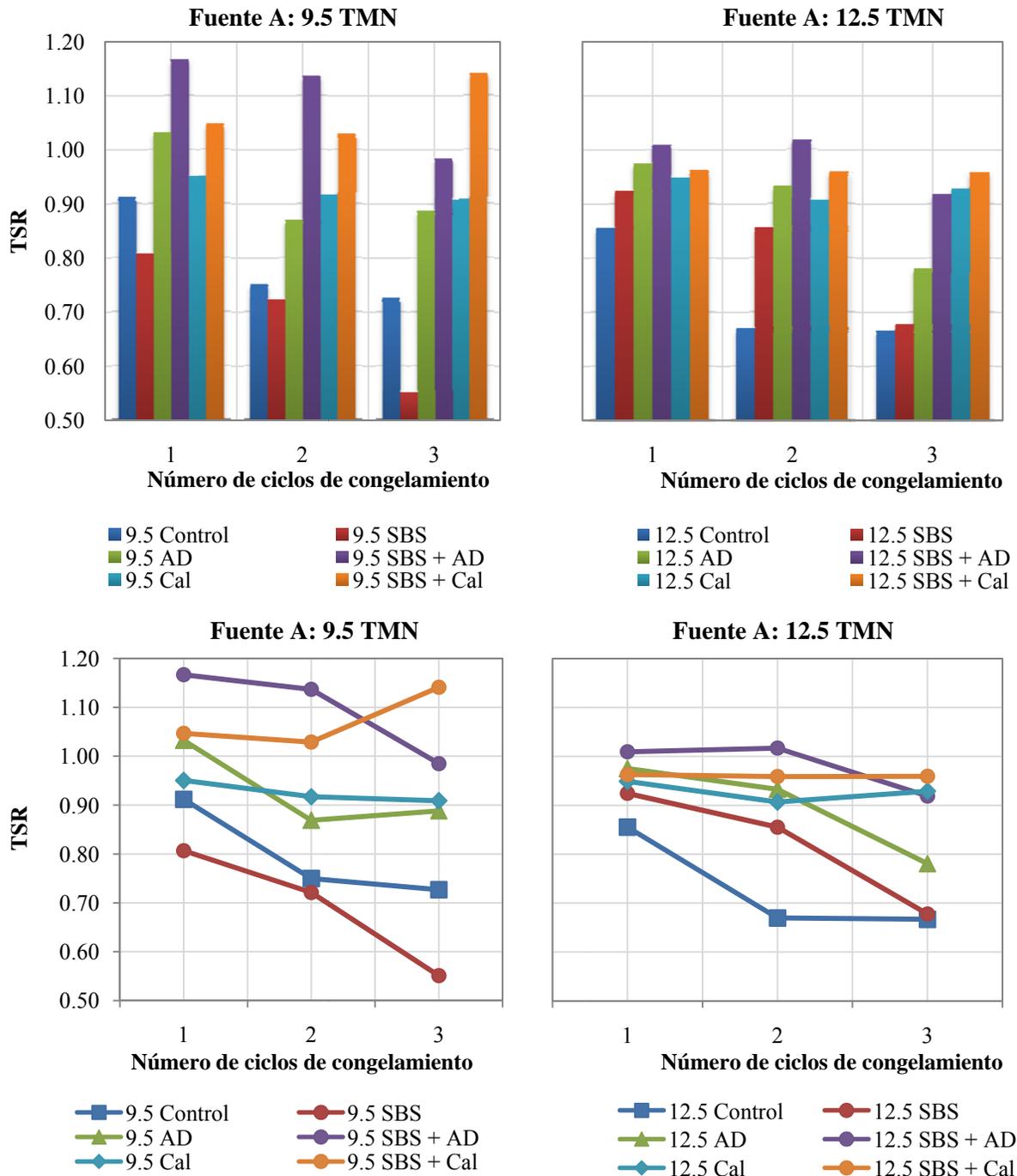


Figura 7. Resultados de TSR de la Fuente A



Los resultados mostrados en la **Figura 7** evidencian el mejor desempeño en las mezclas modificadas con SBS en adición con un agente Antidesnudante o Cal. Debe destacarse que la acción individual del modificador SBS revela susceptibilidad al daño por humedad en ambas configuraciones granulométricas.

En el caso del ensayo de RRTD y a diferencia del ensayo de Módulo Dinámico, el mejor desempeño no se obtiene para la condición con cal, lo cual revela una afectación en función del modo de falla de los especímenes.

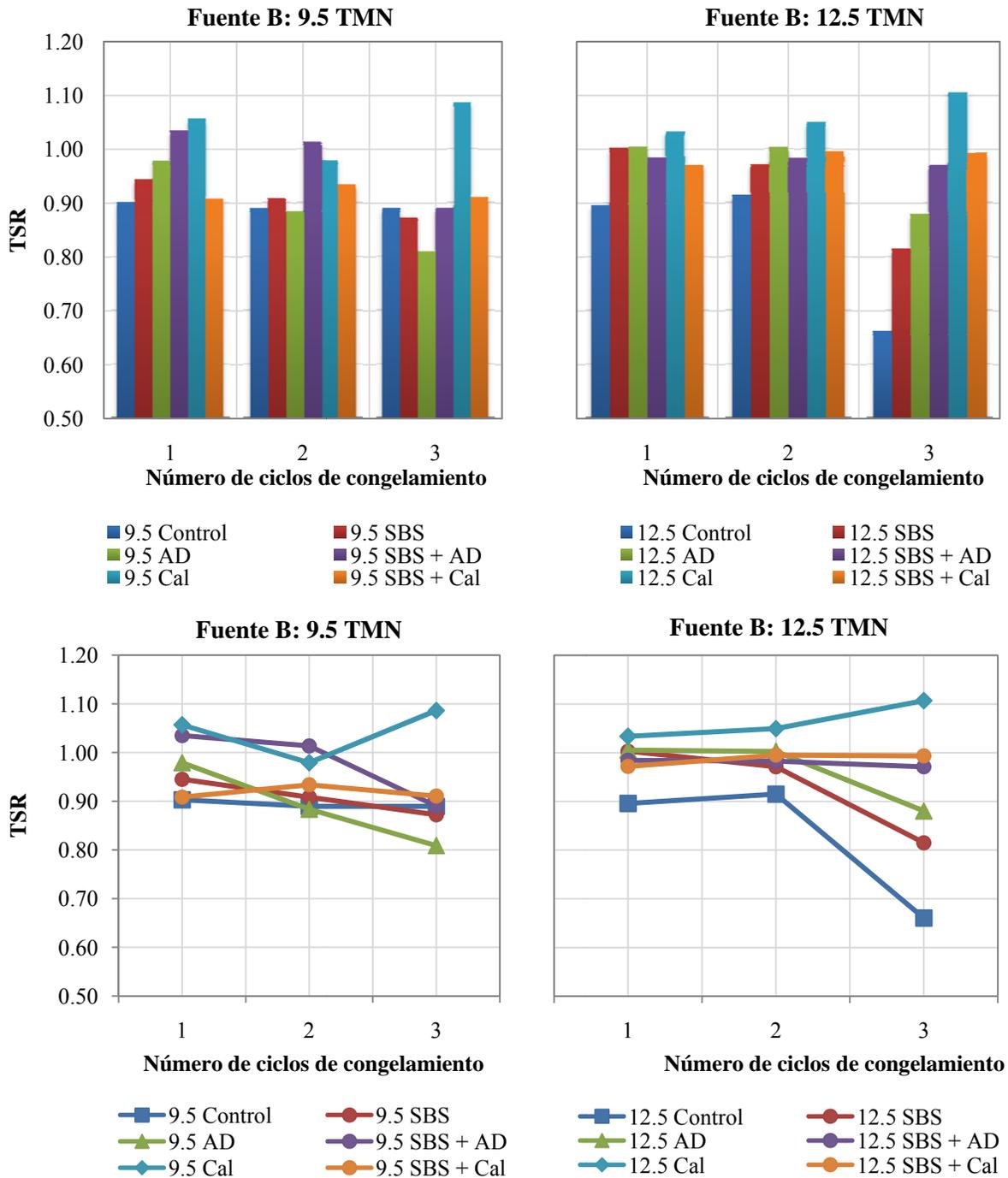


Figura 8. Resultados de TSR de la Fuente B



Para la Fuente B se obtiene un mejor desempeño en las mezclas modificadas con cal, más aún en mezclas de TMN de 12.5 mm. El aporte de resistencia al daño por humedad evidenciado en las mezclas de la fuente A producto de la adición de SBS no es significativo para los agregados de la Fuente B. Lo anterior genera un indicio de falta de compatibilidad entre el asfalto modificado con SBS y los agregados.

5.3 FLOWNUMBER

El ensayo de FlowNumber se realizó para la condición sin acondicionar y para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento. Dicho procedimiento se aplica en los especímenes posterior a la ejecución del ensayo de Módulo Dinámico.

El objetivo de este ensayo consiste en cuantificar el efecto del daño por humedad en la pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica.

En la **Figura 9** y la **Figura 10** se presenta gráficamente la siguiente relación:

$$\text{Razón de Flow Number} = \frac{FN_{n \text{ ciclos de congelamiento}}}{FN_{\text{sin congelamiento}}}$$

Donde FN corresponde al número de ciclos para ingreso a flujo terciario a n ciclos de congelamiento respecto a la condición sin acondicionar.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 41 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------

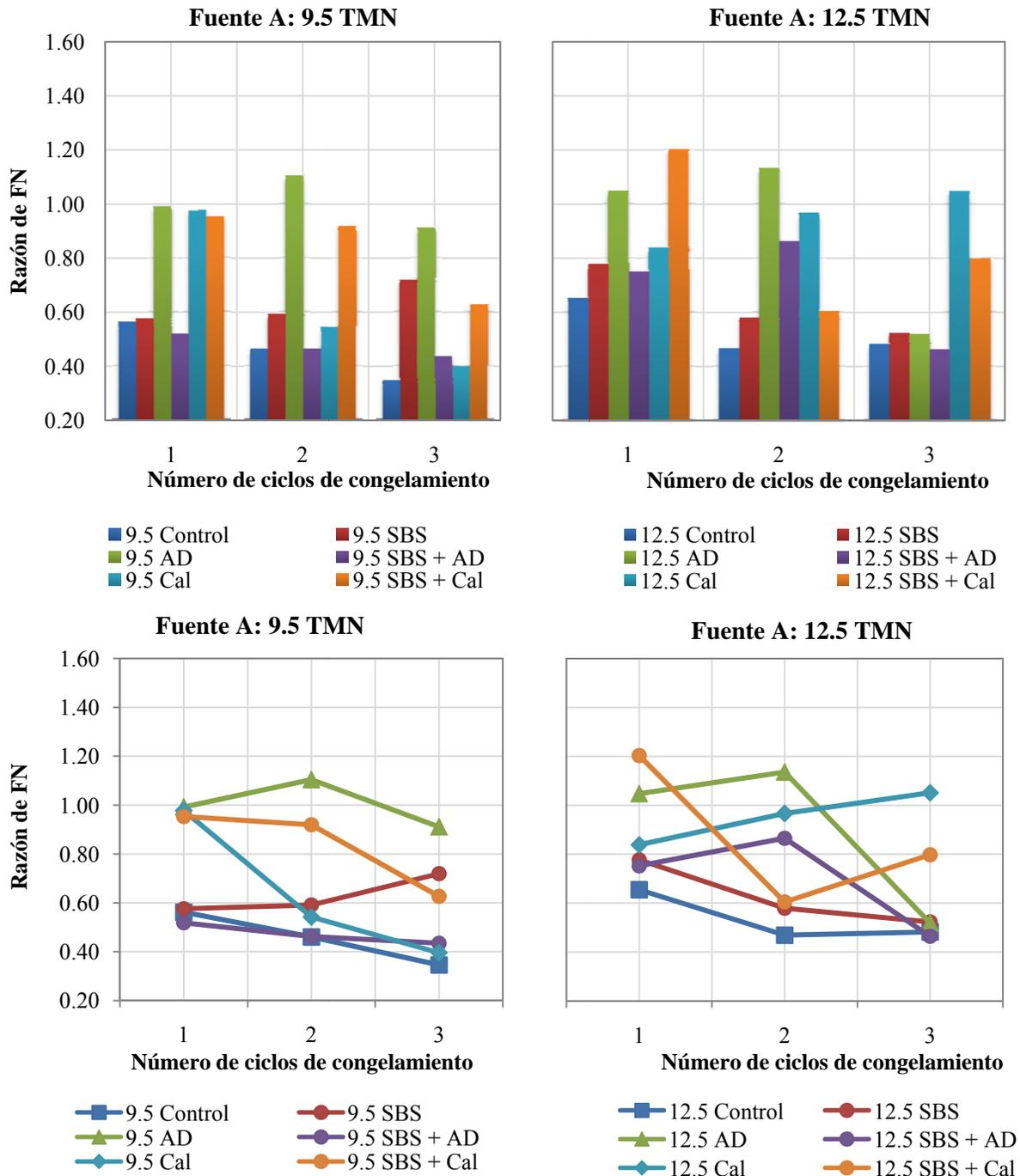


Figura 9. Resultados de Flow Number de la Fuente A



Con base en la **Figura 9** el desempeño más consistente al daño por humedad se identifica para las mezclas 12.5 mm modificadas con Cal. A nivel general para la Fuente A se evidencia la caída de la resistencia al daño por humedad en ausencia de aditivos antidesnudantes o Cal, siendo este último el modificador con mayor efectividad. Por otro lado, se revela un mejor desempeño en mezclas de TMN de 12.5 mm.

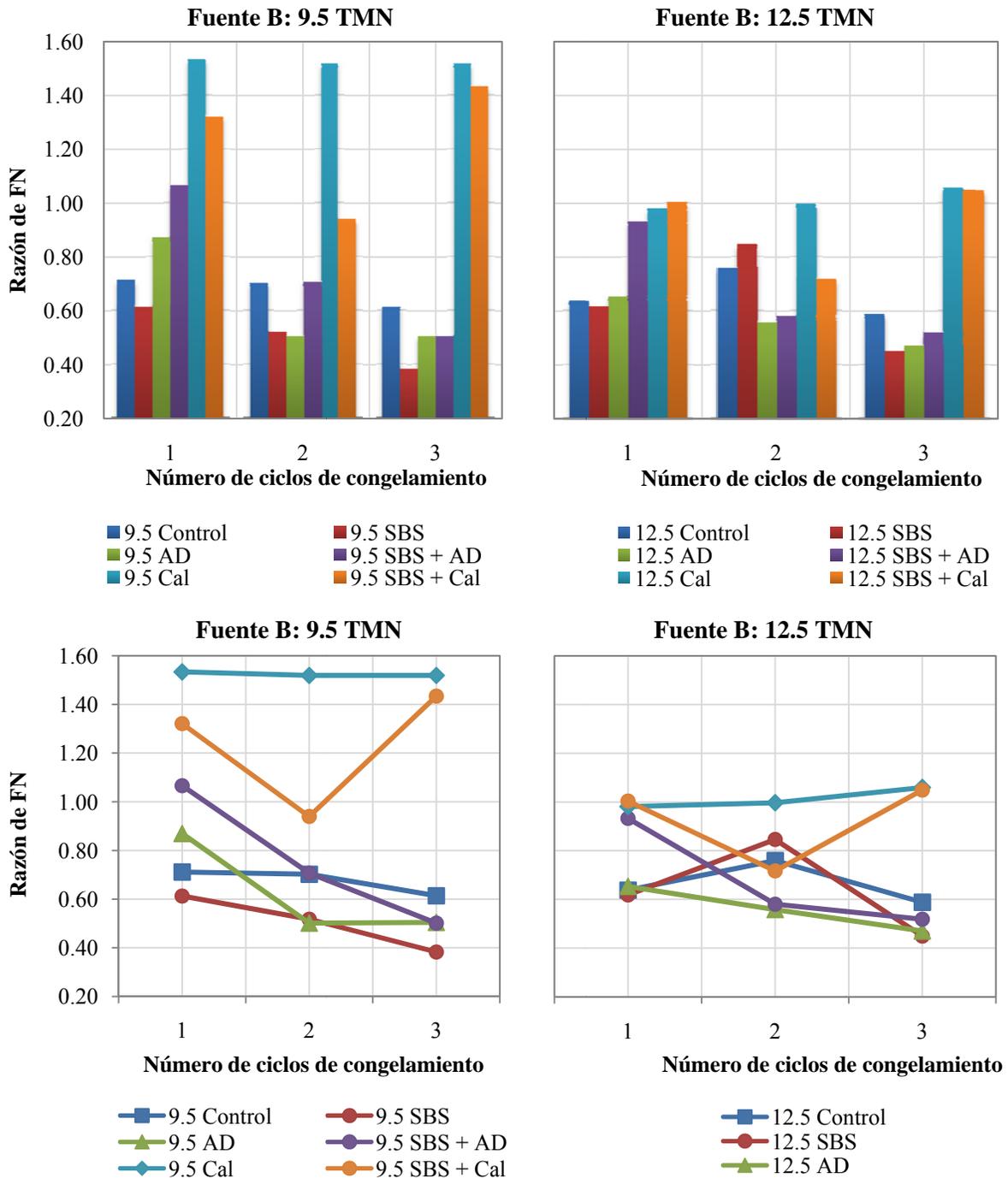


Figura 10. Resultados de Flow Number de la Fuente B



Los resultados mostrados en la **Figura 10** son contundentes en cuanto al aporte de la Cal en el desempeño a la resistencia al daño por humedad. Se evidencia nuevamente que la incorporación del agente SBS no genera un efecto significativo en el desempeño al daño por humedad en ausencia de un agente antidesnudante o la cal. En este caso las mezclas de TMN de 9.5 mm desarrollan mayores razones, lo cual no implica un mejor desempeño a la deformación permanente.

En general, los resultados evidencian un mejor desempeño para la Fuente B, primordialmente en la mezcla de TMN de 9.5 mm. Debe mencionarse que los contenidos óptimos de asfalto para las configuraciones de 9.5 mm exceden en promedio un 0.5% el porcentaje de asfalto de las mezclas de 12.5 mm, lo cual puede incidir en la resistencia al daño por humedad. Esta condición no se encuentra tan marcada en las mezclas de la Fuente A.

