



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

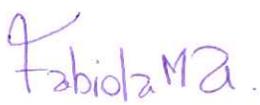
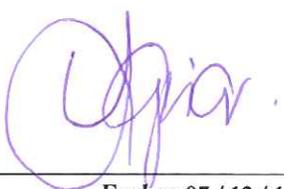
1. Informe REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas		4. Fecha del Informe Diciembre, 2016
4. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
5. Resumen <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> <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> <i>El presente documento presenta el avance del proyecto, comprendiendo los principales resultados obtenidos al mes de noviembre de 2016.</i>		
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  Fecha: 07 / 12 / 16		
11. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 07 / 12 / 16		12. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  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 PRELIMINARES24

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).

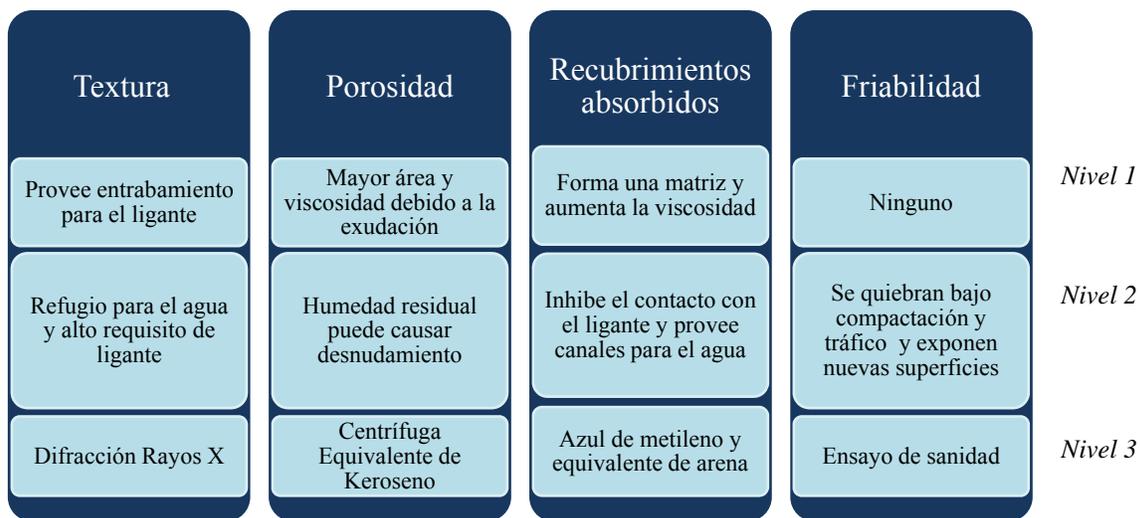


Figura 1. Propiedades físicas de los agregados y su efecto en el desnudamiento (11)

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).

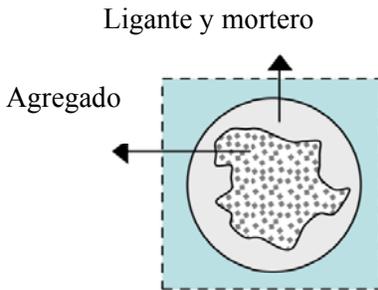
Al menos dos mecanismos (acumulación de presión de poro y socavación hidráulica) están asociados con el daño causado por las cargas cíclicas en el concreto asfáltico. Por lo tanto, se puede decir que en igualdad de condiciones de los demás factores, el incremento en las cargas de tráfico (en términos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

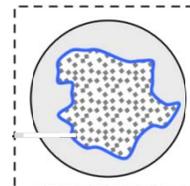


2.3 MECANISMOS DE FALLA DE DAÑO POR HUMEDAD

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:



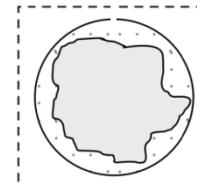
Desnudamiento: Consiste en la separación de la película de asfalto que recubre la superficie del agregado, definido como un proceso de naturaleza química y termodinámica. (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)



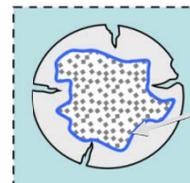
Dispersión del mortero: Proceso de naturaleza química y termodinámica que consiste en la pérdida gradual de la cohesión en el ligante o mortero asfáltico, producto de largos periodos de difusión y pérdida de material por la presencia de flujo de agua. (Little y Jones, 2003; Kringos y Scarpas 2005, 2006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

