



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa De Infraestructura Del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-044-R5

DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Diciembre, 2018

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-R5		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas		4. Fecha del Informe Diciembre, 2018
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 la finalización de la primera etapa de proyecto.</i>		
6. Palabras clave Daño por humedad, mezcla asfáltica, desempeño	7. Nivel de seguridad: Ninguno	8. Núm. de páginas 69
10. Preparado por: Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos <hr/> Fecha: 05 / 12 / 18		
11. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos <hr/> Fecha: 05 / 12 / 18		12. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. CoordinadorGeneral PITRA <hr/> Fecha: 05 / 12 / 18



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 Objetivo General	9
1.2 Objetivos Específicos.....	9
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Mecanismos de Daño por Humedad	10
2.2 Factores que Afectan la Susceptibilidad al Daño por Humedad	10
2.2.1 Materiales y Diseño de Mezcla	11
2.2.2 Producción.....	14
2.2.3 Construcción.....	14
2.2.4 Clima	15
2.2.5 Otros Factores	15
2.3 Mecanismos de Falla de Daño por Humedad.....	16
2.4 Métodos de Ensayo para Evaluar el Daño por Humedad.....	16
2.4.1 Ensayo de Ebullición.....	18
2.4.2 Ensayo de Inmersión Estática.....	18
2.4.3 Ensayo de Adsorción Neta (NAT)	18
2.4.4 Ensayo de Inmersión-Compresión	18
2.4.5 Ensayo de Lottman.....	19
2.4.6 Ensayo de Lottman Modificado	19
2.4.7 Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo	20
2.5 Métodos para Prevenir el Daño por Humedad	21

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 3 de 69
---------------------------	--	----------------



2.5.1	Aditivos antidesnudantes líquidos.....	22
2.5.2	Cal	22
2.5.3	Modificación con polímeros.....	23
2.6	Propiedades fisicoquímicas	24
METODOLOGÍA Y ALCANCE.....		26
2.7	Selección de Materiales.....	26
2.8	Diseños de Mezcla	27
2.9	Ensayos de Laboratorio.....	27
2.9.1	Etapa I	27
2.9.2	Etapa II	28
3	RESULTADOS	28
3.1	Materiales	28
3.1.1	Agregados.....	28
3.1.2	Ligante asfáltico	31
3.2	Propiedades fisicoquímicas	33
3.3	Diseños de Mezcla	35
4	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	39
4.1	Módulo Dinámico	39
4.2	Resistencia Retenida a la Tensión Diametral	48
4.3	Flow Number.....	53
4.4	Síntesis de resultados	58
5	CONCLUSIONES.....	62
5.1	Fuentes de agregados	62
5.2	Tratamientos.....	63
5.3	Especificación actual.....	64

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 4 de 69
---------------------------	--	----------------



6	RECOMENDACIONES.....	65
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Propiedades físicas de los agregados y su efecto en el desnudamiento (11)	13
Figura 2.	Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (21)	21
Figura 3.	Medición de ángulos de contacto utilizando el goniómetro (40).....	24
Figura 4.	Esquemmatización de los parámetros W_{AB} y W_{wet} (40)	25
Figura 5.	Esquemmatización de los parámetros W_{AW} y W_{BW} (40)	26
Figura 6.	Ubicación de las fuentes de agregado del proyecto	28
Figura 7.	Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm	36
Figura 8.	Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm	36
Figura 9.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Barranca de TMN de 9.5 mm.....	40
Figura 10.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Barranca de TMN de 12.5 mm.	41
Figura 11.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Guápiles de TMN de 9.5 mm...	42
Figura 12.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Guápiles de TMN de 12.5 mm.	43
Figura 13.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Río Claro de TMN de 9.5 mm .	44
Figura 14.	Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Río Claro de TMN de 12.5 mm	45
Figura 15.	Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente A	46
Figura 16.	Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente B	47
Figura 17.	Resultados de razones de E^* a 20 ⁰ C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente C	47
Figura 18.	Resultados del ensayo de TSR (TMN 9.5 mm)	49
Figura 19.	Resultados del ensayo de TSR (TMN 12.5 mm)	50
Figura 20.	Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente A	51
Figura 21.	Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente B	52
Figura 22.	Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente C	52

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 5 de 69
---------------------------	--	----------------