5.4 RUEDA DE HAMBURGO

En ensayo de Rueda de Hamburgo se realiza dentro de la Fase I del esquema experimental como un ensayo para la medición directa de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al daño por humedad.

De acuerdo al avance documentado a la fecha, se cuenta con los resultados de las mezclas de TMN de 9.5 MM en la condición control y modificada con cal (**Figura 11**).

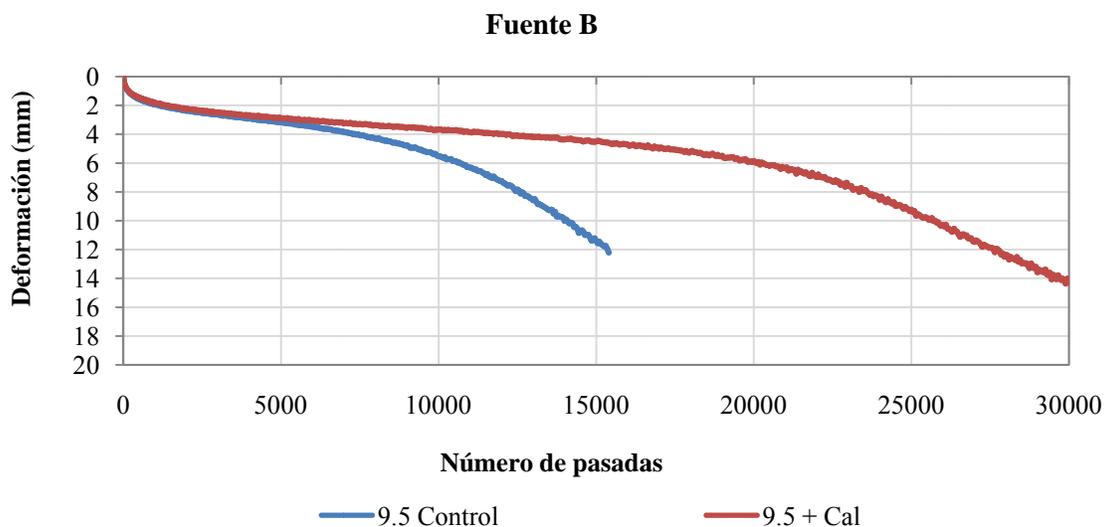


Figura 11. Resultados de Rueda de Hamburgo de la Fuente B



La **Figura 11** permite evidenciar el aporte de la cal en la resistencia al daño por humedad. El cambio de curvatura en la tendencia de la mezcla control ocurre aproximadamente a las 10 mil pasadas, mientras que para la condición modificada con cal la resistencia al daño por humedad supera las 20 mil pasadas.

5.5 VIGA A FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS

El ensayo de viga de fatiga a flexotracción en 4 puntos se define en la Fase II del esquema experimental. Esta prueba se realizó en 4 tratamientos de ligantes, tal y como se indica en la Sección 3.3.2. En **Figura 12** se presenta los resultados obtenidos del ensayo correspondientes al número de ciclos a la falla a 400 y 600 μ strain.

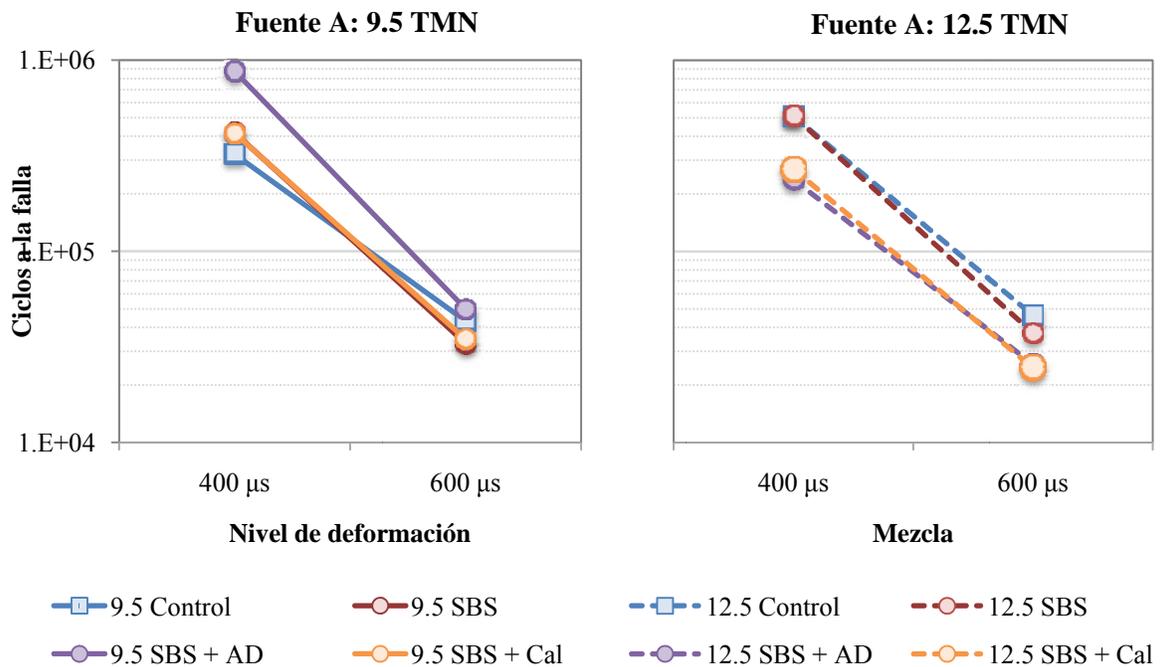


Figura 12. Resultados del ensayo de fatiga a deformación unitaria de 400 y 600 μ m

Los resultados que aparecen en la **Figura 12** revelan el mejor desempeño para la mezcla de TMN de 9.5 mm modificada con SBS y Antidesnudante. Por otro lado, haciendo una comparación entre



las mezclas de control, la configuración de 12.5 mm evidencia un mejor desempeño a la fatiga en ambos niveles de deformación, esta condición podría estar siendo influenciada por el contenido óptimo de tales mezclas (7,0% para la mezcla de TMN de 12.5 mm y 6.5% para la mezcla de TMN de 9.5 mm).

6 CONCLUSIONES

Con base en los resultados presentados con el avance del proyecto hasta noviembre de 2016 se enumeran las siguientes conclusiones preliminares:

- La adición de cal en la mezcla asfáltica evidencia una ganancia de resistencia al daño por humedad en los materiales analizados, dicha condición es más notoria en el caso de las mezclas conformadas con la Fuente B.
- La modificación de mezclas asfálticas a partir del uso del polímero SBS y agente antidesnudante líquido genera cambios en el desempeño de la mezcla ante deterioros típicos asociados al daño por humedad, estabilidad y agrietamiento por fatiga.
- Existe una afectación de los agentes modificadores: SBS, antidesnudante y cal, en las propiedades volumétricas de la mezcla, por lo que resulta necesario realizar una verificación del diseño en caso su incorporación.
- El asfalto base utilizado en las mezclas con agregado de la Fuente C presenta un grado de desempeño distinto al ligante utilizado para las Fuentes A y B, lo cual puede conducir a mezclas con menores rigideces en los ensayos de desempeño de las mezclas de la Fuente C.
- Se requiere del análisis de la totalidad de mezclas propuestas para poder determinar de manera objetiva el efecto de modificantes y aditivos, granulometría, y fuente de agregado en el desempeño de las mezclas asfálticas, así como el efecto de la interacción de dichos factores.

REPORTE: LM-PI-Ump-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 47 de 51
---------------------------	------------------------------------------	-----------------



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D.Y. & Kennedy, T.W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA Education Foundation, Lanham, MD, Third Edition, 2009.
2. Hicks R.G., L. Santucci, T. Aschenbrener. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar. San Diego. California. 2003. pp. 2-21.
3. Epps, J. A., P. E. Sebaaly, J. Penaranda, M. R. Maher, M. B. McCann, and A. J. Hand. NCHRP Report 444: Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.
4. Choubane, B., G. C. Page, and J. A. Musselman. Effects of Water Saturation Level on Resistance of Compacted Hot-Mix Asphalt Samples to Moisture-Induced Damage. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1723, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, pp. 97–106.
5. Kandhal, P., and I. Rickards. Premature Failure of Asphalt Overlays from Stripping: Case Histories. Asphalt Paving Technology, Vol. 70,2002, pp. 301–351.
6. Kringos N, Azari H and Scarpas A. Identification of Parameters Related to Moisture Conditioning That Cause Variability in Modified Lottman Test. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2127, 2009.
7. Hicks, R. G. NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1991.
8. Hicks, R. Gray, Larry Santucci, and Tim Aschenbrener. Introduction and seminar objectives. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
9. Kandhal, P. Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions. NCAT Report No. 92-01. National Center for Asphalt Technology, Auburn. Alabama, 1992.
10. Graf, P.E. Factors Affecting Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixes. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 55, 1986, pp. 175-204.
11. Bagampadde, U. On Investigation of Stripping Propensity of Bituminous Mixtures. Licentiate Thesis, Kungliga University of Technology, Sweden, 2004.



12. Stuart, K.D. Moisture Damage in Asphalt Mixtures - A State-of-the-Art Report. Publication No. FHWA-RD-90-019, Federal Highway Administration, 1990.
13. Sengoz, B. and E. Agar. Effect of Asphalt Film Thickness on the Moisture Sensitivity Characteristics of Hot-Mix Asphalt. Building and Environment Vol. 42, 2007, pp. 3621-3628.
14. St. Martin, J., L.A. Cooley and H.R. Hainin. Production and Construction Issues for Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
15. Putman, B.J. and S.N. Amirkhani. Laboratory Evaluation of Anti-Strip Additives in Hot Mix Asphalt. Report No. FHWA-SC-06-07, Federal Highway Administration, 2006.
16. Little, D.N. Y Jones, D., 2003. Chemical and mechanical mechanisms of moisture damage in hot mix asphalts pavements. Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar. San Diego, California. Washington DC: National Academies Press.
1. Kringos y Scarpas A.. Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures. *International Journal of Solids and Structures*. 45 (9). p 2671-2685, 2008.
2. Solaimanian, M., J. Harvey, M. Tahmoressi and V. Tandon. Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
3. Solaimanian, M., R.F. Bonaquist and V. Tandon. Improved Conditioning and Testing Procedures for HMA Moisture Susceptibility. NCHRP Report 589, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
4. Brown, E.R., P. Kandhal and J. Zhang. Performance Testing for Hot Mix Asphalt. NCAT Report No. 01-05. National Center for Asphalt Technology, Auburn. Alabama, 2001.
5. ASTM D 3625. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. American Society for Testing and Materials, 2012.
6. AASHTO T 182. Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
7. Curtis, C.W., K. Ensley, and J. Epps. Fundamental Properties of Asphalt –Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption. Final Report SHRP-A-341, National Research Council, Washington D.C., 1991.



9. AASHTO T 165. Standard Method of Test for Effect of Water on Cohesion of Compacted Bituminous Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2006.
10. Lottman, R.P. Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. NCHRP Report 192, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1978.
11. AASHTO T 283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
12. AASHTO T 324. Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
13. Aschenbrener, T. Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot Mix Asphalt. In Transportation Research Record 1492, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1995, pp. 193–201.
14. Kennedy, Thomas W., Freddy L. Roberts, and Kang W. Lee. Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures. In Transportation Research Record 911, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1983, pp. 134-143.
15. Lu, Q. and J.T. Harvey. Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods. Research Report No. UCPRC-RR-2005-15, University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley, 2005.
16. Hunter, E.R. and K. Ksaibati. Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. University of Wyoming, Laramie, Wyoming, 2002.
17. Little, D.N., J.A. Epps and P.E. Sebaaly . The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, 2006.
18. Al-Qadi, I., I.M. Abuawad, H. Dhasmana, A.R. Coenen and J.S. Trepanier. Effects of Various Asphalt Binder Additives/Modifiers on Moisture Susceptible Asphaltic Mixtures. Research Report FHWA-ICT-14-004, Illinois Center for Transportation, Urbana, IL, 2014.
19. Tarefder, R.A. and A.M. Zaman. Nanoscale Evaluation of Moisture Damage in Polymer Modified Asphalts. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 22 No.7, 2009, pp. 714-725.



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**



**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

20. B. M. Kiggundu, F. L. Roberts. Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods. NCAT Report No. 88-02. National Center for Asphalt Technology, Auburn. Alabama, 1988.

Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple Performance Tests

Adriana Vargas-Nordcbeck, Fabricio Leiva-Villacorta,
José Pablo Aguiar-Moya, and Luis Loria-Salazar

Moisture damage is a major cause of premature failure in asphalt concrete mixtures. Proper evaluation of moisture susceptibility is essential for preventing the deterioration of field mixtures. The AASHTO T 283 test method, also known as the modified Lottman indirect tension test procedure, was adopted by the Superpave[®] system as the required test for determining moisture damage and is currently the most widely used procedure for measuring moisture damage potential. However, this test method has two limitations: (a) its conditioning procedure does not include dynamic loading, which is different from actual field conditions, and (b) it uses strength, a parameter that is not directly used in pavement design, to determine whether unacceptable moisture damage will occur in the field. The objective of this study is to evaluate the moisture susceptibility of different asphalt mixtures with simple performance tests in conjunction with environmental conditioning procedures. AASHTO T 283 was conducted for conditioning levels of 0, 1, 3, and 6 freeze–thaw cycles and compared with results obtained from the dynamic modulus (E^*) and flow number tests for the same conditioning levels. Results show that modification of AASHTO T 283 or the use of simple performance tests is a valid alternative for evaluating moisture susceptibility and may represent expected field performance better than the modified Lottman indirect tension test can. The advantages and disadvantages of each method need to be carefully considered before a new testing protocol is implemented.

Moisture damage is a major cause of premature failure in asphalt concrete mixtures. This type of damage can be described as the progressive deterioration of asphalt mixes as a result of adhesive failure (stripping of the asphalt film from the aggregate surface), of cohesive failure (loss of mixture stiffness primarily as the result of the action of water), or of both (1–3).

The proper evaluation of moisture susceptibility is essential for preventing the deterioration of field mixtures. The AASHTO T 283 test method, also known as the modified Lottman indirect tension test procedure, was adopted by the Superpave[®] system as the required test for determining moisture damage and is currently the most widely used procedure for evaluating moisture damage potential (4). However, this test method has two limitations: (a) its conditioning

procedure does not include dynamic loading, which is different from actual field conditions, and (b) it uses strength, a parameter that is not directly used in pavement design, to determine whether unacceptable moisture damage will occur in the field (3).

In addition, although several “fixes” have been applied to deal with the method’s shortcomings, the test remains empirical and liable to give either false positives or false negatives in the prediction of moisture susceptibility. Major concerns with this test are its reproducibility and its ability to predict moisture susceptibility with reasonable confidence (4). The use of simple performance tests to evaluate the moisture susceptibility of asphalt mixtures has shown promising results (5–7). These tests appear to correlate better with observed field performance and could provide an improvement in moisture damage assessment.

OBJECTIVES AND SCOPE OF WORK

The objective of this study is to evaluate the moisture susceptibility of different asphalt mixtures with simple performance tests in conjunction with environmental conditioning procedures. This objective was accomplished by performing the modified Lottman indirect tension test procedure (AASHTO T 283) with different conditioning levels and comparing the results with those obtained with the dynamic modulus and flow number tests for the same conditioning levels.

METHOD

Mixture Designs

Ten different mixtures were designed and produced in the laboratory with an aggregate source known for showing moisture related deterioration in the field. Five of the mixtures had a nominal maximum aggregate size (NMAS) of 9.5 mm, and five had an NMAS of 12.5 mm. Each of the selected NMASs included a control mix, as well as the following variations: 2% styrene–butadiene–styrene (SBS) polymer-modified mix by total weight of binder, mixtures that contained 0.5% liquid antistripping (LAS) by total weight of binder and 1% hydrated lime by total weight of aggregate, and a mixture that combined 2% SBS and 1% lime. All of the mixtures used the same PG 70-22 binder source. Table 1 shows the gradations for the two aggregate sizes and Table 2 shows the volumetric properties of all mixtures used in this study, including optimum design

National Laboratory of Materials and Structural Models, University of Costa Rica, Ciudad de la Investigación, Finca 2, San José 11501, Costa Rica. Corresponding author: A. Vargas-Nordcbeck, adriana.vargasnordcbeck@ucr.ac.cr.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2575, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016, pp. 70–78. DOI: 10.3141/2575-08

TABLE 1 Mixture Gradations

Sieve Size	Percent Passing	
	9.5 NMAS	12.5 NMAS
¾ in.	100	100
½ in.	100	95.4
¾ in.	95.0	78.3
No. 4	60.0	43.3
No. 8	40.0	28.9
No. 16	25.0	20.0
No. 30	17.0	14.8
No. 50	10.0	10.9
No. 100	7.0	8.0
No. 200	5.0	5.8

TABLE 2 Mixture Volumetric Properties

Mixture	Design AC (%)	VMA (%)	VFA (%)	Dust Ratio
9.5 control	6.5	15.5	73.7	1.0
9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
9.5 LAS	6.5	15.9	72.7	1.0
9.5 lime	6.7	16.3	74.4	0.9
9.5 SBS + lime	6.6	16.0	74.4	1.0
12.5 control	7.0	15.8	74.5	1.1
12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
12.5 LAS	6.5	14.7	72.7	1.2
12.5 lime	6.0	14.0	71.5	1.3
12.5 SBS + lime	6.3	14.3	72.0	1.3

asphalt content (AC), voids in the mineral aggregate (VMA), voids filled with asphalt (VFA), and dust-to-binder ratio.

Laboratory Testing

For each of the mixtures, the modified Lottman indirect tension test was conducted for conditioning levels of 0, 1, 3, and 6 freeze-thaw cycles. The results were used to calculate the tensile strength ratio (TSR) at each level, which is used as an acceptance criterion for moisture damage performance. A minimum TSR of 0.80 was defined as the required value for acceptance of a mixture according to local standard specifications (8).