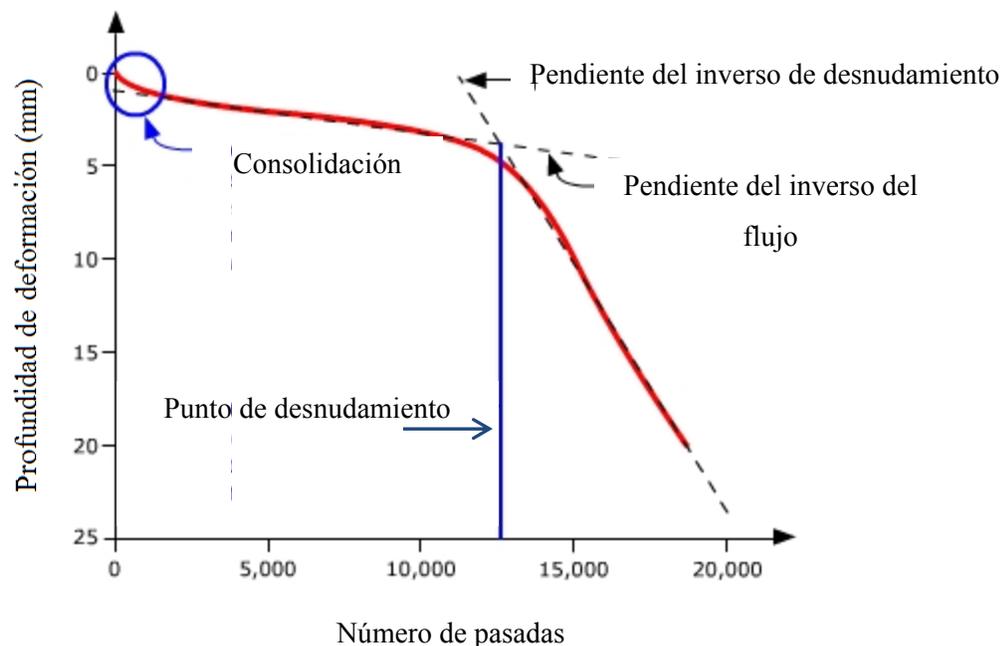


Figura 2. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (2)

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

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R3	Fecha de emisión: 7 de diciembre de 2016	Página 19 de 51
---------------------------	--	-----------------



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 MÉTODOLÓGÍA 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 (*G_{bs}*) y aparentes (*G_{sa}*), 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>G_{bs}</i>	2.59	2.67	2.66
<i>G_{sa}</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
<i>Gbs</i>	2.49	2.61	2.6	2.64
<i>Gsa</i>	2.72	2.73	2.72	2.73
<i>% Abs</i>	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