Figura 23. Resultados del ensayo de FN (TMN 9.5 mm) 54

Figura 24. Resultados del ensayo de FN (TMN 12.5 mm) 55

Figura 25. Resultados de FN de la Fuente A..... 56

Figura 26. Resultados de FN de la Fuente B..... 57

Figura 27. Resultados de FN de la Fuente C..... 57

Figura 28. Resultados de razones de E^* a 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca, medidos a 20°C a 10 Hz..... 58

Figura 29. Resultados de razones de RRTD de 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca..... 59

Figura 30. Resultados de razones de FN de 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca..... 60

Figura 31. Promedios de las relaciones obtenidas por tipo de tratamiento 61

Figura 32. Promedio de resultados de Módulo Dinámico y Flow Number 62

Figura 33. Promedios de las relaciones obtenidas por tipo de tratamiento 64



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores que contribuyen a la formación de deterioros relacionados con la humedad (8)..	11
Tabla 2. Tipos de Mineral y su Relación con el Desnudamiento (11)	12
Tabla 3. Ensayos para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad.....	17
Tabla 4. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente A	29
Tabla 5. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente B	30
Tabla 6. Granulometrías, densidades brutas (Gbs) y aparentes (Gsa), y porcentaje de absorción de los apilamientos de la fuente C	31
Tabla 7. Propiedades del asfalto utilizado en las mezclas con las Fuentes A y B.....	32
Tabla 8. Propiedades del asfalto utilizado en la mezcla con la Fuente C.....	33
Tabla 9. Propiedades fisicoquímica de los agregados	34
Tabla 10. Curvas granulométricas de diseño.....	35
Tabla 11. Propiedades volumétricas de las mezclas diseñadas	38
Tabla 12. Ensayos de laboratorio de la Etapa I	39



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 la finalización de la primera etapa de proyecto.

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.

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.



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



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 - (Ca, Mg, Fe) $(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$ Hornablenda - $(\text{Ca, Na})_2$ $3(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_5$ $(\text{Al, Si})_8 - \text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 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).

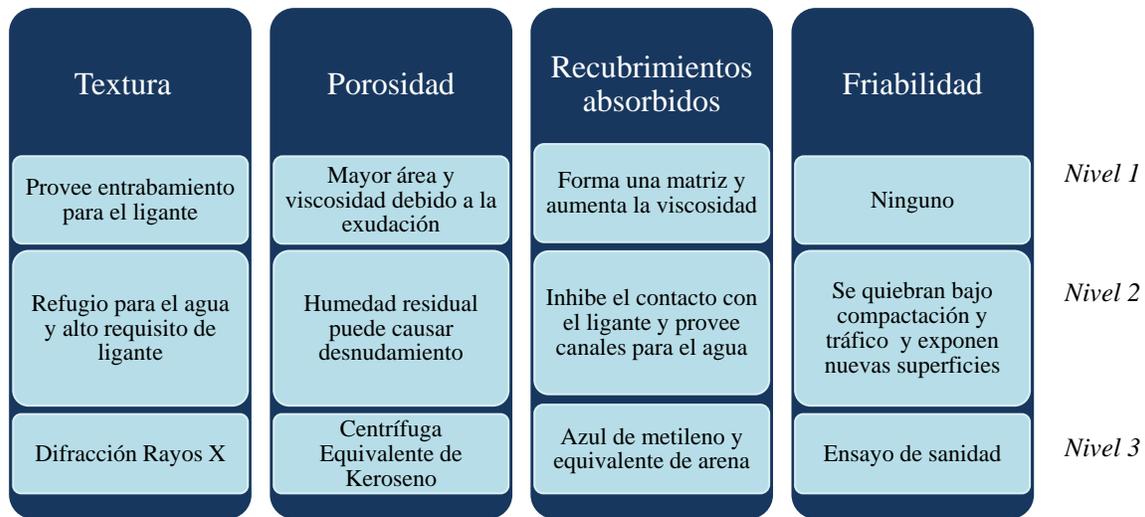


Figura 1. Propiedades físicas de los agregados y su efecto en el desnudamiento (11)

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 la 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 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).

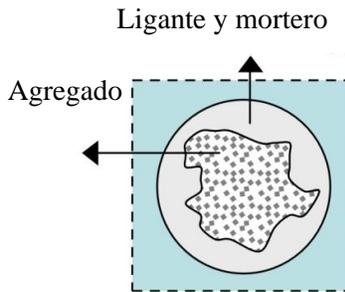
Las presiones y movimientos de agua debido al congelamiento y descongelamiento pueden romper la película de asfalto y causar desprendimiento. Grietas causadas por bajas temperaturas o esfuerzos de fatiga pueden promover el desnudamiento porque permiten la entrada de agua (12).