In addition, dynamic modulus (E^*) and flow number tests were performed in accordance with AASHTO TP 79 for the same conditioning levels. For the dynamic modulus, an E^* ratio (ER) was calculated as the ratio of conditioned to dry specimens for the measurements made at 20°C and 10 Hz (typical pavement operating conditions) and used as the parameter to evaluate the moisture sensitivity of the mixtures. For the flow number test, a flow number ratio (FNR) was calculated in the same manner for all conditioning levels.

For all tests, one cycle of conditioning consisted of keeping vacuum-saturated specimens in a freezer at -18°C for 16 h, followed by a 60°C water bath for 24 h. The use of multiple conditioning cycles allowed for an increased deterioration of the mixture, simulating more aggressive field conditions.

RESULTS AND DISCUSSION

Modified Lottman Indirect Tension Test: AASHTO T 283

Figure 1 shows the TSR of all mixtures for each of the conditioning levels. It can be observed that if the test is performed for the standard

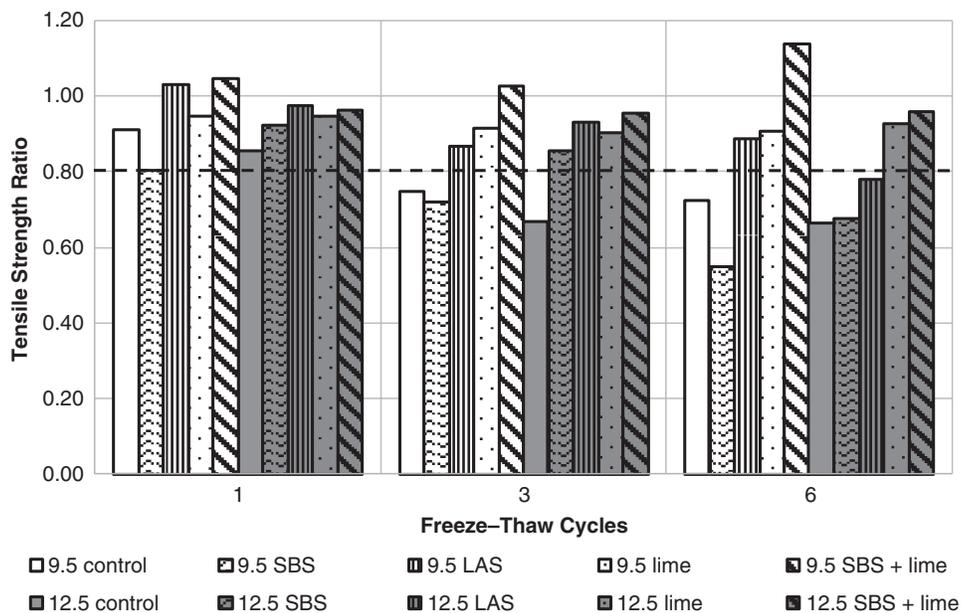


FIGURE 1 TSR results at all conditioning levels.

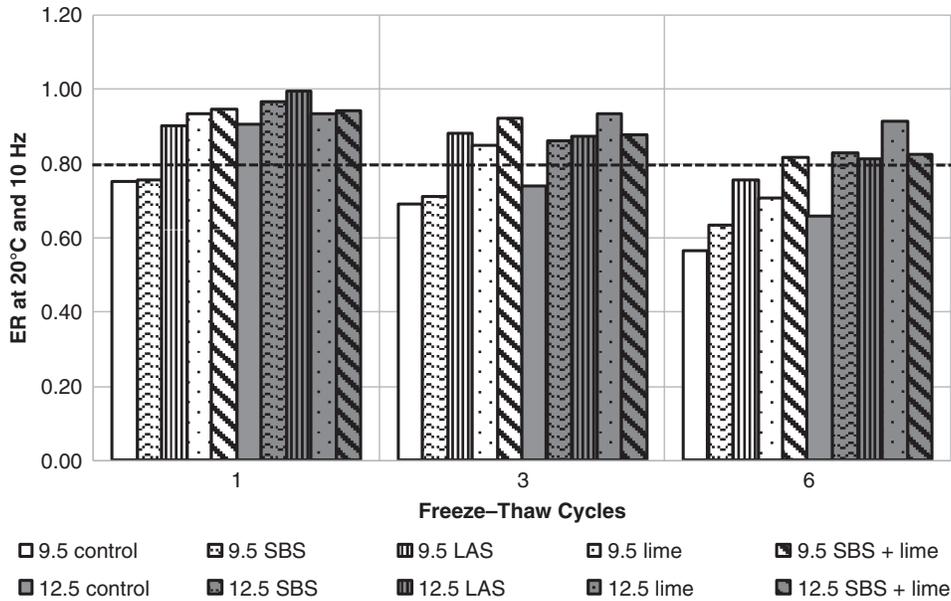


FIGURE 2 ER results at all conditioning levels.

procedure with one cycle of conditioning, all mixtures pass the minimum criteria, even though this particular aggregate source is known for exhibiting moisture related damage in the field. As the number of freeze-thaw cycles is increased, only mixtures that contain some type of antistripping agent (LAS or hydrated lime) are considered satisfactory.

Dynamic Modulus

Figure 2 shows the ER results for all conditioning levels. In this case, it can be seen that if the same minimum criterion of 0.80 is used, some of the mixtures fail even with a single conditioning cycle. As with the TSRs, when the number of conditioning cycles is increased, mixtures are more likely to require an antistripping aid to resist moisture induced damage.

The ER shown in Figure 2 was calculated at 20°C and 10 Hz as these conditions represent typical pavement operating conditions. However, testing was conducted over a wide range of temperatures and frequencies, as required by AASHTO TP 79. Figures 3 and 4 present all dynamic modulus measurements made for 9.5 and 12.5 NMAS mixtures, respectively. It is evident that mixtures that do not contain any kind of antistripping agents exhibit a more significant reduction in dynamic modulus for conditioned specimens, compared with dry specimens.

In general, most of the modulus reduction (i.e., mixture deterioration as a result of moisture) occurs after the first conditioning cycle. The E^* values for conditioned specimens tend to stabilize after six conditioning cycles, a finding that suggests this is an appropriate number of cycles to be used as part of the testing protocol.

Figure 5 illustrates the average ER of the mixtures (including all temperatures and frequencies). It can be observed that some of the

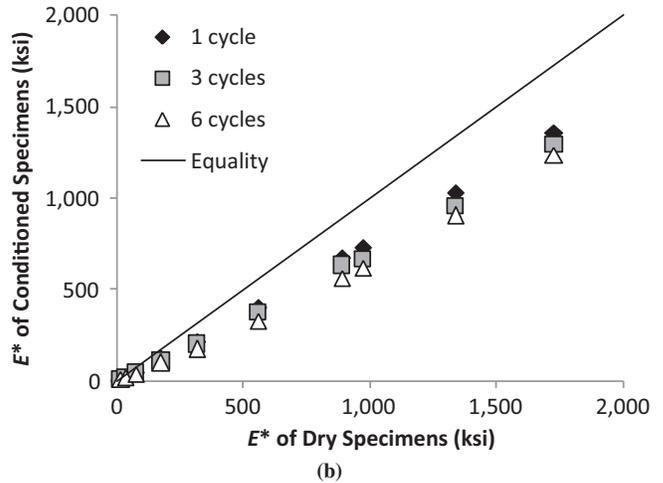
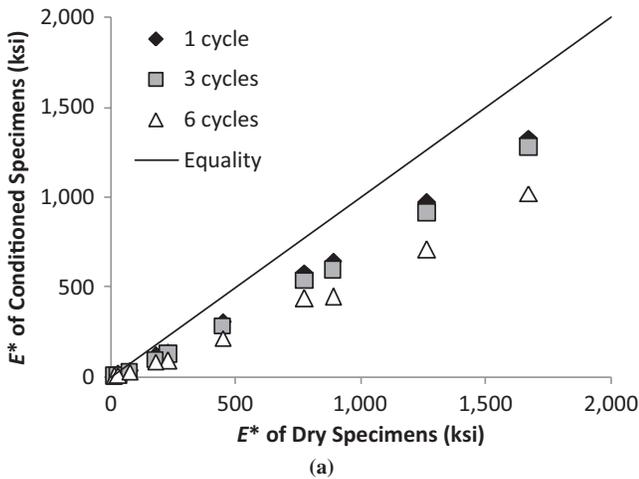


FIGURE 3 Measured dynamic modulus at all testing conditions for 9.5-mm NMAS mixtures: (a) control and (b) SBS (ksi = kips per square inch).

(continued)

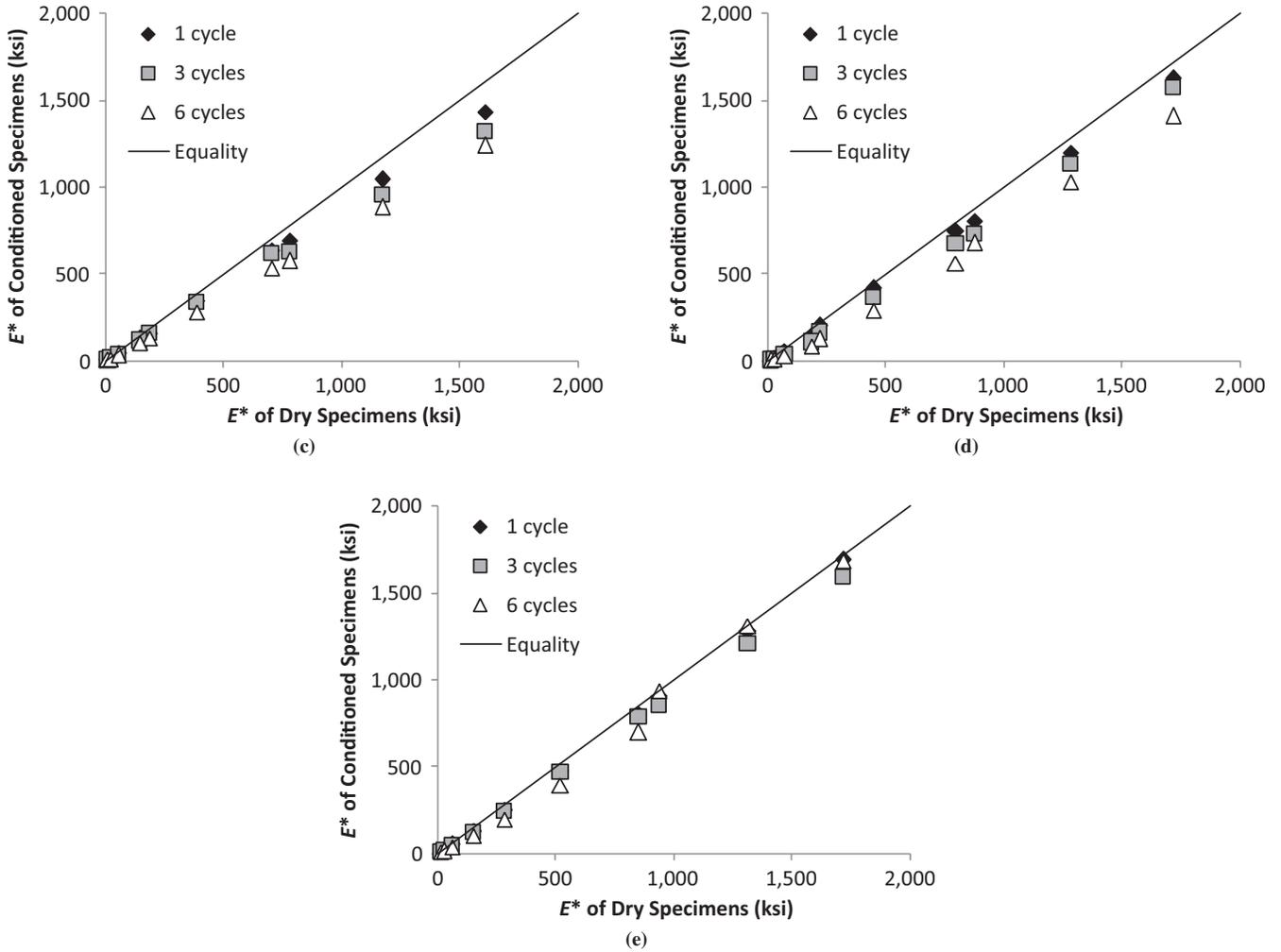


FIGURE 3 (continued) Measured dynamic modulus at all testing conditions for 9.5-mm NMAS mixtures: (c) LAS, (d) hydrated lime, and (e) SBS + hydrated lime.

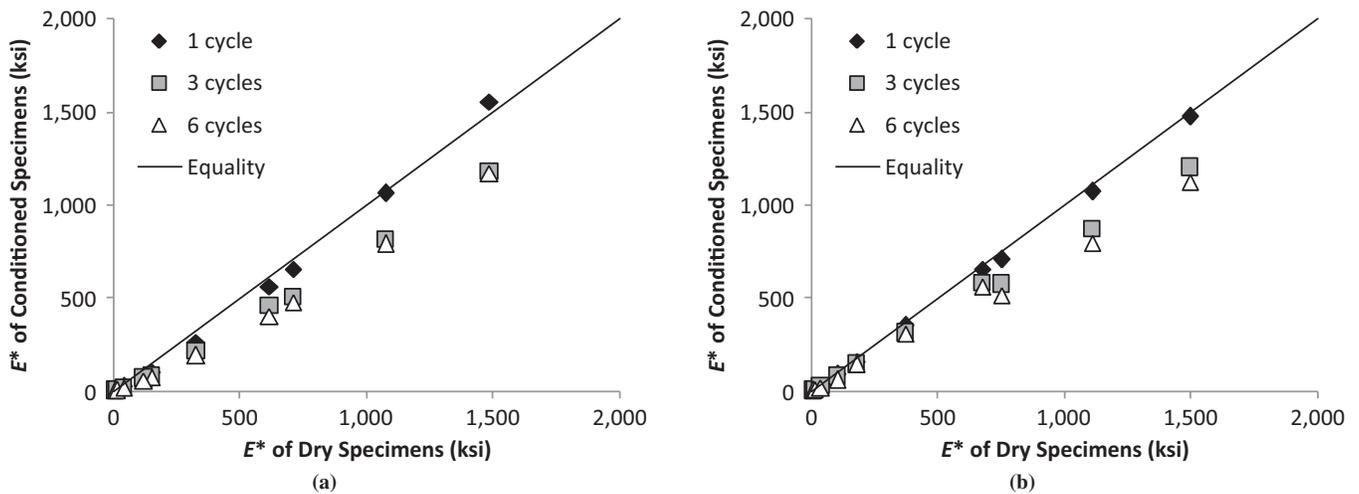


FIGURE 4 Measured dynamic modulus at all testing conditions for 12.5-mm NMAS mixtures: (a) control and (b) SBS.

(continued on next page)

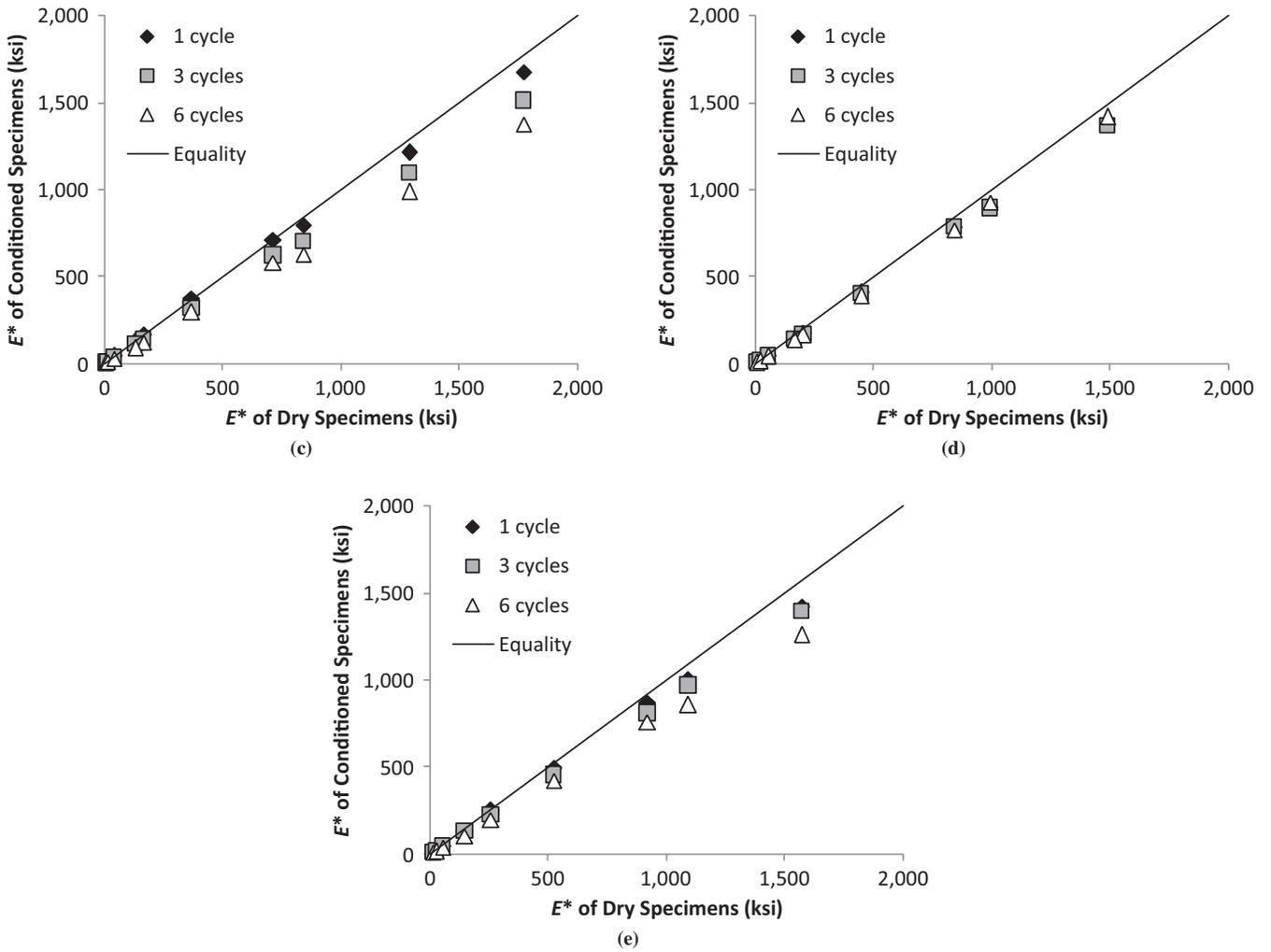


FIGURE 4 (continued) Measured dynamic modulus at all testing conditions for 12.5-mm NMAS mixtures: (c) LAS, (d) hydrated lime, and (e) SBS + hydrated lime.