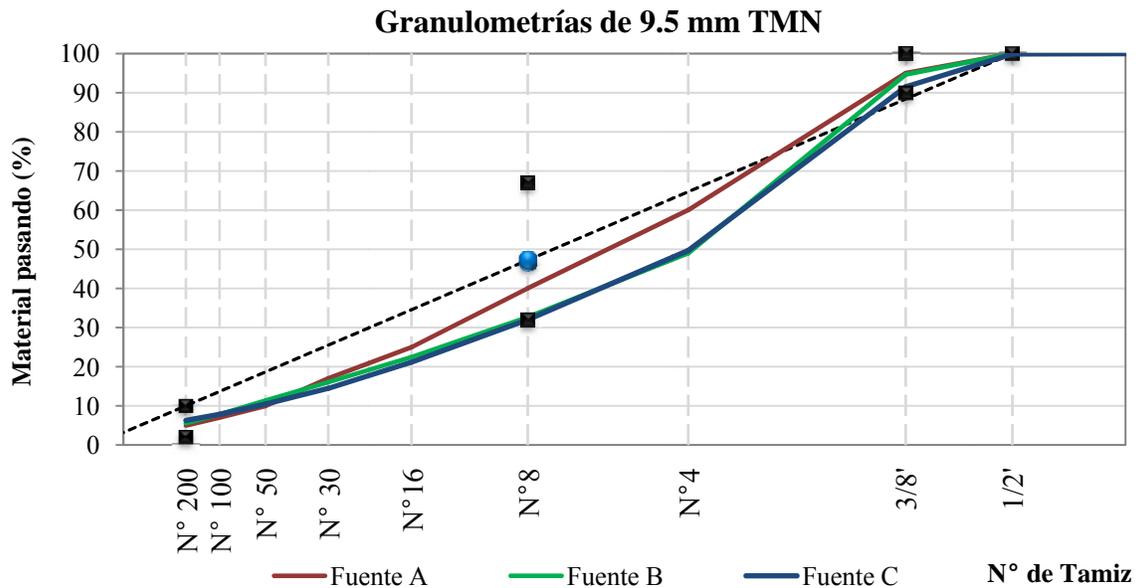


Figura 3. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm

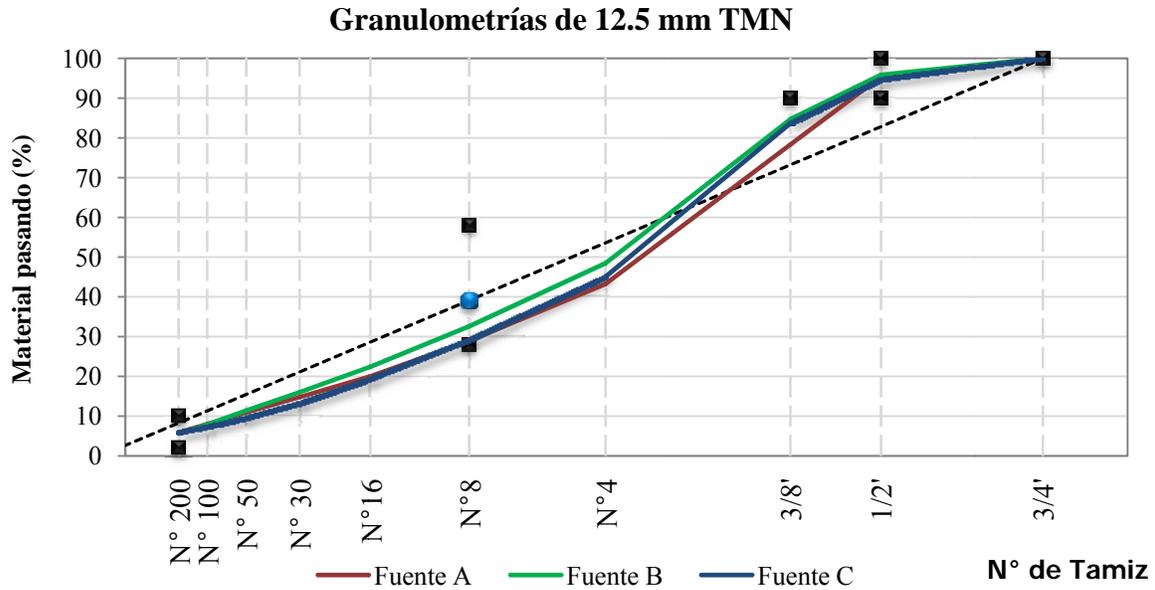


Figura 4. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm

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.

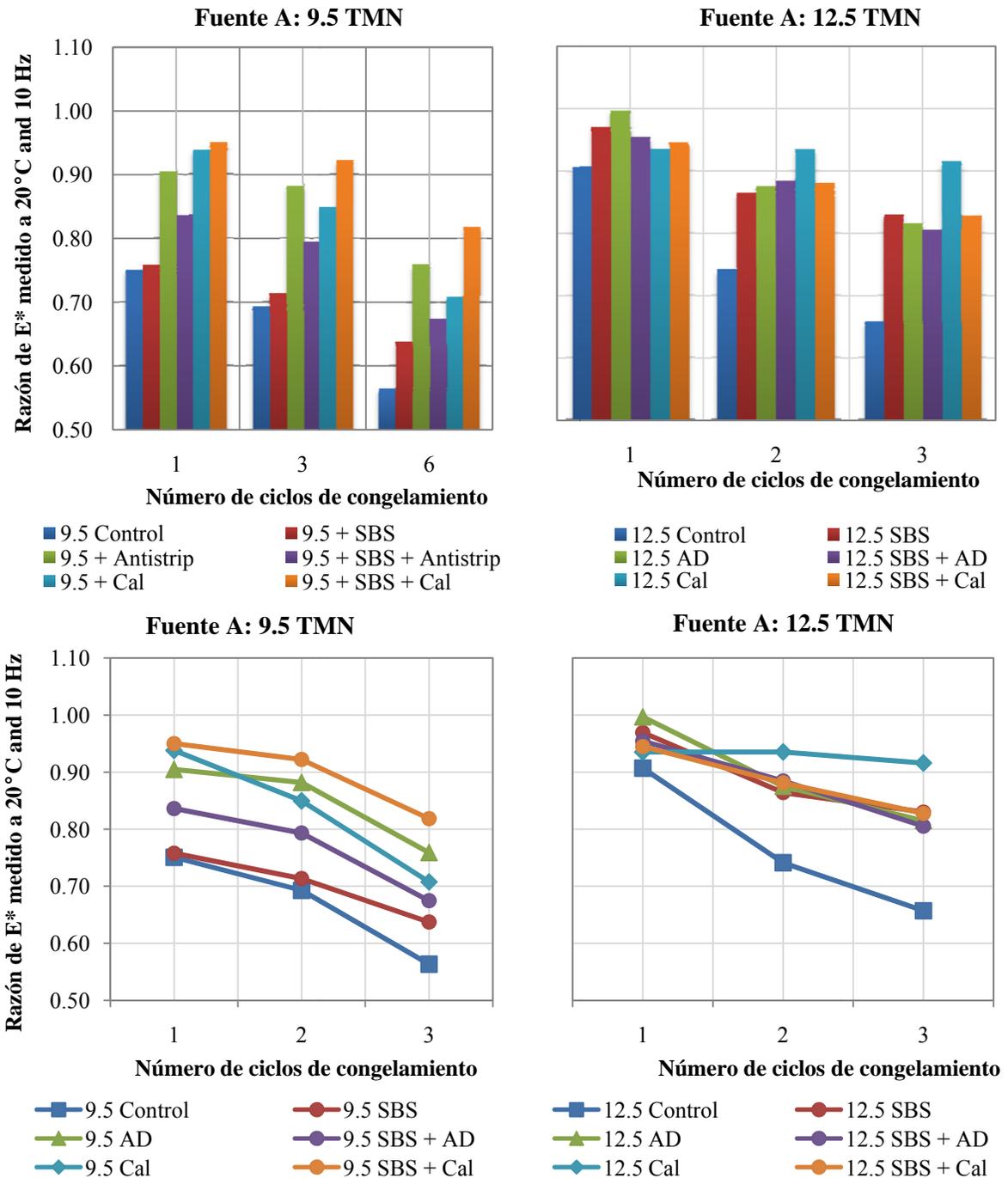


Figura 5. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente A



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.