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).

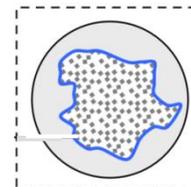
Al menos dos mecanismos (acumulación de presión de poro y socavación hidráulica) están asociados con el daño causado por las cargas cíclicas en el concreto asfáltico. Por lo tanto, se puede decir que en igualdad de condiciones de los demás factores, el incremento en las cargas de tráfico (en términos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

2.3 Mecanismos de Falla de Daño por Humedad

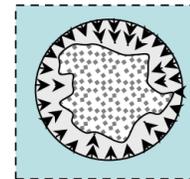


El análisis de los mecanismos de falla de daño por fatiga se desarrollan a partir de una partícula de agregado medianamente angular recubierta por una película de ligante y mortero asfáltico e inmersa en un medio de agua sometida a esfuerzos de succión, como consecuencia de un alto porcentaje de vacíos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

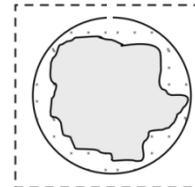
Desnudamiento: Consiste en la separación de la película de asfalto que recubre la superficie del agregado, definido como un proceso de naturaleza química y termodinámica (16).



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 (16, 17, 18 y 19).

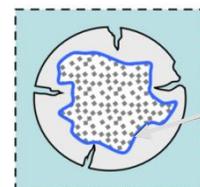


Degradación del mortero asfáltico: Proceso químico que ocurre posterior a otros eventos, en donde las capas superiores de la matriz asfáltica son sometidas a un proceso de lavado al estar expuestas a un flujo de agua constante. (15).



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 (16).

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

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 16 de 69
---------------------------	--	-----------------



dos categorías generales: 1) ensayos realizados en muestras sueltas y 2) ensayos realizados en especímenes compactados (21-23). 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

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 • Tunncliff-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 (21).

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 (21).

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 (24), 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 (25) 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 (26) 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.

2.4.4 Ensayo de Inmersión-Compresión

El procedimiento para este ensayo está descrito en la norma AASHTO T 165 (28), 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 (21).

2.4.5 Ensayo de Lottman

Este procedimiento fue desarrollado por Lottman bajo el proyecto NCHRP 246 (28). 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 16 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 (30) 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 (21).

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 (31) 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**

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.

Aschenbrener (32) 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.

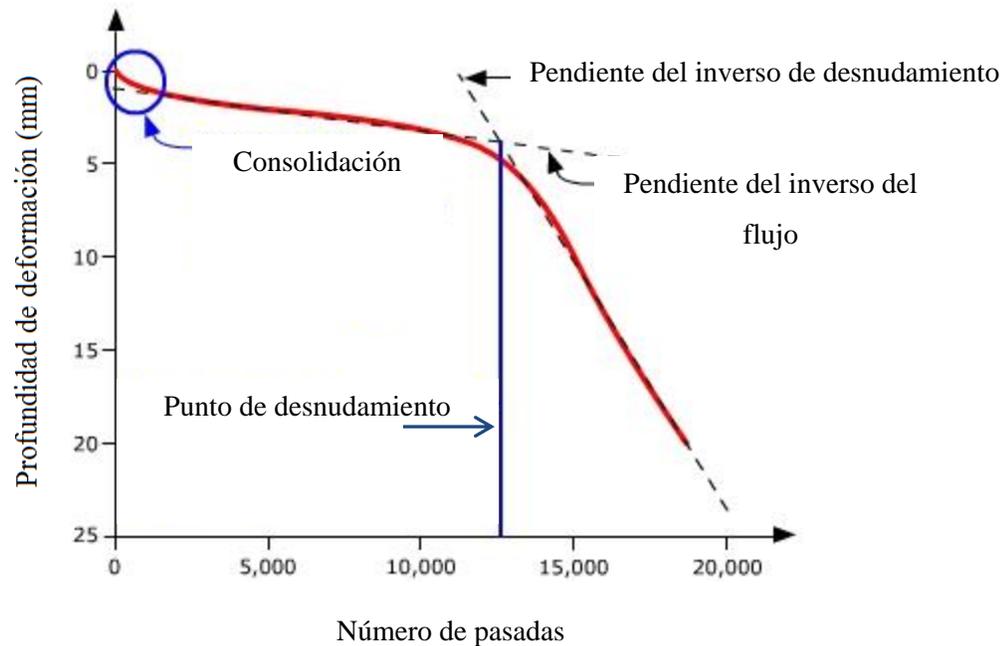


Figura 2. Resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo (21)

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. (34).