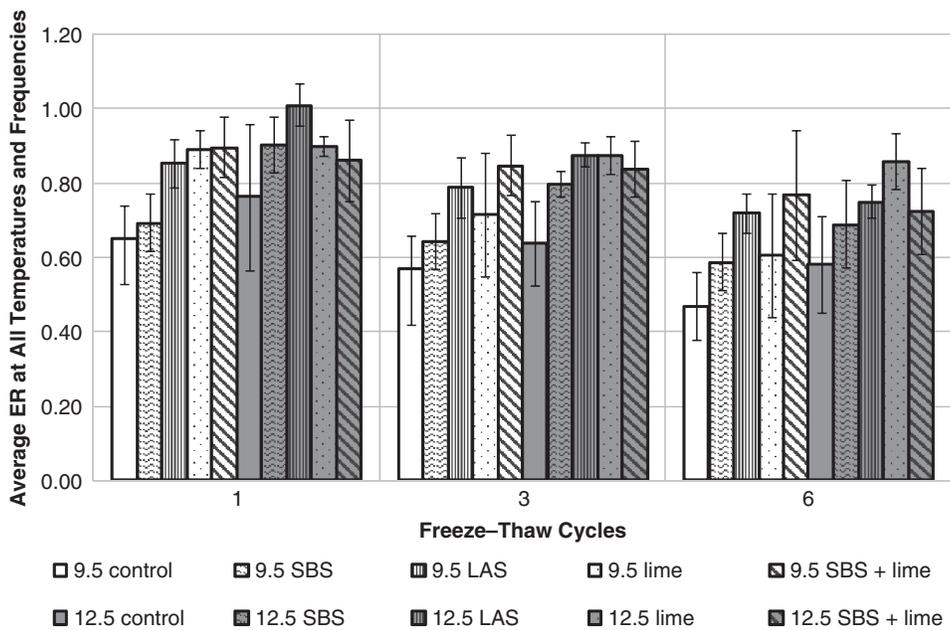


FIGURE 5 Average ER of mixtures at all conditioning levels.

TABLE 3 Dynamic Modulus Reduction as Function of Conditioning Levels

Mixture	Dynamic Modulus Compared with Dry Specimens (%)		
	1 Cycle	3 Cycles	6 Cycles
9.5 control	44.5–79.8	35.9–76.6	35.4–61.1
9.5 SBS	56.2–78.9	52.1–74.8	48.3–71.6
9.5 LAS	70.8–90.5	62.7–88.2	62.7–77.4
9.5 lime	82.1–94.7	49.4–91.6	39.4–82.1
9.5 SBS + lime	73.4–98.7	72.6–92.9	54.3–100
12.5 control	51.8–1.05	49.6–79.8	41.3–78.8
12.5 SBS	76.6–98.7	76.0–86.4	53.5–83.3
12.5 LAS	94.3–1.11	84.0–94.7	68.6–81.5
12.5 lime	85.2–93.5	79.7–93.5	75.9–95.4
12.5 SBS + lime	62.1–96.0	67.6–89.3	49.5–82.8

mixtures exhibit more variability as a result of increased moisture susceptibility at certain combinations of testing temperature and frequency. Table 3 shows the ER values for the entire range of evaluated temperatures and frequencies. Depending on the mixture, the reduction in modulus varies drastically for certain testing conditions. In general, this reduction is greater for measurements made at high temperatures and low frequencies, while conditioning produces less deterioration at low temperatures and high frequencies.

An analysis of variance was performed to determine the effect of three factors on the average ER of the mixtures: nominal maximum aggregate size (9.5 or 12.5 mm), use of antistripping agents (“treated” for mixtures containing LAS or hydrated lime; “untreated” otherwise) and number of conditioning cycles (1, 3, or 6). Table 4 shows the results of the analysis.

Results indicated that for a significance level of .05, all three factors have a significant effect on the ER. As shown in Figure 6, in general 12.5-mm mixtures exhibited better resistance to moisture damage than 9.5-mm mixes. As expected, the use of antistripping agents increased the average ER of the mixtures, making them more resistant to moisture-induced damage. Finally, the applica-

tion of multiple conditioning cycles accelerated the deterioration of the mixture and may be necessary to better simulate field conditions.

In addition, the interaction between the nominal maximum aggregate size and the use of antistripping agent was significant at the .05 significance level. Figure 7 shows how the addition of liquid antistripping agent or hydrated lime increased the average ER of the mixtures, but this improvement was more pronounced for 9.5-mm mixtures. None of the other interactions were found to be statistically significant.

Flow Number

When the FNR is used as the parameter to evaluate moisture susceptibility, mixtures are being subjected to the combined effect of permanent deformation and moisture damage. As observed in Figure 8, only mixtures containing antistripping agents pass the minimum criteria of 0.80, even with one conditioning cycle. The downside of the flow number test is its high variability; however, the results obtained in this study follow the expected trend: untreated mixtures fail to meet the required criteria at any of the conditioning levels.

SUMMARY

Table 5 presents a summary of the different parameters used in this study to evaluate moisture susceptibility. Figure 9 shows the average TSR, ER (at 20°C and 10 Hz), and FNR of all mixtures at each of the conditioning levels. These results indicate that the standard AASHTO T 283 procedure yields high TSR values, making it easy for the mixtures to meet the required criteria, even when field experience has shown a potential for moisture-related damage. Increasing the number of conditioning cycles from one to six may offer a better simulation of field performance. However, this modification can be time consuming.

Using the dynamic modulus test to evaluate moisture susceptibility is a less empirical approach since E^* is a main input in the mechanistic-empirical design method for flexible pavements and is an indicator of mixture performance at different ranges

TABLE 4 Analysis of Variance for ER

Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	F-Statistic	p-Value	Contribution (%)	Significant?
NMAS	1	0.679	52.89	.000	9.0	Yes
AS agent	1	1.752	136.40	.000	23.2	Yes
Cycles	2	1.338	52.08	.000	17.7	Yes
NMAS * AS agent	1	0.062	4.82	.029	0.8	Yes
NMAS * cycles	2	0.001	0.05	.955	0.01	No
AS agent * cycles	2	0.002	0.06	.941	0.03	No
NMAS * AS agent * cycles	2	0.031	1.21	.299	0.4	No
Error	288	3.699				
Total	299	7.564				

NOTE: AS = antistripping.

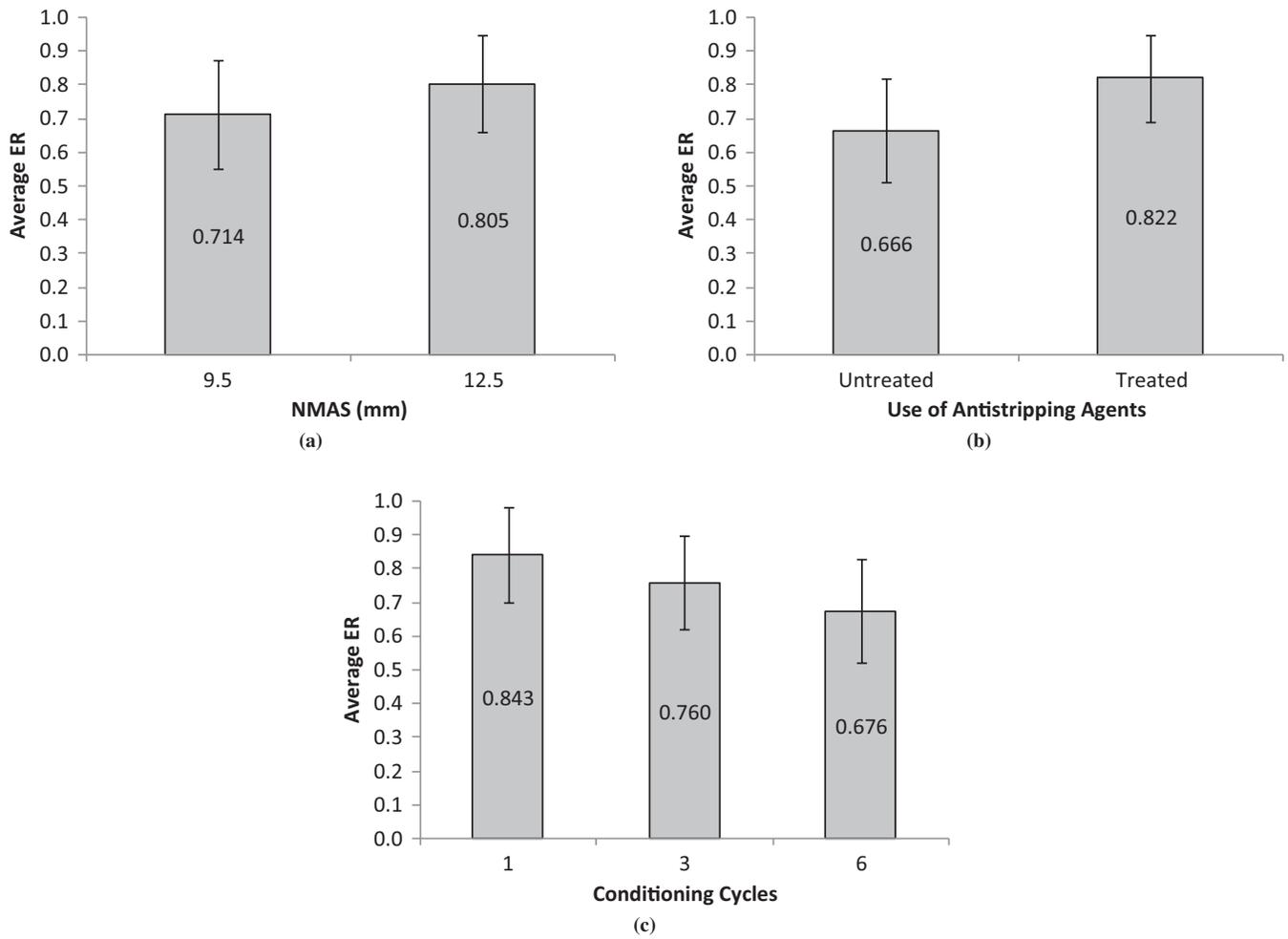


FIGURE 6 Effect of main factors on average ER.

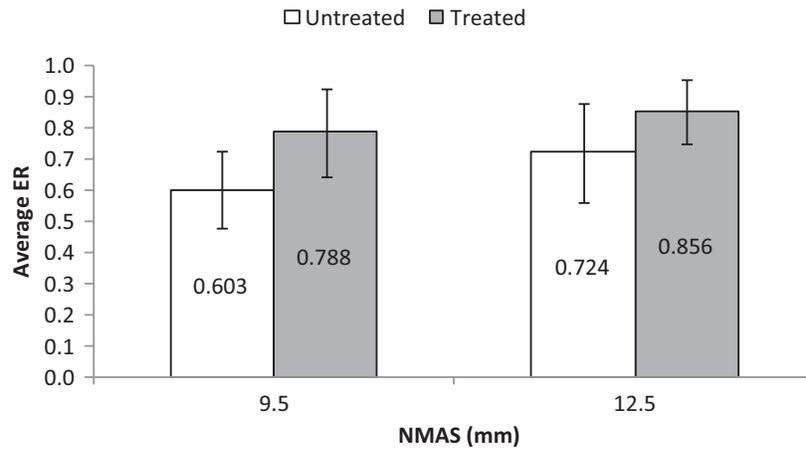


FIGURE 7 Combined effect of NMAS and use of antistripping agents.

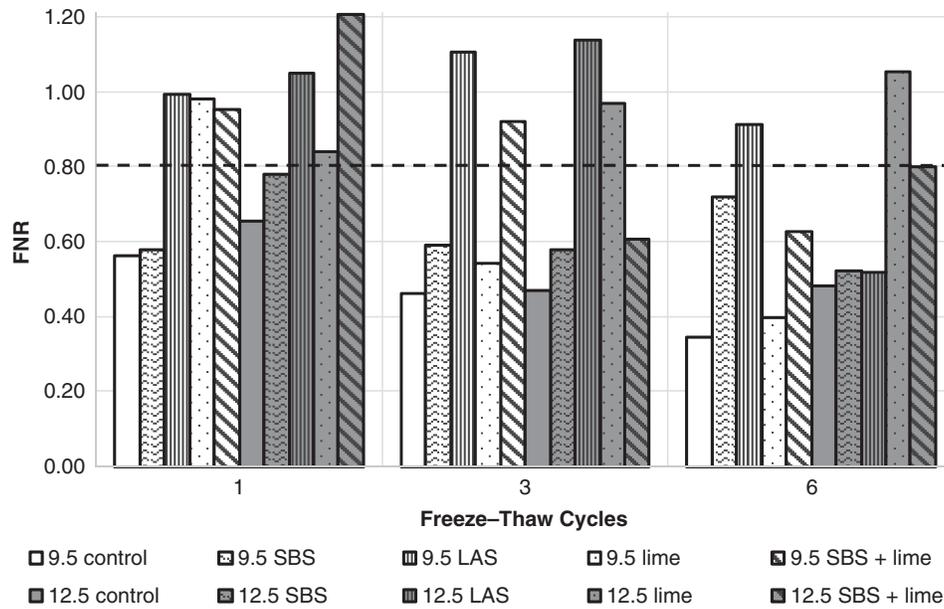


FIGURE 8 FNR results at all conditioning levels.

of temperature and speed. The ER is a more severe parameter than the TSR but is highly dependent on testing conditions. This study focused on ERs calculated at 20°C and 10 Hz, but as discussed earlier, higher reductions in dynamic modulus can be expected for high temperatures and low frequencies.

Finally, as observed in Table 5 and Figure 9, the average FNR results had the lowest values of all parameters studied. Mixtures with expected poor field performance were easier to screen out, without the need to apply multiple conditioning levels. The higher standard deviations observed in Figure 9 for the FNR are caused by the differences in the values of untreated and treated mixtures, which were not as easily identified with the modified Lottman indirect tension and dynamic modulus tests.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The objective of this study was to evaluate the moisture susceptibility of different asphalt mixtures with simple performance tests for various levels of environmental conditioning. Based on the data presented above, the following conclusions are made:

- The current test adopted by the Superpave design method to assess moisture susceptibility (known as the modified Lottman indirect tension test) remains empirical and may not identify mixtures that are likely to exhibit poor performance in the field. An increased number of conditioning cycles may be required to accurately simulate observed field performance.

TABLE 5 Ratio of Conditioned to Dry Specimens for All Tests Performed

Mixture	TSR			ER			FNR		
	1 Cycle	3 Cycles	6 Cycles	1 Cycle	3 Cycles	6 Cycles	1 Cycle	3 Cycles	6 Cycles
9.5 control	0.91	0.75	0.73	0.75	0.69	0.56	0.56	0.46	0.35
9.5 SBS	0.81	0.72	0.55	0.76	0.71	0.64	0.58	0.59	0.72
9.5 LAS	1.03	0.87	0.89	0.90	0.88	0.76	0.99	1.10	0.91
9.5 lime	0.95	0.92	0.91	0.94	0.85	0.71	0.98	0.54	0.40
9.5 SBS + lime	1.05	1.03	1.14	0.95	0.92	0.82	0.95	0.92	0.63
12.5 control	0.86	0.67	0.67	0.91	0.74	0.66	0.65	0.47	0.48
12.5 SBS	0.92	0.86	0.68	0.97	0.86	0.83	0.78	0.58	0.52
12.5 LAS	0.98	0.93	0.78	1.00	0.88	0.81	1.05	1.14	0.52
12.5 lime	0.95	0.91	0.93	0.94	0.94	0.92	0.84	0.97	1.05
12.5 SBS + lime	0.96	0.96	0.96	0.94	0.88	0.83	1.20	0.60	0.80
Mean	0.94	0.86	0.82	0.91	0.84	0.75	0.86	0.74	0.64
Standard deviation	0.07	0.11	0.17	0.08	0.09	0.11	0.21	0.26	0.23

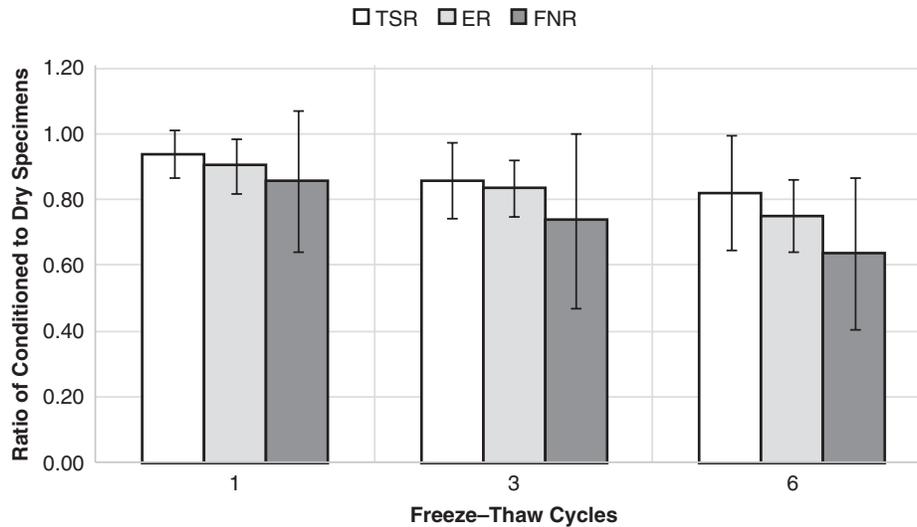


FIGURE 9 Average ratio of conditioned to dry specimens.