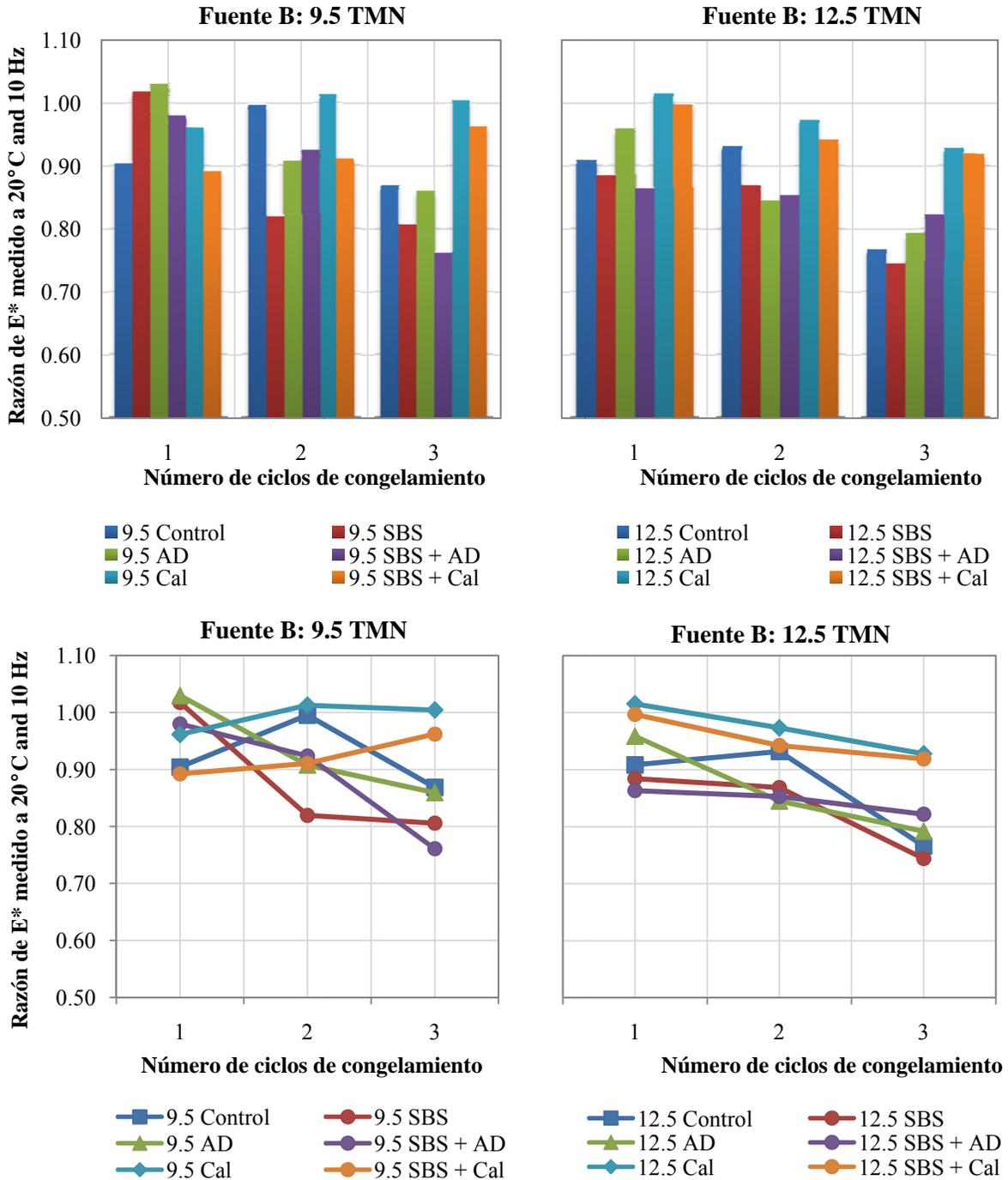


Figura 6. Resultados de razones de E* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de congelamiento de la Fuente B



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.