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 (20). 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 (34).

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 (20, 34).

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 (20).

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 (20):

- 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 al 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 (34,35).

Además de proporcionar beneficios como antidesnudante, el uso de la cal también presenta otras ventajas (36):

- 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.

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 (37). 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 (38).

2.6 Propiedades fisicoquímicas

La energía superficial corresponde a una propiedad inherente de todos los materiales la cual es definida a partir de la naturaleza y magnitud de las interacciones que ocurren a nivel superficial (40). Para efectos del proyecto se reportan parámetros que definen la interacción entre las diferentes combinaciones de asfalto y agregado y su afinidad con el agua.

Las mediciones de energía superficial reportadas en el proyecto se desarrollan utilizando el goniómetro. La técnica consiste en la medición del ángulo de contacto entre una superficie lisa de agregado y el ligante y diferentes materiales patrón. La Figura 3 presenta una imagen del ensayo.



Figura 3. Medición de ángulos de contacto utilizando el goniómetro (40)

Los resultados del ensayo permiten obtener indicadores del potencial de susceptibilidad al daño por humedad, tales como el Parámetro de Razón de Energía (ERP) (41), el cual es usualmente definido por dos relaciones:

$$ERP_1 = \left| \frac{W_{AB} - W_{BB}}{W_{WET}} \right| \quad \text{Ec. 2-1}$$

$$ERP_2 = \left| \frac{W_{AB}}{W_{WET}} \right| \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde:

W_{AB} : Interacción Asfalto – Agregado

W_{BB} : Cohesión interna del asfalto

W_{wet} : Trabajo de debonding

De acuerdo a los planteamientos de Bhasin, Little, Vasconcelos y Masad (2007) una buena compatibilidad asfalto agregado se refleja en altos índices de ERP_1 y ERP_2 . De lo anterior se difiere que una alta compatibilidad en entre el ligante y el agregado se asocia a un buen desempeño al daño por humedad. Por otro lado, conforme mayor sea el parámetro de W_{WET} , mayor es la será la energía requerida para desplazar la película de agua presente entre el agregado y el asfalto, y en consecuencia mayor susceptibilidad al daño por humedad. Los parámetros anteriores se esquematizan en la **Figura 4**.



Figura 4. Esquematización de los parámetros W_{AB} y W_{wet} (40)

Existen otros indicadores medidos a partir del mismo ensayo de goniometría, tales como la interacción agua-agregado (W_{AW}) y la interacción agua asfalto (W_{BW}), según se muestran en la **Figura 5**. Ambos casos representan la compatibilidad del agregado y el asfalto con el agua, de modo que bajos índices de W_{AW} y W_{BW} se traducen en una mayor resistencia al daño por humedad.



Figura 5. Esquematación de los parámetros W_{AW} y W_{BW} (40)

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.

2.7 Selección de Materiales

El proyecto abarca tres fuentes de agregado con diferentes orígenes geológicos y propiedades físicas que históricamente hayan presentado diferentes niveles de resistencia al daño por humedad en campo. Estas corresponden a Barranca, Guápiles y Río Claro, para cada fuente se realizaron diseños de mezcla volumétricos Superpave para dos granulometrías variando el tamaño máximo nominal del agregado (TMN), correspondientes a 12.5 y 9.5 mm.

Respecto al ligante asfáltico se utiliza el asfalto convencional importado a Costa Rica. Actualmente se reportan dos asfaltos muestreados en diferentes periodos de tiempo en el transcurso del proyecto.

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



2.8 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, el 1% corresponde a un porcentaje sobre el peso del agregado seco.

2.9 Ensayos de Laboratorio

Las combinaciones descritas en el Apartado 2.8 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:

2.9.1 Etapa I

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

- ❖ AASHTO T 283, Resistencia Retenida a Tensión Diametral en la condición seca para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP 79, Módulo Dinámico en la condición seca para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.
- ❖ AASHTO TP 79, Flow Number en la condición seca para 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

Cada ciclo de acondicionamiento involucra someter al espécimen a un mínimo de 16 horas a -18°C seguido por un baño a 60°C durante 24 horas.



2.9.2 Etapa 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

Los siguientes resultados responden al cumplimiento de la Etapa I del proyecto.