- The use of simple performance tests offers an alternative for the evaluation of moisture damage in asphalt concrete mixtures. Similar to AASHTO T 283, test parameters can be calculated by comparing the results of conditioned specimens with those of dry specimens.

- The dynamic modulus test could be a preferred option compared with indirect tension because E^* is a main input in the mechanistic-empirical design method for flexible pavements and is an indicator of mixture performance at different ranges of temperature and speed. However, the reduction in dynamic modulus caused by sample conditioning is highly dependent on testing conditions, and lower ER values can be expected for high temperatures and low frequencies.

- For the entire range of testing temperatures and frequencies performed according to AASHTO TP 79, the ER was affected by three factors: nominal maximum aggregate size, use of antistripping agents, and number of conditioning cycles. The interaction between the nominal maximum aggregate size and the use of antistripping agent was also significant, as the addition of liquid antistrip agent or hydrated lime increased the average ER of the mixtures, but this improvement was more pronounced for 9.5-mm mixtures.

- The flow number test, typically used to evaluate permanent deformation, also provided moisture susceptibility results that better reflected the expected trend without the need to apply multiple conditioning levels. However, caution must be taken as this test has a higher variability. It is recommended that testing be performed on a broader variety of mixtures (including different aggregate and asphalt binder sources) to validate the results and evaluate the effect of other variables on the performance of the asphalt mixtures. Such efforts are currently under way as part of a new research project.

REFERENCES

1. Hicks, R.G. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
2. Hicks, R.G., L. Santucci, and T. Aschenbrener. *Introduction and Seminar Objectives. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements—A National Seminar*, 2003.
3. Lu, Q., and J.T. Harvey. *Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods*. Research Report No. UCPRC-RR-2005-15. University of California Pavement Research Center, University of California, Davis and Berkeley, 2005.
4. Solaimanian, M., J. Harvey, M. Tahmoressi, and V. Tandon. *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements—A National Seminar, 2003.
5. Solaimanian, M., R.F. Bonaquist, and V. Tandon. *NCHRP Report 589: Improved Conditioning and Testing Procedures for HMA Moisture Susceptibility*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
6. Solaimanian, M., D. Fedor, R. Bonaquist, A. Soltani, and V. Tandon. Simple Performance Test for Moisture Damage Prediction in Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, 2006, pp. 345–380.
7. Nadkarni, A.A., K.E. Kaloush, W.A. Zeiada, and K.P. Biligiri. Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2127*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, pp. 29–35.
8. CR-2010. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes*. Ministerio de Obras Publicas y Transportes, San Jose, Costa Rica, 2010.

The Standing Committee on Characteristics of Asphalt-Aggregate Combinations to Meet Surface Requirements peer-reviewed this paper.

EVALUACIÓN DE DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE ANÁLISIS DE COMPONENTES

Adriana Vargas-Nordcbeck¹, José Sanabria-Ulloa², Fabricio Leiva-Villacorta³, José Pablo Aguiar-Moya⁴,
Fabiola Miranda-Argüello⁵, Luis Guillermo Loría-Salazar⁶

¹NCAT, Universidad de Auburn, Alabama, vargaad@auburn.edu

²LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, jose.sanabria@ucr.ac.cr

³NCAT, Universidad de Auburn, Alabama, leivafa@auburn.edu

⁴LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁵LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, fabiola.miranda@ucr.ac.cr

⁶LANAMME, Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

La susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas suele evaluarse mediante la comparación de resistencias entre especímenes secos y acondicionados, para las cuales se definen parámetros de aceptación. No obstante, existen criterios de desempeño más confiables que a su vez permiten predecir el comportamiento de la mezcla ante otros tipos de deterioros. El estudio se enfoca en la evaluación de este fenómeno mediante un análisis de componentes principales y conglomerados. Para esto, se diseñaron 12 mezclas con una misma fuente de agregados considerando tamaños máximos de 9.5 y 12.5 mm, utilizando asfalto original PG 70-22 y modificaciones con SBS, agentes antidesnudantes (antidesnudante líquido y cal hidratada) y sus combinaciones. Los resultados incluyen las razones entre especímenes secos y acondicionados de ensayos de Resistencia Retenida a la Tensión Diametral, Módulo Dinámico y Flow Number. Las evaluaciones muestran que los componentes principales pueden utilizarse para estimar un rendimiento de las mezclas basado en las variables analizadas y a su vez justificar la variación en los resultados. Por su parte, el análisis de conglomerados permitió identificar características que afectan el desempeño de las mezclas, evidenciando el mejor rendimiento global para la combinación de mezclas con SBS y un aditivo mejorador de adherencia.

Palabras Clave: daño por humedad, componentes principales, conglomerados.

1 Introducción

El daño por humedad es un problema generalizado en pavimentos asfáltico que conlleva a la ocurrencia de fallas prematuras. Este tipo de daño puede ocurrir debido a una pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y el agregado, o a la difusión de humedad a través del mástic asfáltico, debilitando la estructura de la mezcla y haciéndola más susceptible a cargas cíclicas [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Agencias estatales de carreteras y expertos en asfaltos han dedicado numerosos esfuerzos durante décadas para desarrollar un método experimental en laboratorio capaz de predecir el desempeño de los pavimentos asfálticos ante el fenómeno de daño por humedad [7]. Actualmente existen muchos procedimientos que pueden ser utilizados para evaluar de manera cualitativa o cuantitativa la susceptibilidad al daño por humedad tanto en los materiales primarios (asfalto y agregados) como en la mezcla asfáltica. Sin embargo, tales métodos arrojan resultados con baja o nula correlación con los resultados de las evaluaciones en campo [8].

La metodología Superpave adoptó el método de ensayo AASHTO T283 [9], más conocido como el ensayo de Lottman Modificado, como requerimiento para la determinación de la susceptibilidad al daño por humedad, el cual a su vez corresponde al procedimiento de ensayo más utilizado para cuantificar este deterioro en mezclas asfálticas [7, 8]. No obstante, se trata de un procedimiento empírico desarrollado para condiciones que difieren significativamente a las condiciones de campo pues el protocolo de carga se basa en la aplicación de un esfuerzo estático, el cual es un parámetro que no es posible asociarlo directamente con el diseño del pavimentos para determinar si su desempeño en campo será aceptable. Por tanto, este criterio genera falsos positivos o negativos en la predicción del daño por humedad [7].

Los ensayos de desempeño han demostrado ser una alternativa eficiente para la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas [10, 11, 12, 13]. Al igual que para el ensayo AASHTO T283, la evaluación de la resistencia al daño por humedad se basa en la comparación de los resultados de los ensayos de Resistencia a la Tensión Diametral (RTD), Módulo Dinámico (E^*) y Flow Number (FN) en especímenes acondicionados respecto a especímenes secos. Adicionalmente, la realización de múltiples ciclos de acondicionamiento permite obtener resultados que simulan de forma más precisa el desempeño en campo de los pavimentos asfálticos [13].

La realización de ensayos de desempeño como metodología de evaluación de daño por humedad permite a su vez estudiar el comportamiento del material mediante el análisis de parámetros de resistencia a la tensión, módulo dinámico y flow number. Para ello es posible recurrir a métodos estadísticos de análisis multivariante, tales como análisis de componentes principales y análisis de conglomerados (*clusters*), los cuales corresponden a herramientas prácticas de evaluación de desempeño de mezclas utilizando bases de datos robustas.

2 Objetivos

El objetivo del estudio consiste en desarrollar una evaluación exhaustiva de la susceptibilidad al daño por humedad de diferentes mezclas asfálticas mediante un análisis de componentes principales y conglomerados. Para ello se utilizará una base de datos que comprende resultados de ensayos de Resistencia a la Tensión Diametral, Módulo Dinámico y Flow Number para especímenes acondicionados y sin condicionamiento.

3 Metodología

3.1 Diseño de mezcla

El proyecto abarca el diseño de 12 mezclas asfálticas a partir de una fuente de agregados para dos tamaños máximos nominal (TMN) de 9.5 y 12.5 mm y un asfalto base PG 70-22. Los tratamientos para cada tamaño comprenden una mezcla control, mezcla con asfalto modificado

con 2% de SBS, mezcla con asfalto modificado con 0.5% de antidesnudente líquido (ADL), mezcla con asfalto modificado mediante la combinación de 2% de SBS y 0.5% de ADL, mezcla con 1% de cal y mezcla modificada con la combinación de 2% de SBS y 1% de cal. Los porcentajes de SBS y ADL se dosifican sobre el peso total del ligante. La Tabla 1 presenta las configuraciones granulométricas de los agregados para los dos tamaños máximos utilizados y la Tabla 2 muestra los resultados de las propiedades volumétricas de las mezclas en estudio.

Tabla 1. Configuraciones granulométricas de los agregados

Tamiz	Tamaño de partícula (mm)	% Pasando TMN 9.5 mm	% Pasando TMN 9.5 mm
3/4"	19.0	100.0	100.0
1/2"	12.5	100.0	95.4
3/8"	9.5	95.0	78.3
Nº 4	4.75	60.0	43.3
Nº 8	2.38	40.0	28.9
Nº 16	1.18	25.0	20.0
Nº 30	0.6	17.0	14.8
Nº 50	0.3	10.0	10.9
Nº 100	0.15	7.0	8.0
Nº 200	0.075	5.0	5.8

Tabla 2. Propiedades volumétricas de las mezclas

Mezcla	% Asfalto PTM	% VMA	%VFA	Polvo/Asfalto
9.5 Control	6.5	15.5	73.7	1.0
9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
9.5 ADL	6.5	15.9	72.7	1.0
9.5 SBS + ADL	6.3	15.4	72.9	1.0
9.5 Cal	6.7	16.3	74.4	0.9
9.5 SBS + Cal	6.6	16.0	74.4	1.0
12.5 Control	7.0	15.8	74.5	1.1
12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
12.5 ADL	6.5	14.7	72.7	1.2
12.5 SBS + ADL	5.9	13.1	69.9	1.5
12.5 Cal	6.0	14.0	71.5	1.3
12.5 SBS + Cal	6.3	14.3	72.0	1.3

3.2 Procedimientos de laboratorio

Para cada una de las mezclas diseñadas se realizó el ensayo de RTD, E* y FN tanto en especímenes secos (sin condicionamiento) y en especímenes acondicionados a 6 ciclos de hielo y deshielo (*freeze/thaw*) simulando condiciones agresivas en campo. Un ciclo de hielo y deshielo consiste en someter a un espécimen saturado en un rango de 70 a 80 % a un período de congelamiento de al menos 16 horas a -18 °C seguido por un período de 24 horas de sumersión en un baño de agua a 60 °C.

Los ensayos de E* y FN fueron realizados de acuerdo a la norma AASHTO TP 79 [14]. El análisis desarrollado considera las mediciones de E* a una temperatura de 20 °C y a una frecuencia de 10 Hz, asociado a condiciones típicas de operación del tránsito.

4 Análisis de resultados

4.1 Resistencia a la Tensión

La Figura 1 muestra los valores promedio de resistencia a la tensión obtenidos para todas las mezclas de análisis. En general las mezclas con contenidos de SBS desarrollan mayor resistencia a la tensión. Adicionalmente, se evidencia la necesidad de la incorporación de ADL o cal (agentes antidesnudantes) para evitar caídas abruptas de resistencia posterior a los 6 ciclos de acondicionamiento.

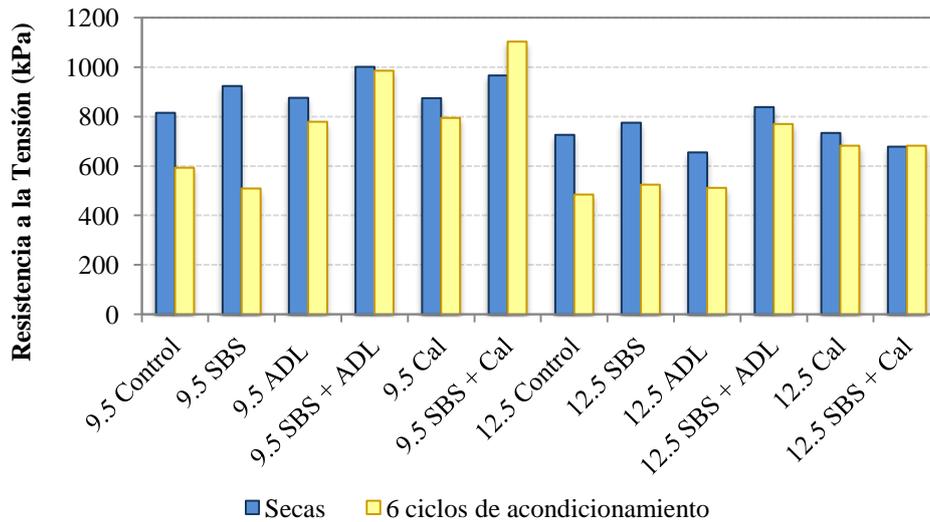


Figura 1 Resistencia a la Tensión Promedio

4.2 Módulo Dinámico

La Figura 2 muestra los módulos promedio de todas las muestras analizadas. Se observa una tendencia similar a la mostrada en la Figura 1. Sin embargo, en este caso las diferencias entre los módulos de especímenes secos y acondicionadores son menores, especialmente en mezclas que no incorporan agentes antidesnudantes.

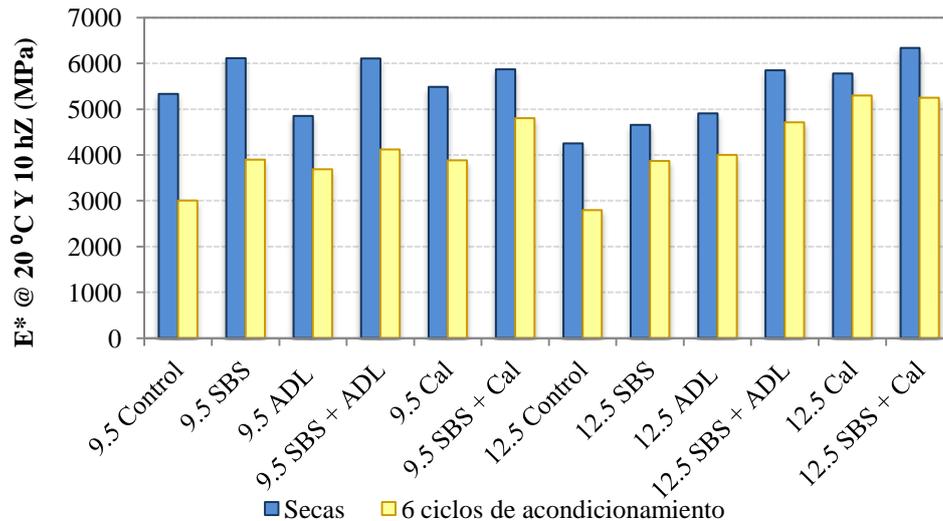


Figura 2 Módulo Dinámico Promedio a 20 °C y 1 Hz

4.3 Flow Number

La Figura 3 presenta los resultados promedio de FN. Se identifica que las mezclas modificadas con SBS tienden a presentar una mayor resistencia a la deformación. No obstante, se requiere de la inclusión de agentes antidesnudantes para mantener un desempeño similar a los tratamientos sin acondicionamiento. Por otra parte, se identifica una mayor variabilidad de los resultados obtenidos de FN respecto a los ensayos de RTD y E*.

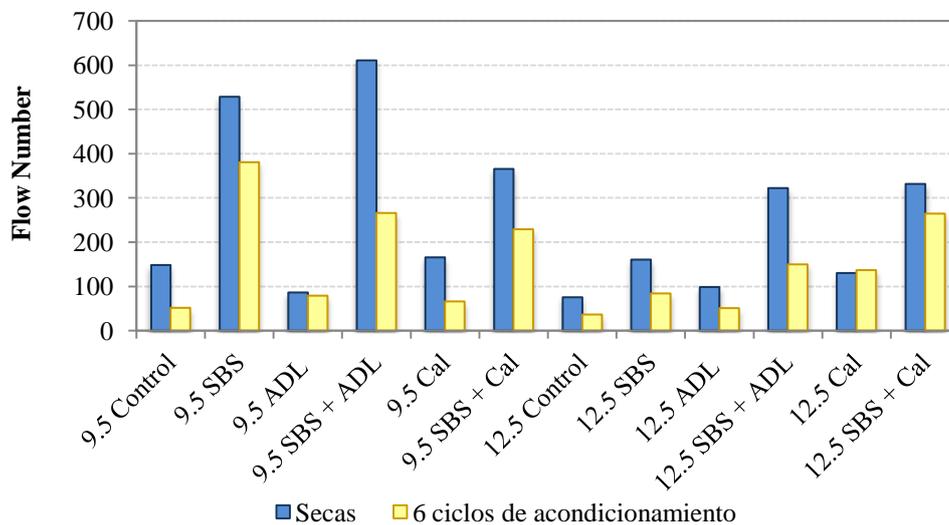


Figura 3 Flow Number Promedio

La Figura 4 resume las razones entre especímenes acondicionados y especímenes secos para los tres ensayos de desempeño. Los resultados son altamente variables y definen diferentes razones de aceptación o rechazo de mezclas en función de tipo de ensayo. En general, es posible observar un incremento en la resistencia a la humedad mediante la inclusión de agentes antidesnudantes. Por otra parte, los resultados mostrados corresponden a relaciones y por tanto

no consideran los resultados específicos de las propiedades evaluadas, los cuales inciden directamente en el desempeño de la mezcla. A modo de ejemplo, la razón obtenida en el ensayo de FN para la mezcla 9.5 ADL es de 0.91, lo cual implica que el material no se deteriora significativamente posterior a los 6 ciclos de acondicionamiento. No obstante, el resultado puntual de FN para ambas condiciones (seco y acondicionado) se encuentra por debajo de 100 ciclos para la falla, lo cual implica que dicha mezcla presenta una alta susceptibilidad a la deformación en comparación con las otras mezclas del estudio.