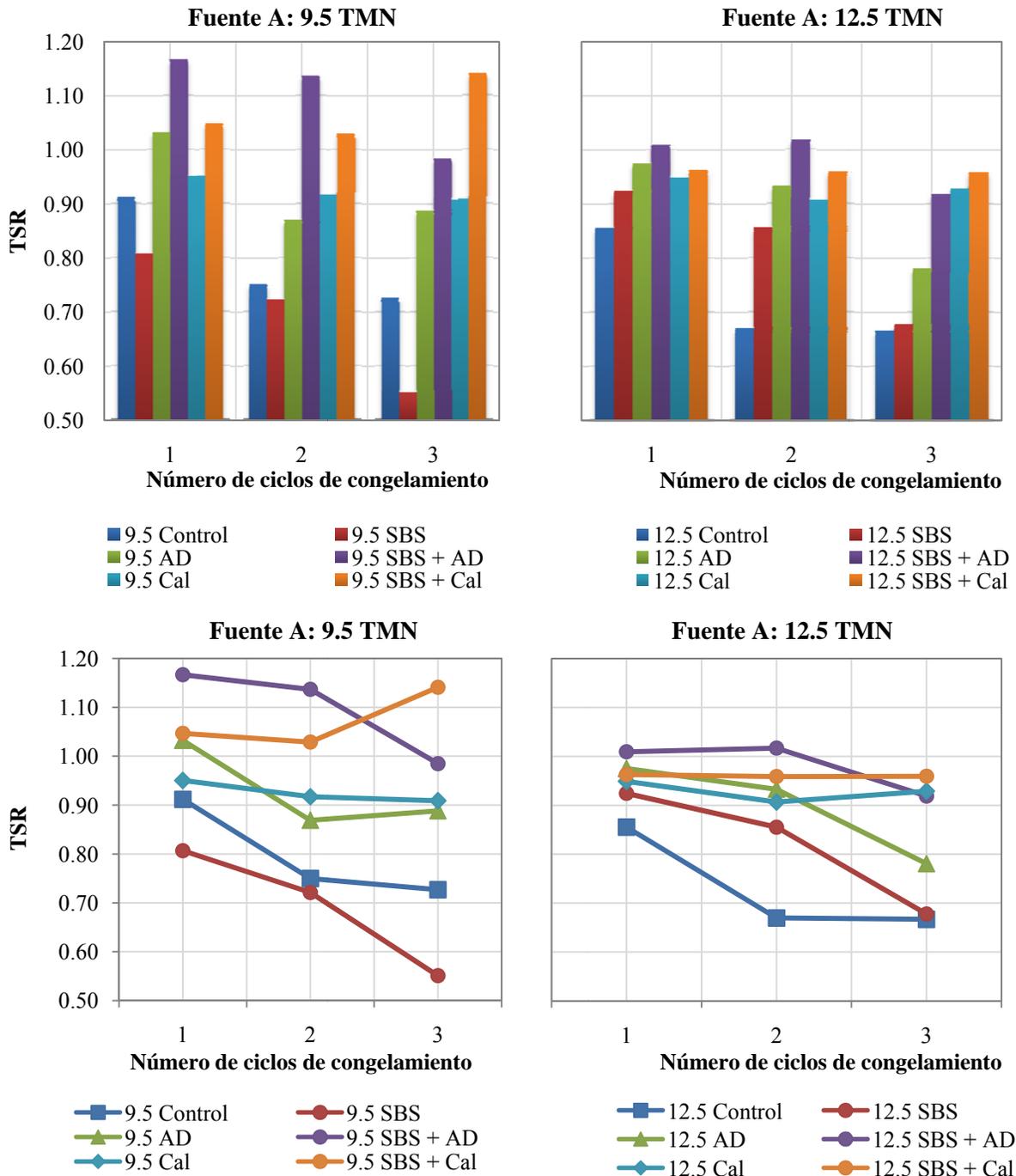


Figura 7. Resultados de TSR de la Fuente A



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.