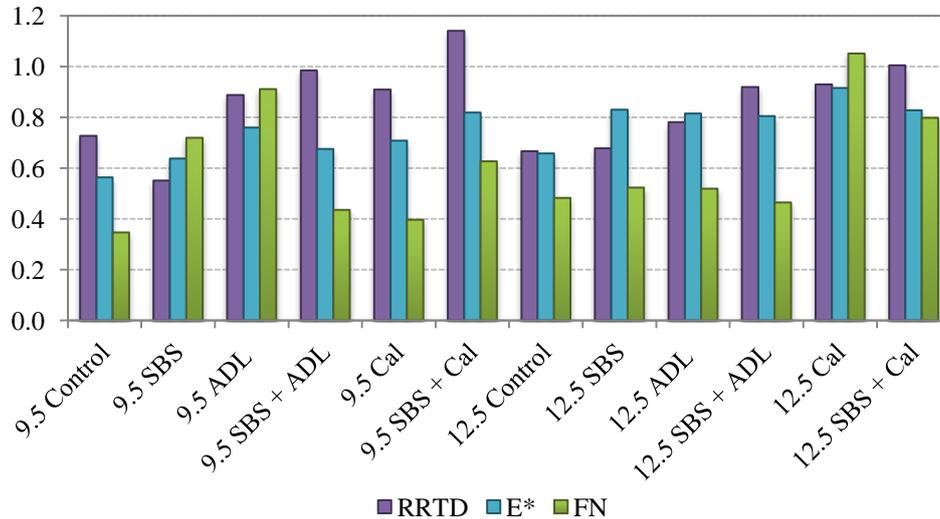


Figura 4 Razones entre especímenes secos y especímenes acondicionados

El análisis de componentes principales y de conglomerados permite integrar los resultados para generar una evaluación exhaustiva e identificar grupos de mezclas basados en su desempeño medido en laboratorio, de modo que sea posible seleccionar una mezcla en función de los requerimientos del proyecto.

4.4 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) es un procedimiento que busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados, convirtiendo un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas en un conjunto de valores de variables sin correlación lineal llamadas componentes principales [15]. El ACP busca reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos y mejorar la interpretación de los mismos.

En el presente estudio se incluyeron seis variables por cada tipo de mezcla, a saber: RTD secos y acondicionados (RTD_{seco} , RTD_{acond}), MD secos y acondicionados (E^*_{seco} , E^*_{acond}) y FN secos y acondicionados (FN_{seco} , FN_{acond}). La Tabla 3 presenta los valores característicos y la variación de la proporción explicada mediante componentes principales. El valor característico manifiesta la varianza estimada del respectivo componente principal. Se observa que los primeros tres componentes representan el 95.6% de la variación, por tanto, la evaluación considerará únicamente a estos tres componentes.

Tabla 3. Descomposición de la varianza

Componente principal	Valor Característico	Proporción	Acumulado
1	3.649	0.608	0.608
2	1.229	0.205	0.813
3	0.860	0.143	0.956
4	0.131	0.022	0.978
5	0.089	0.015	0.993
6	0.042	0.007	1.000

La Tabla 4 muestra los coeficientes de los tres componentes principales. Se puede observar que el primer componente (PC1) posee una alta correlación con las variables E^*_{seco} y FN_{seco} . El segundo componente (PC2) correlaciona prioritariamente con RTD_{seco} y E^*_{acond} . Y finalmente el tercer componente (PC3) se encuentra correlacionado con mayor fuerza con la variable RTD_{acond} . El signo positivo del coeficiente indica que el componente principal aumenta conforme la variable aumenta, mientras que el signo negativo indica que componente principal aumenta conforme la variable se reduce.

Tabla 4. Coeficientes de Componentes Principales

Variable	PC1	PC2	PC3
1 - RTD_{seco}	0.352	0.645	0.025
2 - RTD_{acond}	0.352	0.330	0.676
3 - E^*_{seco}	0.471	-0.285	-0.019
4 - E^*_{acond}	0.310	-0.600	0.456
5 - FN_{seco}	0.473	0.099	-0.380
2 - FN_{acond}	0.458	-0.153	-0.435

Los puntajes asociados a los componentes principales para cada mezcla asfáltica son calculados a partir de la siguiente expresión.

$$Y_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + a_{i3}X_3 + a_{i4}X_4 + a_{i5}X_5 + a_{i6}X_6 \quad (1)$$

Donde:

Y_i = i – ésimo componente principal (i = 1, 2 ,3)

X_p = variable (p = 1, 2, 3, 4, 5 y 6)

a_{ip} = coeficientes de combinaciones lineales de la Tabla 4

Por ejemplo, la puntuación obtenida para el primer componente principal está dada por:

$$Y_1 = 0.352 RTD_{seco} + 0.352 RTD_{acond} + 0.471 E^*_{seco} + 0.310 E^*_{acond} + 0.473 FN_{seco} + 0.458 FN_{acond} \quad (2)$$

El rendimiento general Y puede ser calculado como la ponderación del valor utilizando las proporciones de la Tabla 3, según se muestra a continuación:

$$Y = 0.608 Y_1 + 0.205 Y_2 + 0.143 Y_3 \quad (3)$$

En la Tabla 5 se presentan las puntuaciones de los componentes principales y sus rendimientos. A modo general se observa que las mezclas modificadas con SBS exhiben un mejor desempeño (altos valores de Y), especialmente si se incluye un agente antidesnudante.

Tabla 5. Puntaciones y Rendimiento de los Componentes Principales

Mezcla	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y
9.5 Control	-1.416	0.757	-0.396	-0.762
9.5 SBS	2.045	-0.017	-2.266	0.916
9.5 ADL	-1.016	1.040	0.685	-0.307
9.5 SBS + ADL	2.971	1.270	-0.207	2.037
9.5 Cal	-0.312	0.698	0.721	0.057
9.5 SBS + Cal	2.368	0.760	1.255	1.775
12.5 Control	-2.997	0.662	-0.665	-1.782
12.5 SBS	-1.641	0.004	-0.271	-1.036
12.5 ADL	-2.110	-0.905	-0.015	-1.470
12.5 SBS + ADL	0.878	-0.374	0.437	0.520
12.5 Cal	0.011	-1.628	0.906	-0.198
12.5 SBS + Cal	1.219	-2.267	-0.185	0.250

4.5 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados consiste en el agrupamiento de objetos en clases con características homogéneas a nivel de grupo y heterogéneos entre ellos [15]. Existen múltiples métodos para cuantificar la similitud entre objetos, así como algoritmos para la selección de objetos dentro de grupos. En el presente análisis se utilizó como medida de similitud la Distancia Euclidiana y el Método de Ward para la creación de los grupos. Se seleccionó un máximo de tres conglomerados de modo que exista más de un objeto de cada grupo.

La Tabla 6 muestra las asignaciones de las mezclas en conglomerados, así como su clasificación de acuerdo al análisis de componentes principales. Los resultados obtenidos producto del análisis de conglomerados son consistentes respecto al análisis de componentes principales. El dendograma mostrado en la

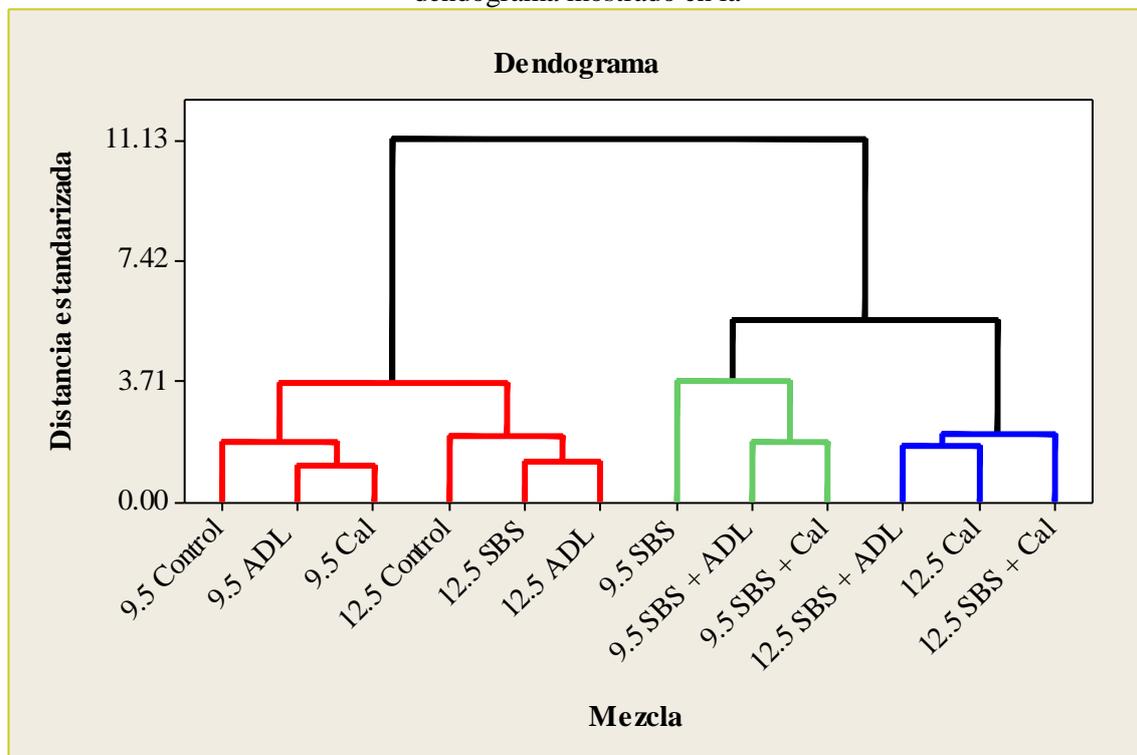


Figura 5 representa visualmente cómo las mezclas fueron combinadas utilizando las mismas variables que las consideradas en el análisis de componentes principales.

Tabla 6. Clasificaciones de mezclas y distribución de conglomerados

Mezcla	Clasificación	Conglomerado
9.5 Control	1	2
9.5 SBS	2	2
9.5 ADL	3	2
9.5 SBS + ADL	4	3
9.5 Cal	5	3
9.5 SBS + Cal	6	1
12.5 Control	7	3
12.5 SBS	8	1
12.5 ADL	9	1
12.5 SBS + ADL	10	1
12.5 Cal	11	1
12.5 SBS + Cal	12	1

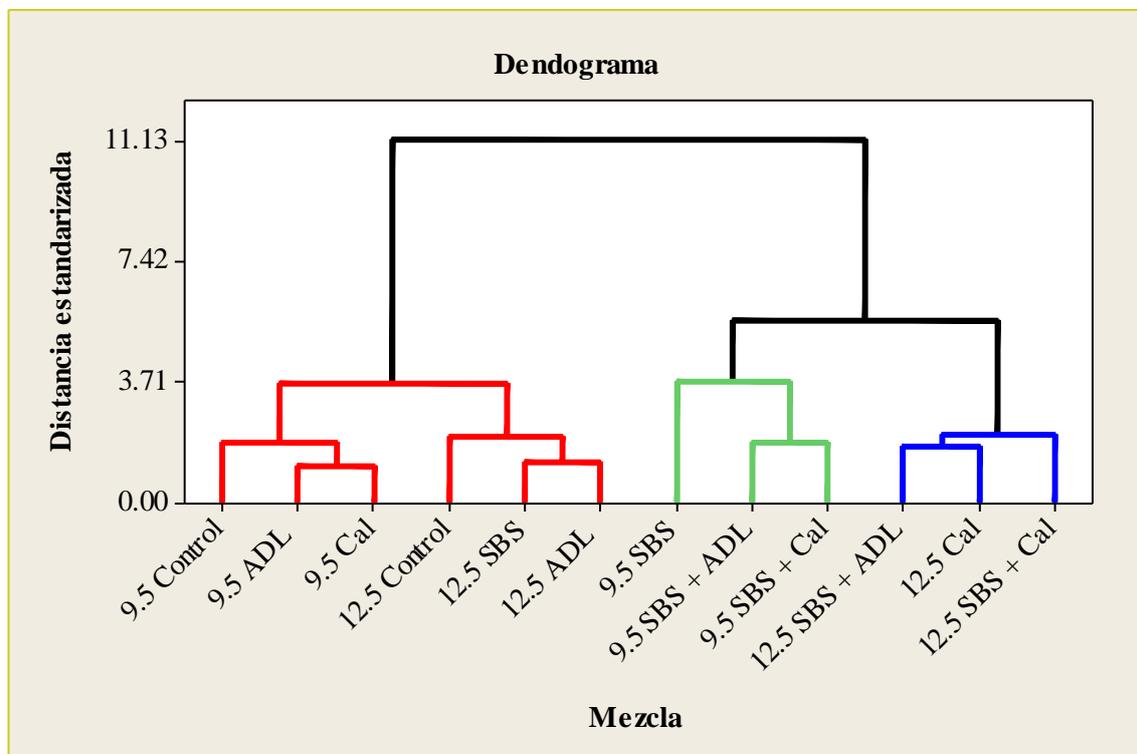


Figura 5 Dendrograma de desempeño de las mezclas

El resumen de las propiedades de cada uno de los conglomerados se presenta en la Tabla 7 y Tabla 8. El primer conglomerado contiene valores intermedios de RTD en condición seca, pero presenta las mayores reducciones para este parámetro posterior al acondicionamiento. Adicionalmente incluye las menores magnitudes de E^* y FN en ambas condiciones (seco y acondicionado). Por tanto, las mezclas contenidas en este grupo pueden ser clasificadas como de bajo desempeño. Dentro de este conglomerado se agrupan las mezclas control de ambos tamaños nominales, una mezcla con asfalto modificado con SBS y cerca de la mitad corresponden a mezclas con algún agente antidesnudante. Este primer grupo no incluye mezclas que combinan SBS con agentes antidesnudantes.

El segundo conglomerado presenta los mayores resultados de RTD y FN. A pesar que presenta también el mayor valor de E^* , incluye a su vez la mayor caída de E^* posterior al acondicionamiento. Este grupo contiene únicamente mezclas de TMN de 9.5 mm, incluyendo la mezcla con SBS y la combinación de SBS con cal y SBS con ADL. Este conglomerado es considerado como el de mejor desempeño.

Finalmente, el tercer conglomerado presenta valores intermedios de los ensayos de desempeño en la condición seca, no obstante contiene la menor afectación a dichas variables posterior al acondicionamiento. Este grupo contiene únicamente mezclas de TMN de 12.5 mm, incluyendo la mezcla con cal y la combinación de SBS con cal y SBS con ADL. Con base en los resultados anteriores se clasifican como mezclas con desempeño intermedio.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los conglomerados

Variable	Conglomerado 1, n=6		Conglomerado 2, n=3		Conglomerado 3, n=3	
	Promedio	Des. Est	Promedio	Des. Est	Promedio	Des. Est
RTD _{seco}	787.0	86.8	963.4	39.0	750.3	81.0
RTD _{acond}	614.5	138.2	865.7	314.6	701.1	61.9
E^* _{seco}	4915.2	448.1	6030.0	138.6	5990.8	303.6
E^* _{acond}	3538.5	509.1	4273.4	473.4	5084.9	323.6
FN _{seco}	122.3	40.1	501.3	125.0	261.0	113.6
FN _{acond}	61.1	18.2	291.4	78.9	183.4	70.3

Tabla 8. Características de las mezclas de cada conglomerado

Característica de la mezcla	Conglomerado 1	Conglomerado 2	Conglomerado 3
TMN	9.5 mm y 12.5 mm	9.5 mm	12.5 mm
Asfalto	Original y Modificado con SBS	Modificado con SBS	Original y Modificado con SBS
Agentes antidesnudantes adicionados	Ninguno, ADL y cal	Ninguno, ADL y cal	ADL y cal
Combina polímero con agentes antidesnudantes	No	Sí	Sí

5 Conclusiones

El objetivo del estudio consistió en desarrollar una evaluación exhaustiva del desempeño al daño por humedad en mezclas asfálticas mediante herramientas de análisis multivariable. Con base en los resultados mostrados anteriormente, se presentan las siguientes conclusiones:

Los protocolos de ensayo basados en la comparación del desempeño en especímenes secos y acondicionados pueden ser utilizados para definir criterios de aceptación o rechazo de mezclas asfálticas asociadas al fenómeno de daño por humedad. No obstante, deben definirse diferentes razones en función del ensayo utilizado.

El análisis de componentes principales indicó que tres componentes principales (combinaciones lineales de variables) explican más del 95 % de la variación en los resultados. El primer componente principal, el cual comprende aproximadamente al 61 % de la variación, presenta una alta correlación con las variables de E^* _{seco}, FN_{seco} y FN_{acond}.

El rendimiento del desempeño de cada una de las mezclas puede ser obtenido como una ponderación utilizando los componentes principales seleccionados. Estas puntuaciones indican una clasificación de la mezcla en términos de desempeño con base en las seis variables diferentes de análisis.

El análisis de conglomerados identificó tres grupos de mezclas de acuerdo a su desempeño. Los grupos 2 y 3 considerados como de alto y medio desempeño, respectivamente, incluyen

mezclas modificadas con SBS y/o agentes antidesnudantes. Las mezclas que contienen SBS y agentes antidesnudantes fueron clasificadas como mezclas de alto desempeño.

En general, las mezclas incluidas en el conglomerado de mejor desempeño comprenden los mayores promedios de las variables consideradas (a excepción del valor de E^*_{acond}). Sin embargo, este grupo no comprende necesariamente las mejores relaciones entre especímenes acondicionados respecto a especímenes secos.

6 Recomendaciones

La evaluación realizada en el presente estudio basado en técnicas de análisis multivariante corresponde a un buen criterio para la clasificación de mezclas de acuerdo a su desempeño. Las mezclas utilizadas comprenden dos configuraciones granulométricas, cada una de ellas con seis variaciones de asfalto, y por tanto con propiedades volumétricas similares. Por tanto, el presente análisis puede ser ampliado mediante la incorporación de mayor cantidad de mezclas con diferentes materiales y granulometrías, de modo que sea posible incorporar propiedades volumétricas como variables que influyen en el desempeño de la mezcla. Adicionalmente se recomienda validar la información presentada mediante la verificación del desempeño en campo.

7 Referencias

- [1] Hicks, R. G. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1991.
- [2] Hicks, R. Gray, Santucci, L. y Aschenbrenner, T. *Introduction and Seminar Objectives*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [3] Lu, Q. y Harvey, J.T. *Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods*. Research Report No. UCPRC-RR-2005-15, University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley, 2005.
- [4] Little, D. N. y Jones, D. R. *Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [5] Howard, I. L., Gallivan, V. y Huber, G. *Workshop Introduction*. Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198. 2012.
- [6] Aguiar, J.P., Salazar, J., Baldi A., Leiva F., y Loria L. *Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures with the Use of Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests*. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 21505, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2015, pp. 57-65.
- [7] Solaimanian, M., Harvey J., Tahmoressi, M. y Tandon V. *Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- [8] Hand, A. *Testing for Moisture Damage in the Laboratory*. Moisture Damage to Hot-Mix Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198. 2012.
- [9] AASHTO T 283. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [10] Solaimanian, M., Bonaquist, R. y Tandon, V. *Improved Conditioning and Testing Procedures for HMA Moisture Susceptibility*. NCHRP Report 589, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
- [11] Solaimanian, M., Fedor, D., Bonaquist, R., Soltani, A., y Tandon V. Simple Performance Test for Moisture Damage Prediction in Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, 2006, pp. 345-380.
- [12] Nadkarni, A. A., Kaloush, K. E., Zeiada, W.A. y Biligiri K. P. Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2127, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2009, pp. 29-35.
- [13] Vargas, A., Leiva F., Aguiar J. P. y Loria L. G.. Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple Performance Tests. In *Transportation Research Record: Journal of*

the Transportation Research Board, No. 2575, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2016, pp. 70-78. DOI: 10.3141/2575-08.

[14] AASHTO TP 79. *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[15] Johnson, R. A. y Wichern D. W. *Applied multivariate statistical analysis*. Essex: Pearson Education Limited, 2014.

1
2 **PRINCIPAL COMPONENT AND CLUSTERING ANALYSIS IN MOISTURE DAMAGE**
3 **EVALUATION OF HMA**

4
5 *Submitted to the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board*
6 Submitted on July 19, 2016.
7

8
9
10 Adriana Vargas-Nordcbeck, Ph.D.
11 (Corresponding author)
12 National Laboratory of Materials and Structural Models (LanammeUCR)
13 University of Costa Rica, San José, Costa Rica
14 adriana.vargasnordcbeck@ucr.ac.cr
15

16 Fabricio Leiva-Villacorta, Ph.D.
17 National Laboratory of Materials and Structural Models (LanammeUCR)
18 University of Costa Rica, San José, Costa Rica
19 E-mail: fabricio.leiva@ucr.ac.cr
20

21 José P Aguiar-Moya, Ph.D.
22 National Laboratory of Materials and Structural Models (LanammeUCR)
23 University of Costa Rica, San José, Costa Rica
24 jose.aguiar@ucr.ac.cr
25

26 Luis G Loria-Salazar, Ph.D.
27 Pavement Infrastructure Program Director
28 National Laboratory of Materials and Structural Models (LanammeUCR)
29 University of Costa Rica, P.O.Box 11501-2060, UCR, San José, Costa Rica
30 E-mail: luis.loriasalazar@ucr.ac.cr
31
32
33
34
35
36

37 Word Count: Abstract (250) + Body (3,026) + Figures and Tables (13 * 250) = 6,526

ABSTRACT

Moisture damage in asphalt concrete mixtures can be evaluated through several laboratory tests, many of which compare the results of conditioned specimens to those of dry specimens. While the results from ratios of conditioned to unconditioned specimens may provide an adequate pass/fail criteria, a more comprehensive evaluation of mixture performance should include the specific values obtained (tensile strength, dynamic modulus or flow number), as these are also related to pavement performance. The objective of this study was to provide a comprehensive evaluation of the moisture susceptibility of different asphalt mixtures through principal component and clustering analysis. Twelve mixtures were designed and produced in the laboratory using a single aggregate source for nominal maximum aggregate sizes of 9.5 mm and 12.5 mm. Each of the sizes included a control mix, an SBS modified mix, mixtures that contained antistripping agents (liquid antistripping or hydrated lime), and mixtures that combined both SBS and antistripping agents. All mixtures used the same PG 70-22 binder source. Results from the Modified Lottman Indirect Tension Test Procedure, dynamic modulus and flow number tests for conditioned and unconditioned specimens were used as inputs for the analysis. The analysis indicated that principal components can be used to explain the variation in the results and to calculate an overall performance score to rank the mixtures based on selected variables. Cluster analysis was used to group mixtures and to identify characteristics that affect their performance. It was found that mixtures that combined SBS and an antistripping agent ranked highest in overall performance.

1 INTRODUCTION

2
3 Moisture damage is a widespread problem that can cause premature failure in asphalt concrete
4 mixtures. This type of damage can occur due to a loss of bond between the asphalt binder and the
5 aggregate, or because moisture permeates and weakens the mastic, making it more susceptible
6 during cyclic loading (1-6).

7 For decades, asphalt technologists and state highway agencies have been in pursuit of a
8 laboratory test procedure that can reliably predict moisture resistance of asphalt pavements in the
9 field (7). There are many tests that can be used to evaluate moisture susceptibility of raw
10 materials and mixtures with different types of results (qualitative and quantitative). However,
11 they often fail to account for differences in laboratory and field-produced mixtures (8).

12 The AASHTO T283 Test Method (9), also known as the Modified Lottman Indirect
13 Tension Test Procedure, was adopted by the Superpave system as the required test for
14 determination of moisture damage and is currently the most commonly specified test procedure
15 for determination of moisture damage potential (7, 8). Nonetheless, this test method is empirical
16 and is performed under conditions that differ significantly from those in the field: its
17 conditioning procedure does not include dynamic loading, and it uses strength, a parameter that
18 is not directly used in pavement design, to determine whether unacceptable moisture damage will
19 occur in the field (3). This often results in false positives or false negatives in the prediction of
20 moisture susceptibility (7).

21 Simple performance tests (SPTs) have been used as an alternative to evaluate moisture
22 susceptibility of asphalt mixtures with promising results (10-13). Similar to AASHTO T283, test
23 parameters from the dynamic modulus and flow number tests can be calculated by comparing the
24 results of conditioned specimens to those of dry specimens. The use of multiple conditioning
25 cycles has also been included during testing to provide a more accurate simulation of field
26 performance (13).

27 While the results from ratios of conditioned to unconditioned specimens may provide an
28 adequate pass/fail criterion, a more comprehensive evaluation of mixture performance should
29 include the specific values obtained (tensile strength, dynamic modulus or flow number), as
30 these are also related to pavement performance. Multivariate statistical techniques such as
31 principal components analysis (PCA) and clustering can be useful tools to assess mixture
32 performance using a more robust data set.

33 34 OBJECTIVES AND SCOPE OF WORK

35
36 The objective of this study was to provide a comprehensive evaluation of the moisture
37 susceptibility of different asphalt mixtures through principal component and clustering analysis.
38 Results from the Modified Lottman Indirect Tension Test Procedure (AASHTO T283), dynamic
39 modulus and flow number tests for conditioned and unconditioned specimens were used as
40 inputs for the analysis.

41

42

1 METHODOLOGY

3 Mix Designs

5 Twelve mixtures were designed and produced in the laboratory using a single aggregate source
 6 for nominal maximum aggregate sizes (NMAS) of 9.5 mm and 12.5 mm. Each of the sizes
 7 included a control mix, as well as the following variations: 2% SBS modified mix by total
 8 weight of binder, mixtures that contained 0.5% liquid antistripping (LAS) by total weight of binder
 9 and 1% hydrated lime by total weight of aggregate, a mixture that combined 2% SBS and 1%
 10 lime, and a mixture containing 2% SBS and 0.5% liquid antistripping. All mixtures used the same PG
 11 70-22 binder source. Table 1 shows the gradations for the two aggregate sizes and Table 2 shows
 12 the volumetric properties of all the mixtures used in this study.

14 **TABLE 1 Mixture Gradations**

Sieve Size	% Passing	
	9.5 NMAS	12.5 NMAS
3/4"	100	100
1/2"	100	95.4
3/8"	95.0	78.3
N° 4	60.0	43.3
N° 8	40.0	28.9
N° 16	25.0	20.0
N° 30	17.0	14.8
N° 50	10.0	10.9
N° 100	7.0	8.0
N° 200	5.0	5.8

15
16 **TABLE 2 Mixture Volumetric Properties**

Mixture	% Design AC	% VMA	% VFA	Dust Proportion
9.5 Control	6.5	15.5	73.7	1.0
9.5 SBS	6.5	15.8	74.3	1.0
9.5 LAS	6.5	15.9	72.7	1.0
9.5 SBS+LAS	6.3	15.4	72.9	1.0
9.5 Lime	6.7	16.3	74.4	0.9
9.5 SBS+Lime	6.6	16.0	74.4	1.0
12.5 Control	7.0	15.8	74.5	1.1
12.5 SBS	6.5	15.1	73.3	1.2
12.5 LAS	6.5	14.7	72.7	1.2
12.5 SBS+LAS	5.9	13.1	69.9	1.5
12.5 Lime	6.0	14.0	71.5	1.3
12.5 SBS+Lime	6.3	14.3	72.0	1.3

18 Laboratory Testing

17
18
19
20 For each of the mixtures, the Modified Lottman Indirect Tension Test, dynamic modulus (E^*)
 21 and flow number (FN) tests were conducted for dry (unconditioned) specimens and specimens
 22 subjected to 6 freeze/thaw cycles, to simulate more aggressive field conditions. For all tests, one

1 cycle of conditioning consisted of subjecting vacuum-saturated specimens in a freezer at -18°C
 2 for 16 hours, followed by a 60°C water bath for 24 hours.

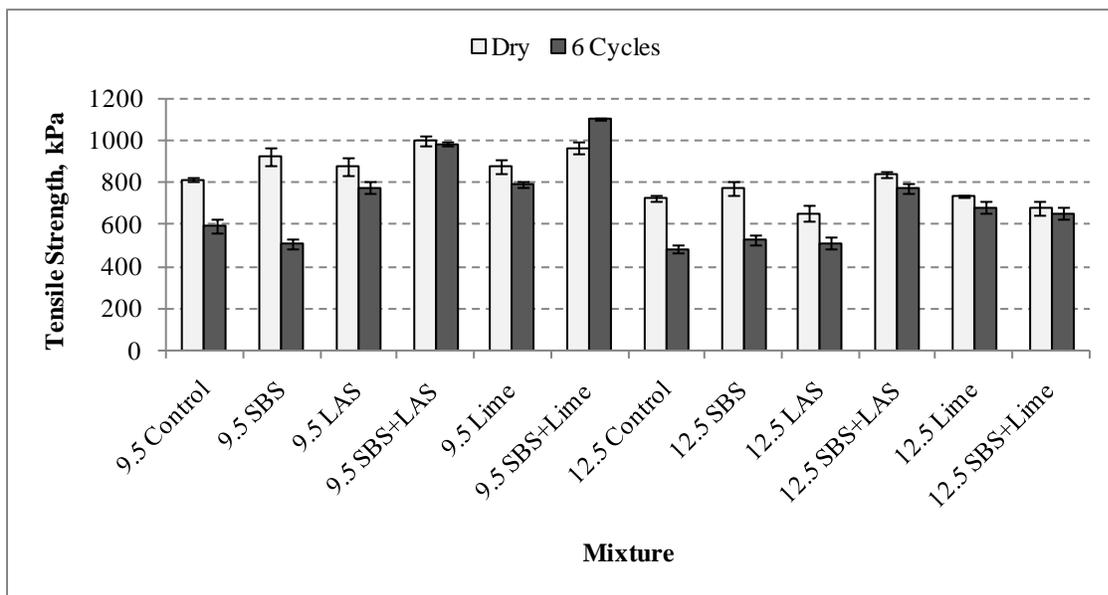
3 The dynamic modulus and flow number tests were performed in accordance to
 4 AASHTO TP79 (14). E^* data used in the analysis correspond to the measurements made at 20°C
 5 and 10 Hz (typical pavement operating conditions).
 6

7 RESULTS AND DISCUSSION

9 Tensile strength

10

11 Figure 1 shows the average tensile strength for all mixtures for dry and conditioned specimens.
 12 In general, mixtures containing SBS have higher tensile strengths within each of the nominal
 13 maximum aggregate sizes. However, antistripping additives (liquid or lime) are required to
 14 prevent the tensile strengths from decreasing excessively after conditioning (i.e. maintain a high
 15 tensile strength ratio).
 16



17

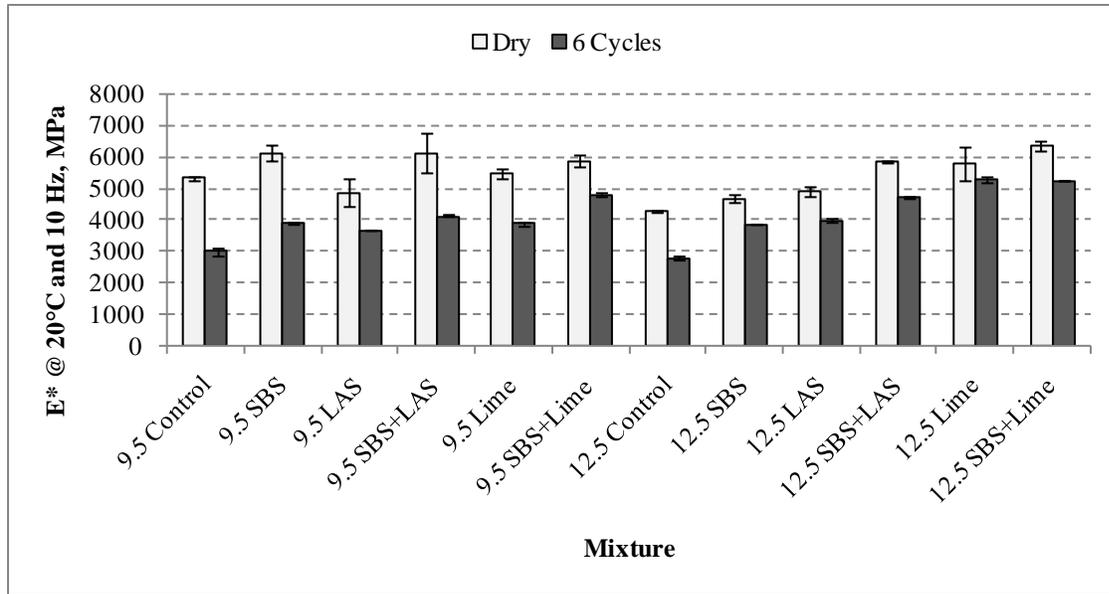
18 **FIGURE 1 Average tensile strength.**

19

20 Dynamic Modulus

21

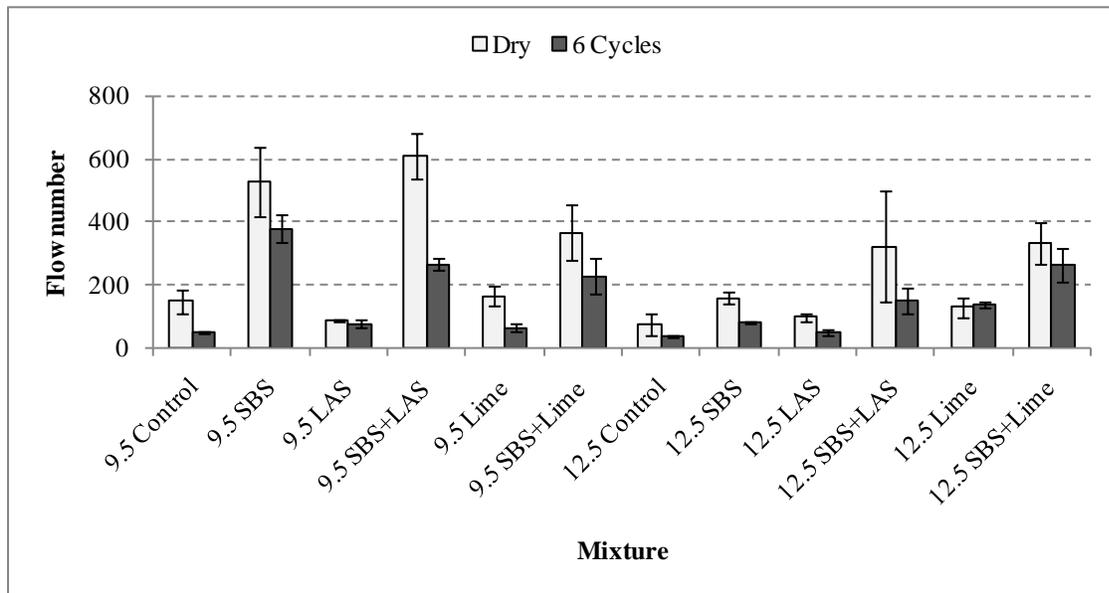
22 Figure 2 shows the average dynamic modulus for all mixtures. The trend is similar to the one
 23 observed for tensile strength, but in this case the ratio of conditioned to unconditioned specimens
 24 tends to be lower, especially for mixtures that do not contain antistripping agents.