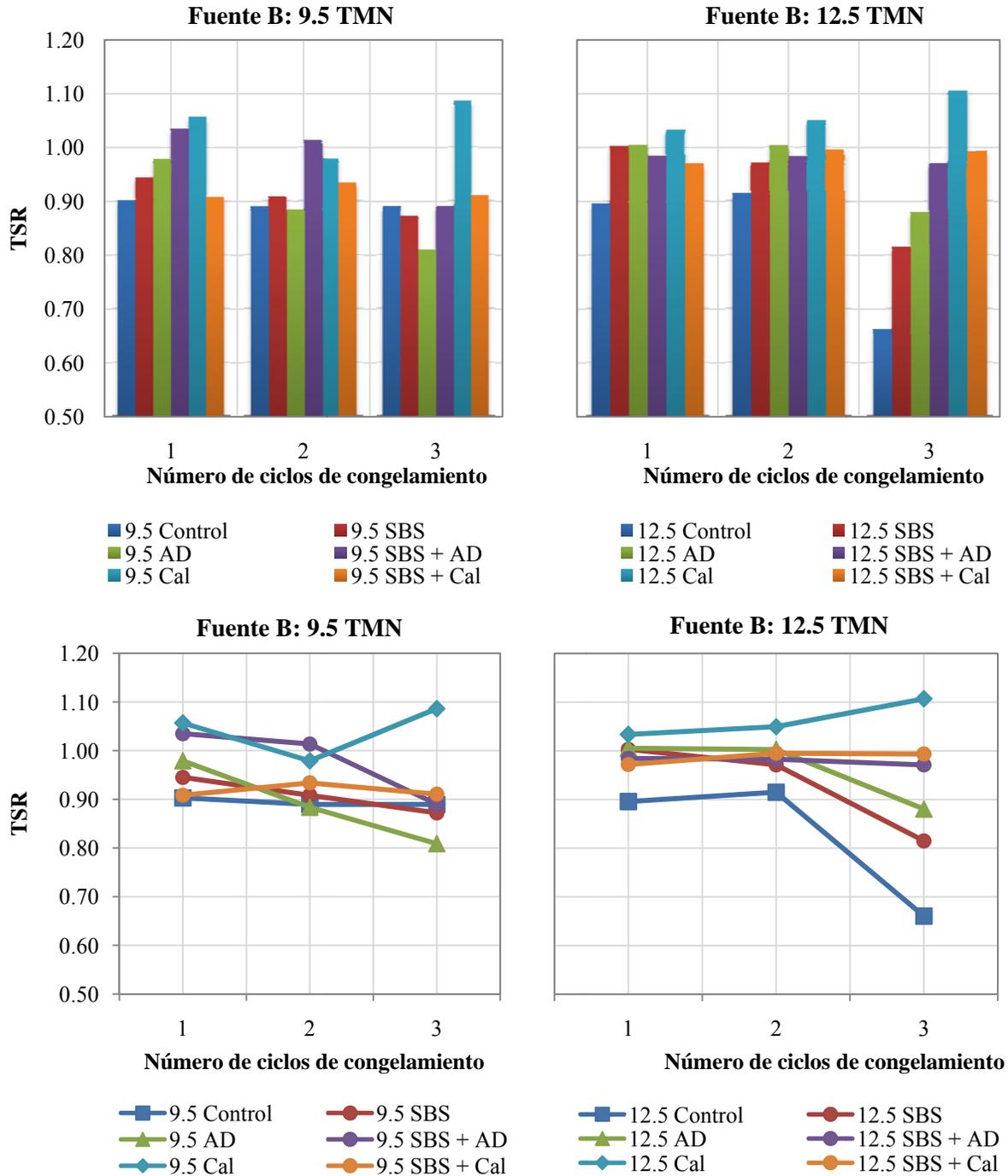


Figura 8. Resultados de TSR de la Fuente B



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
---------------------------	--	-----------------