1
2 **FIGURE 2 Average dynamic modulus at 20°C and 10 Hz.**

3
4 **Flow Number**

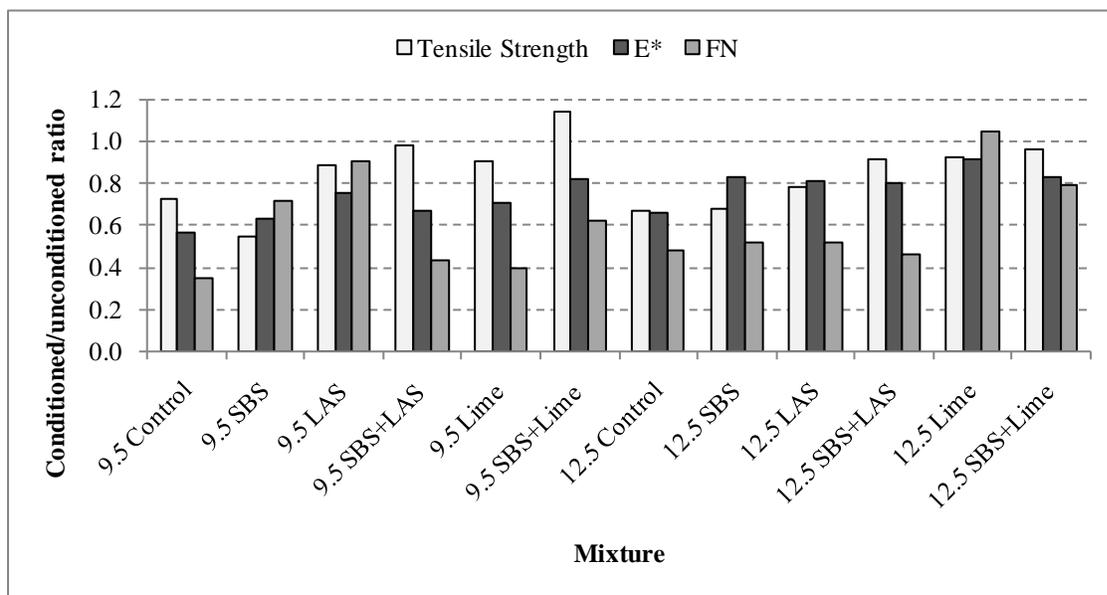
5
6 The average flow number results are shown in Figure 3. It can be observed that SBS modified
7 mixtures tend to be more resistant to permanent deformation, but antistripping agents are
8 required to maintain a similar performance after conditioning. It should be noted that the results
9 from the flow number test exhibit higher variability compared to the tensile strength and
10 dynamic modulus results.
11



12
13 **FIGURE 3 Average flow number.**

14
15 Figure 4 summarizes the conditioned to unconditioned specimens' ratio for all three tests
16 performed. The results are highly variable, and given a minimum required value, a mixture may

1 or may not pass, depending on which test is used. In general, the observed trend indicates that
 2 moisture resistance is improved with the addition of antistripping agents. However, this
 3 assessment is based solely on the shown ratios, and does not consider the specific values for the
 4 measured properties, which also affect mixture performance. For example, the 9.5 LAS mixture
 5 has a FN ratio of 0.91, meaning it does not deteriorate significantly after conditioning. However,
 6 the individual flow number values are under 100, so this mixture is more susceptible to rutting
 7 compared to others in this study, and may not be adequate for high traffic applications.
 8



9
 10 **FIGURE 4 Ratio of conditioned to unconditioned specimens.**
 11

12 Principal component analysis and clustering can integrate all the results to provide a more
 13 comprehensive evaluation and identify groups of mixtures based on their overall performance, so
 14 that a mixture can be selected according to specific project needs.
 15

16 **Principal Component Analysis**

17
 18 A principal component analysis (PCA) is a procedure that explains the variance-covariance
 19 structure of a set of variables through a few linear combinations of these variables, called
 20 principal components. The main objectives of PCA are data reduction and interpretation. A
 21 detailed description of the procedure can be found elsewhere (15).

22 In this study, six variables were included for each of the mixtures: dry and conditioned
 23 tensile strength ($S_{t\ dry}$, $S_{t\ cond}$), dry and conditioned dynamic modulus (E_{dry} , E_{cond}) and dry and
 24 conditioned flow number (FN_{dry} , FN_{cond}). Table 3 shows the eigenvalues and the proportion of
 25 variation explained by the principal components. The eigenvalues represent the estimated
 26 variances of the respective principal components. It can be observed that the first three principal
 27 components explain 95.6% of the variation, therefore, only these components were used in the
 28 evaluation.
 29
 30

1 **TABLE 3 Variance Decomposition**

Principal component	Eigenvalue	Proportion	Cumulative
1	3.649	0.608	0.608
2	1.229	0.205	0.813
3	0.860	0.143	0.956
4	0.131	0.022	0.978
5	0.089	0.015	0.993
6	0.042	0.007	1.000

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

Table 4 shows the coefficients of the first three principal components. From these results, it can be seen that the first principal component is strongly correlated with the dry dynamic modulus, and the dry and conditioned flow numbers. The second principal component is correlated primarily with the dry tensile strength and the conditioned dynamic modulus, while the third principal component is mostly correlated with the conditioned tensile strength. The positive sign of the coefficients indicates that the principal component increases with an increase in the corresponding variable, while a negative sign means that the principal component increases with a decrease in the variable.

12 **TABLE 4 Principal Component Coefficients**

Variable	PC1	PC2	PC3
1 - $S_{t\ dry}$	0.352	0.645	0.025
2 - $S_{t\ cond}$	0.352	0.330	0.676
3 - E_{dry}	0.471	-0.285	-0.019
4 - E_{cond}	0.310	-0.600	0.456
5 - FN_{dry}	0.473	0.099	-0.380
6 - FN_{cond}	0.458	-0.153	-0.435

13

14

15

16

The scores associated to the principal components for each of the asphalt mixtures are calculated as follows:

$$Y_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{i6}X_6 \quad (1)$$

17

18

19

20

21

22

23

where

Y_i = i th principal component ($i = 1, 2, 3$)

X_p = variable ($p = 1, 2, \dots, 6$)

a_{ip} = linear combination coefficients from Table 4

For example, the score for the first principal component is given by Equation 2:

$$Y_1 = 0.352S_{t\ dry} + 0.352S_{t\ cond} + 0.471E_{dry} + 0.310E_{cond} + 0.473FN_{dry} + 0.458FN_{cond} \quad (2)$$

24

25

26

27

An overall performance score (Y) can be calculated as a weighted value using the proportions shown in Table 3:

$$Y = 0.608Y_1 + 0.205Y_2 + 0.143Y_3 \quad (3)$$

28

29

30

The scores for the three principal components as well as the overall performance score are shown in Table 5. A higher value of Y indicates better performance. In general, it can be

1 observed that SBS modified mixtures exhibit better performance, especially if combined with an
 2 antistripping additive.

3
 4 **TABLE 5 Principal Component Scores and Overall Performance**

Mixture	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y
9.5 Control	-1.416	0.757	-0.396	-0.762
9.5 SBS	2.045	-0.017	-2.266	0.916
9.5 LAS	-1.016	1.040	0.685	-0.307
9.5 SBS+LAS	2.971	1.270	-0.207	2.037
9.5 Lime	-0.312	0.698	0.721	0.057
9.5 SBS+Lime	2.368	0.760	1.255	1.775
12.5 Control	-2.997	0.662	-0.665	-1.782
12.5 SBS	-1.641	0.004	-0.271	-1.036
12.5 LAS	-2.110	-0.905	-0.015	-1.470
12.5 SBS+LAS	0.878	-0.374	0.437	0.520
12.5 Lime	0.011	-1.628	0.906	-0.198
12.5 SBS+Lime	1.219	-2.267	-0.185	0.250

5
 6 **Cluster Analysis**

7
 8 Cluster analysis consists on grouping objects into classes so that there is some similarity between
 9 the objects in a given class (15). There are several methods for measuring the similarity between
 10 objects as well as algorithms for sorting objects into groups. This study used the Euclidian
 11 distance as the similarity measure and Ward's method for creating the groups. A maximum of
 12 three clusters was selected so that the resulting groups would contain more than one object.

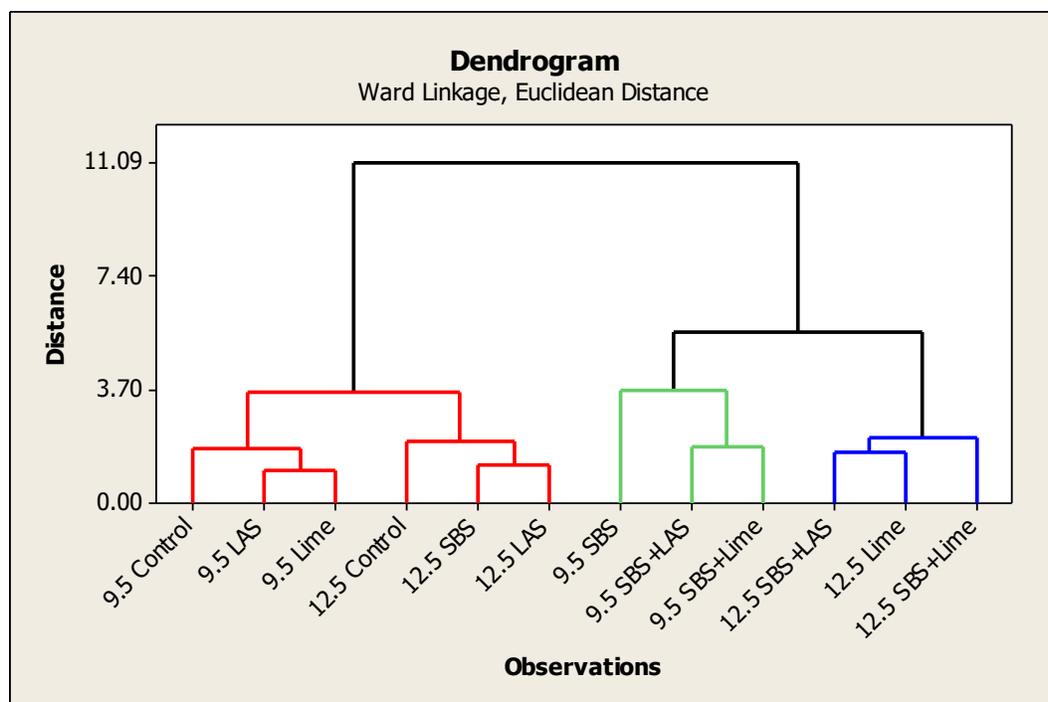
13 Table 6 shows the cluster assignment for the mixtures, along with the rank from the
 14 principal component analysis. The grouping resulting from the cluster analysis is mostly in
 15 agreement with the results from the principal component analysis. The dendogram shown in
 16 Figure 5 is a visual representation of how mixtures were combined using the same variables as
 17 the principal component analysis.

18
 19 **TABLE 6 Mixture Rank and Cluster Distribution**

Mixture	Rank	Cluster
9.5 SBS+LAS	1	2
9.5 SBS+Lime	2	2
9.5 SBS	3	2
12.5 SBS+LAS	4	3
12.5 SBS+Lime	5	3
9.5 Lime	6	1
12.5 Lime	7	3
9.5 Antistrip	8	1
9.5 Control	9	1
12.5 SBS	10	1
12.5 LAS	11	1
12.5 Control	12	1

20

21



1
2 **FIGURE 5 Dendrogram for mixture performance.**

3
4 A summary of the properties for each of the clusters is given in Tables 7 and 8. The first
5 cluster has intermediate values for dry tensile strength, but exhibits the greater reduction for this
6 parameter after conditioning. It also has the lowest values for dynamic modulus and flow number
7 (dry and conditioned), so mixtures in this cluster can be considered the ones with the poorer
8 performance. They include both nominal maximum aggregate sizes, one has SBS modified
9 binder, and about half of the mixtures in the group were treated with antistripping aid. This group
10 did not include any mixtures combining SBS and antistripping agents.

11 The second cluster has the highest tensile strengths and flow numbers. Although it also
12 exhibits the highest dry dynamic modulus, this value has the greater reduction after conditioning.
13 All mixtures in this group have a 9.5 mm NMA and contain SBS modified binder. In some
14 cases SBS is combined with antistripping agents. The mixtures in this cluster can be considered
15 the best performing mixtures.

16 Finally, the third cluster has intermediate values for all the parameters measured under
17 the dry condition, but are the least affected after being subjected to conditioning. All mixtures in
18 this group have a 12.5 mm NMA and contain either liquid antistripping or lime, some of them
19 combined with SBS. This group exhibits intermediate performance.

20
21 **TABLE 7 Descriptive Statistics of the Clusters**

Test result	Cluster 1, n = 6		Cluster 2, n = 3		Cluster 3, n = 3	
	Avg.	St. Dev.	Avg.	St. Dev.	Avg.	St. Dev.
$S_{t\ dry}$, kPa	787.0	86.8	963.4	39.0	750.3	81.0
$S_{t\ cond}$, kPa	614.5	138.2	865.7	314.6	701.1	61.9
E_{dry} , MPa	4915.2	448.1	6030.0	138.6	5990.8	303.6
E_{cond} , MPa	3538.5	509.1	4273.4	473.4	5084.9	323.6
FN_{dry}	122.3	40.1	501.3	125.0	261.0	113.6
FN_{cond}	61.1	18.2	291.4	78.9	183.4	70.3

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38

TABLE 8 Mixture Characteristics of the Clusters

Mixture characteristics	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
NMAS	9.5, 12.5	9.5	12.5
Asphalt binder	Neat, SBS modified	SBS modified	Neat, SBS modified
Antistripping aid	None, LAS, lime	None, LAS, lime	LAS, lime
Polymer combined with antistripping aid	No	Yes	Yes

CONCLUSIONS

The objective of this study was to provide a comprehensive evaluation of the moisture damage performance of asphalt mixtures using multivariate analysis tools. Based on the previous results, the following conclusions were made:

- Testing protocols that compare ratios of conditioned to unconditioned specimens can be useful to establish a pass/fail criteria regarding moisture damage resistance. However, results vary depending on which test is used.
- Principal component analysis determined that for the mixtures included in this study, three linear combinations of the variables (principal components) explain most of the variation in the results. The first principal component, which explains roughly 61% of the variation, is strongly correlated with the dry dynamic modulus, and the dry and conditioned flow numbers.
- An overall performance score can be calculated for each mixture as a weighted value using the selected principal components. These scores indicate how the mixtures rank in terms of performance, taking into account six different variables.
- Clustering analysis identified three groups of mixtures according to their performance. Best and intermediate performing mixtures (clusters 2 and 3) contained polymer modified binder and/or antistripping aid. Mixtures that combined SBS and an antistripping agent ranked high in overall performance.
- In general, mixtures in the best performing group have the highest average values for the variables (with the exception of the conditioned dynamic modulus). However, they don't necessarily have the highest conditioned to unconditioned ratios.

The type of analysis performed in this study using multivariate techniques is a good option for classifying mixtures according to their performance. The mixtures used had two gradations, each with several variations, resulting in similar volumetric properties. The analysis could be extended to include more mixtures with different gradations and materials, and mixture properties may be included as variables to determine their influence in performance. It is also recommended that the results be validated with field performance data.

REFERENCES

1. Hicks, R. G. *NCHRP Synthesis of Highway Practice 175: Moisture Damage in Asphalt Concrete*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1991.

- 1 2. Hicks, R. Gray, Larry Santucci, and Tim Aschenbrener. *Introduction and Seminar*
2 *Objectives*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National Seminar. 2003.
- 3 3. Lu, Q. and J.T. Harvey. *Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt*
4 *Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods*. Research Report No. UCPRC-RR-
5 2005-15, University of California Pavement Research Center, UC Davis and Berkeley, 2005.
- 6 4. Little, D.N. and D.R. Jones. *Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in*
7 *Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements - A National
8 Seminar. 2003.
- 9 5. Howard, I.L., V. Gallivan and G. Huber. *Workshop Introduction*. Moisture Damage to Hot-
10 Mix Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198.
11 2012.
- 12 6. Aguiar-Moya, J.P., J. Salazar-Delgado, A. Baldi-Sevilla, F. Leiva-Villacorta, and L. Loria-
13 Salazar. *Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures with the Use of Bitumen*
14 *Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests*. In *Transportation Research Record:*
15 *Journal of the Transportation Research Board*, No. 21505, Transportation Research Board of
16 the National Academies, Washington D.C., 2015, pp. 57-65.
- 17 7. Solaimanian, M., J. Harvey, M. Tahmoressi and V. Tandon. *Test Methods to Predict*
18 *Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements*. Moisture Sensitivity of Asphalt
19 Pavements - A National Seminar. 2003.
- 20 8. Hand, A. *Testing for Moisture Damage in the Laboratory*. Moisture Damage to Hot-Mix
21 Asphalt Mixtures - Synopsis of a Workshop. Transportation Research Circular E-C198.
22 2012.
- 23 9. AASHTO T 283. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt*
24 *(HMA) to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and
25 Transportation Officials, 2011.
- 26 10. Solaimanian, M., R.F. Bonaquist and V. Tandon. *Improved Conditioning and Testing*
27 *Procedures for HMA Moisture Susceptibility*. NCHRP Report 589, Transportation Research
28 Board of the National Academies, Washington, D.C., 2007.
- 29 11. Solaimanian, M., D. Fedor, R. Bonaquist, A. Soltani and V. Tandon. Simple Performance
30 Test for Moisture Damage Prediction in Asphalt Concrete. *Journal of Association of Asphalt*
31 *Paving Technologists*, Vol. 75, 2006, pp. 345-380.
- 32 12. Nadkarni, A.A., K.E. Kaloush, W.A. Zeiada and K.P. Biligiri. Using Dynamic Modulus Test
33 to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. In *Transportation Research*
34 *Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2127, Transportation Research
35 Board of the National Academies, Washington D.C., 2009, pp. 29-35.
- 36 13. Vargas-Nordbeck, A., F. Leiva Villacorta, J.P. Aguiar Moya and L.G. Loría Salazar.
37 Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple
38 Performance Tests. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation*
39 *Research Board*, No. 2575, Transportation Research Board of the National Academies,
40 Washington, D.C., 2016, pp. 70-78. DOI: 10.3141/2575-08.
- 41 14. AASHTO TP 79. *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow*
42 *Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*.
43 American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- 44 15. Johnson, R.A. and D.W. Wichern. *Applied multivariate statistical analysis*. Essex: Pearson
45 Education Limited, 2014.
- 46