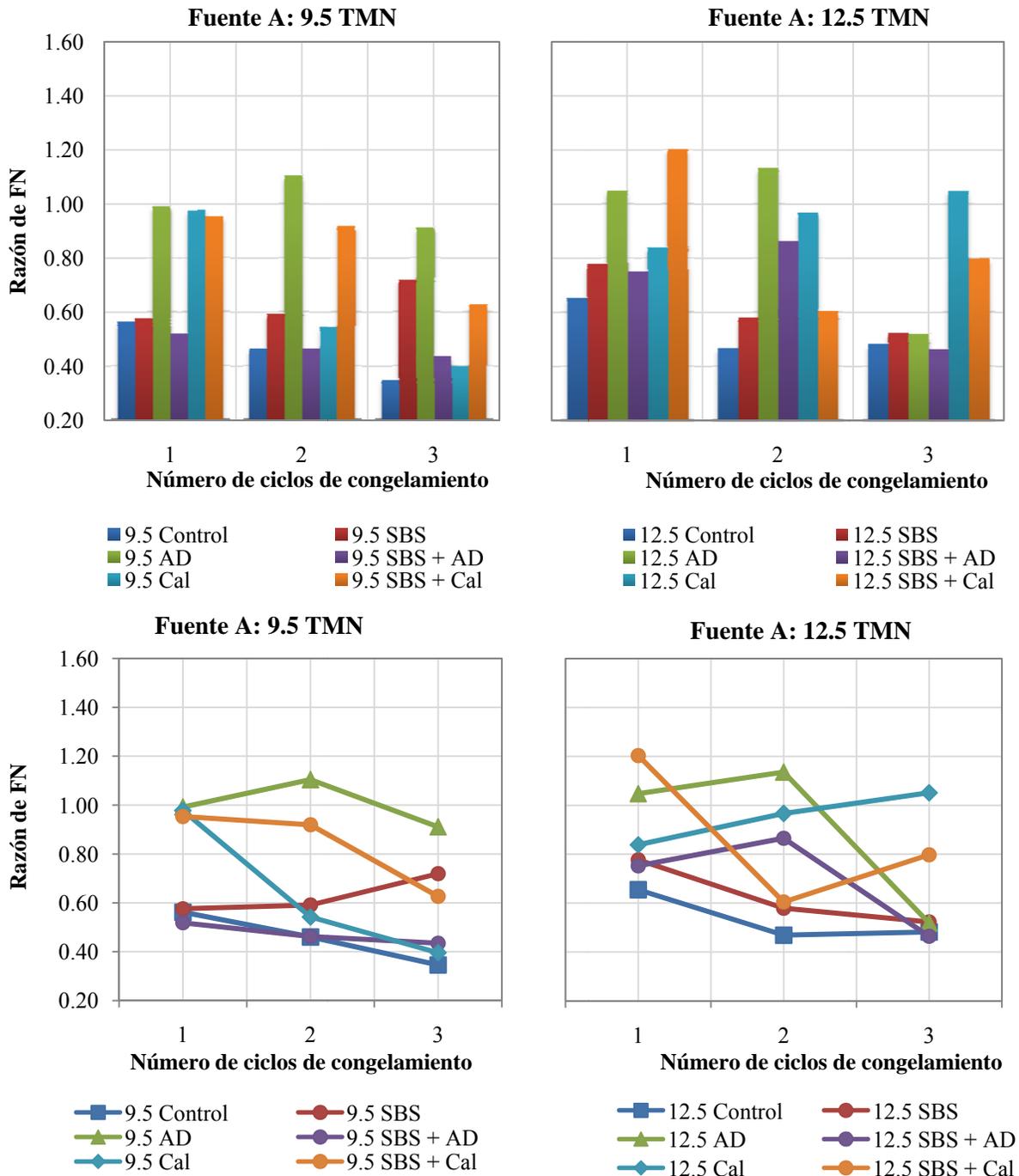


Figura 9. Resultados de Flow Number de la Fuente A



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.

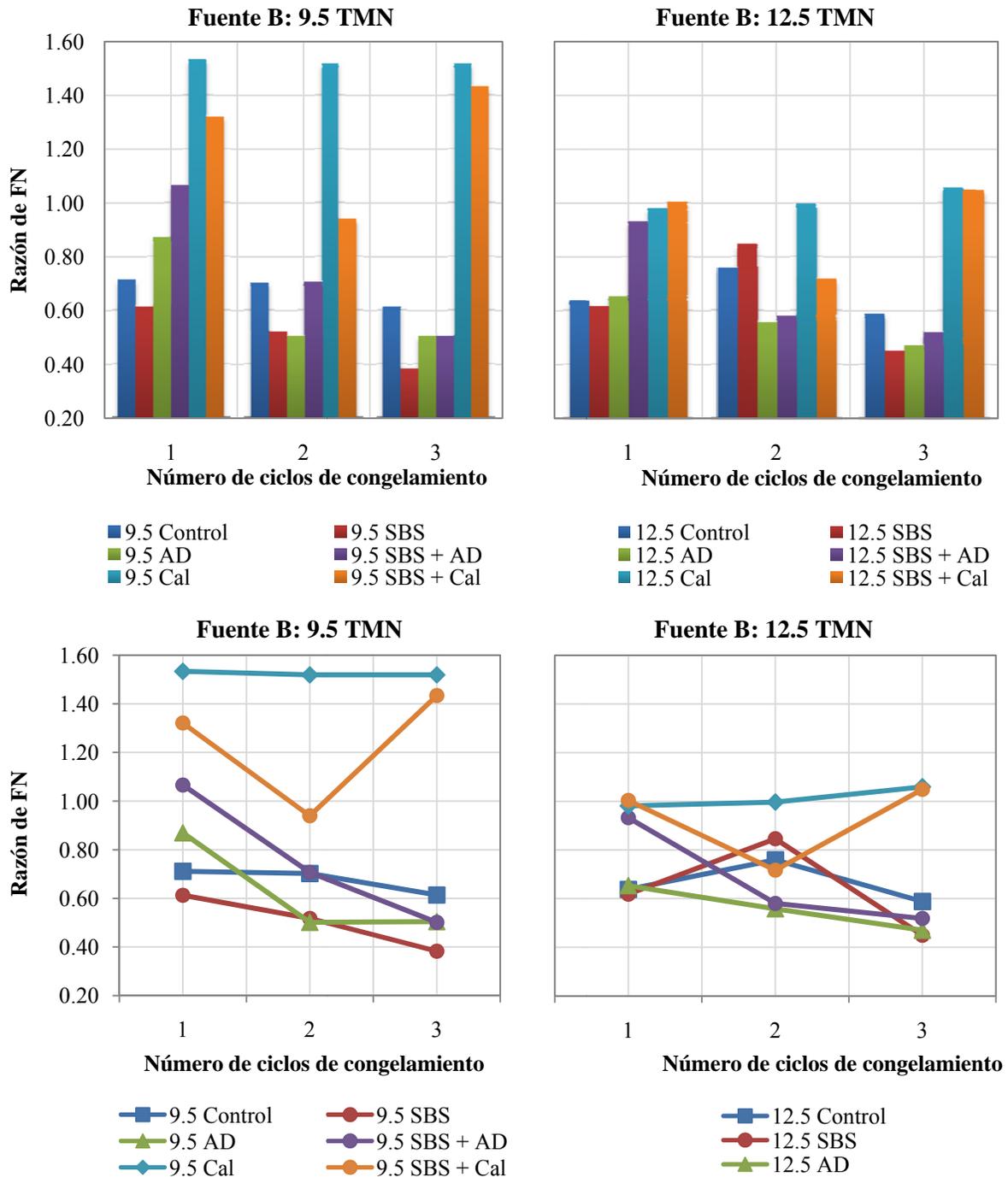


Figura 10. Resultados de Flow Number de la Fuente B



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**).

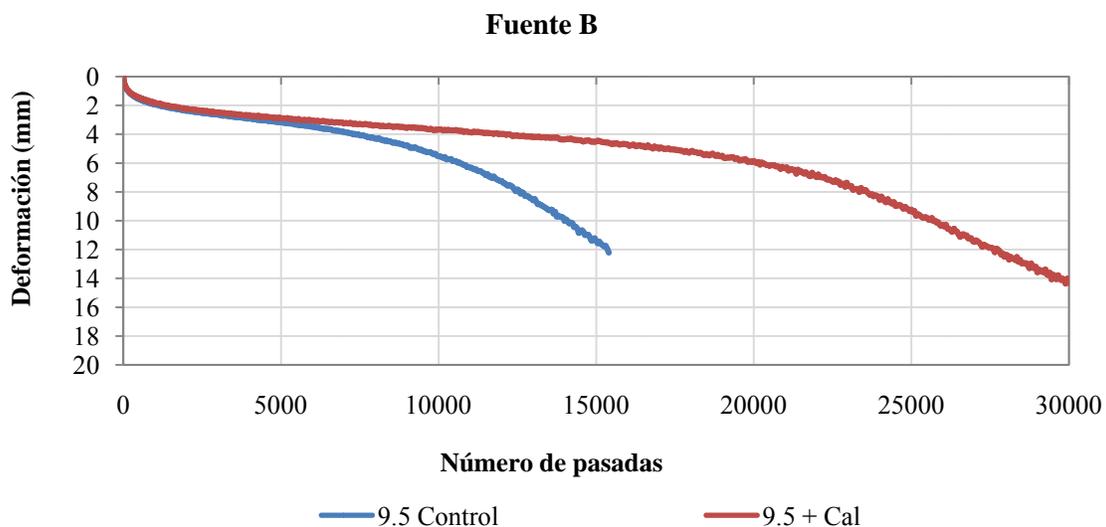


Figura 11. Resultados de Rueda de Hamburgo de la Fuente B



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.

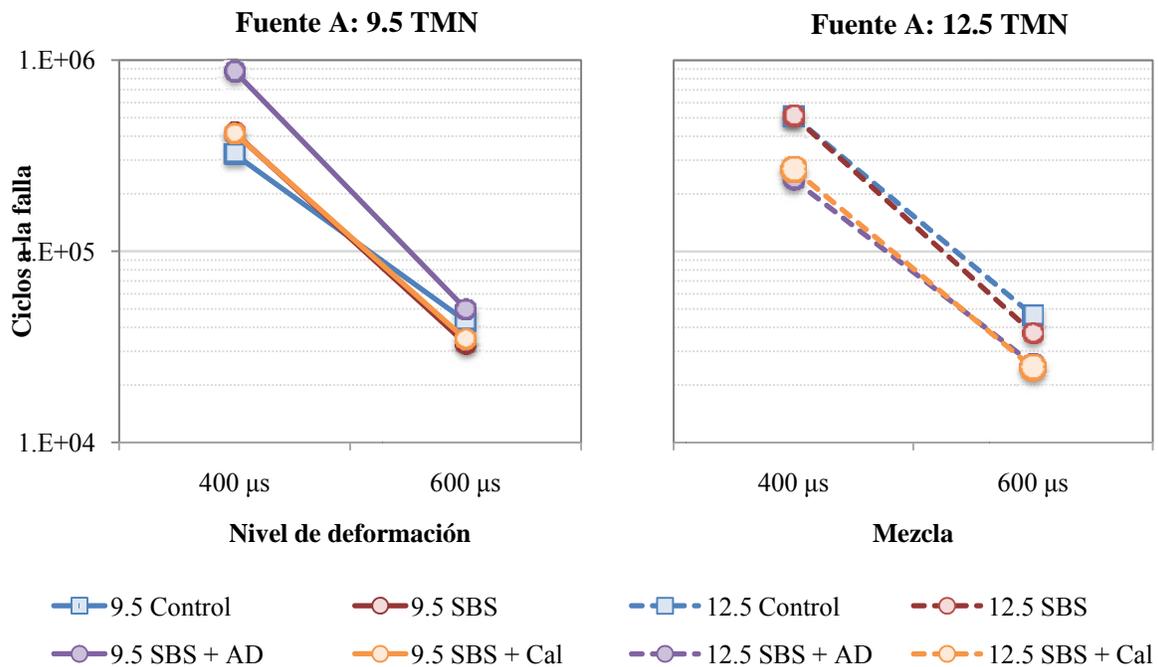


Figura 12. Resultados del ensayo de fatiga a deformación unitaria de 400 y 600 μ m

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.



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.