3.1 Materiales

3.1.1 Agregados

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

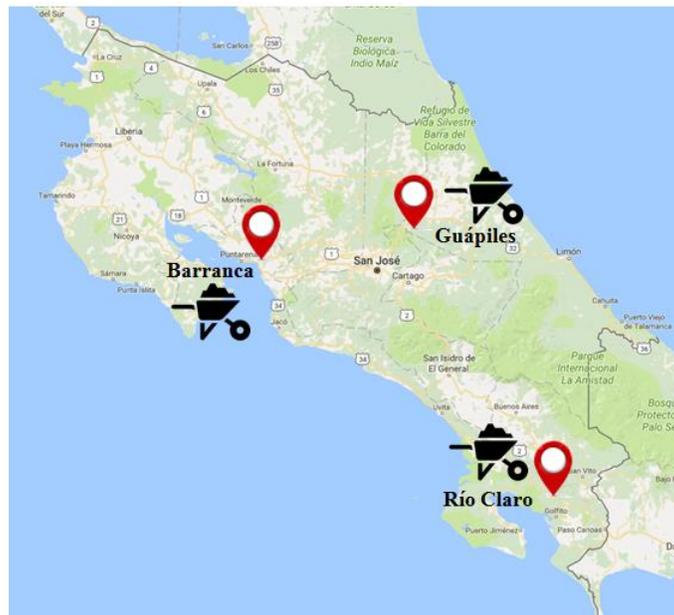


Figura 6.Ubicación de las fuentes de agregado del proyecto



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 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"	100.0	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
Gbs	2.63	2.65	2.51	2.63
Gsa	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 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	4.45	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 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	2.93
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
Gbs	2.49	2.61	2.60	2.64
Gsa	2.72	2.73	2.72	2.73
% Abs	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 7.



Tabla 7. Propiedades del asfalto utilizado en las mezclas con las Fuentes A y B

Propiedad	Original	Original + 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 kPa} - J _{NR@.01 kPa})/J _{NR@0.1kPa}	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 las 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 8**.



Tabla 8. Propiedades del asfalto utilizado en la mezcla con la Fuente C

Propiedad	Original	Original + 2% SBS	Original + 0.5% Antidesnudante	Original + 2% SBS+ 0.5% 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 (Temp. superior)	2.1	4.25	2.3	2.95
J _{NR} @ 3.2 kPa (Temp. superior)	2.3	4.95	2.5	3.45
(J _{NR@3.2 kPa} - J _{NR@0.1 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 Propiedades fisicoquímicas

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los materiales de acuerdo a las mediciones de energía superficial mediante el método de goniometría se adjuntan en la siguiente **Tabla 9**.



Tabla 9. Propiedades fisicoquímica de los agregados

Fuente	Tratamientos	W _{BB}	W _{AB}	W _{wet}	W _{AW}	W _{BW}	ER ₁	ER ₂
A Barranca	Control	24.25	36.60	28.36	92.31	61.58	1.29	0.44
	2% SBS + 0.5% ADL	32.14	39.64	40.51		52.47	0.98	0.19
	2% SBS	34.09	40.63	36.36		57.62	1.12	0.18
	0.5% ADL	34.12	39.84	39.56		53.62	1.01	0.14
	1% Cal	30.56	40.33	31.70		61.98	1.27	0.31
	2% SBS + 1% Cal	29.77	40.50	27.19		66.65	1.49	0.39
B Guápiles	Control	24.25	27.12	45.02	66.18	61.58	0.60	0.06
	2% SBS + 0.5% ADL	32.14	26.57	53.58		52.47	0.50	0.10
	2% SBS	34.09	28.04	49.90		57.62	0.56	0.12
	0.5% ADL	34.12	26.91	52.77		53.62	0.51	0.14
	1% Cal	30.56	28.78	46.28		61.98	0.62	0.04
	2% SBS + 1% Cal	29.77	29.80	42.63		66.65	0.70	0.00
C Río Claro	Control	33.81	49.84	37.82	103.61	54.01	1.32	0.42
	2% SBS + 0.5% ADL	32.76	50.13	35.46		56.66	1.41	0.49
	2% SBS	28.78	48.55	31.31		59.24	1.55	0.63
	0.5% ADL	31.03	50.52	30.14		62.38	1.68	0.65
	1% Cal	37.43	49.39	41.99		49.39	1.18	0.28
	2% SBS + 1% Cal	38.44	50.10	42.08		50.01	1.19	0.28



3.3 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 36 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 7** y la **Figura 8** 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 10**.

Tabla 10.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

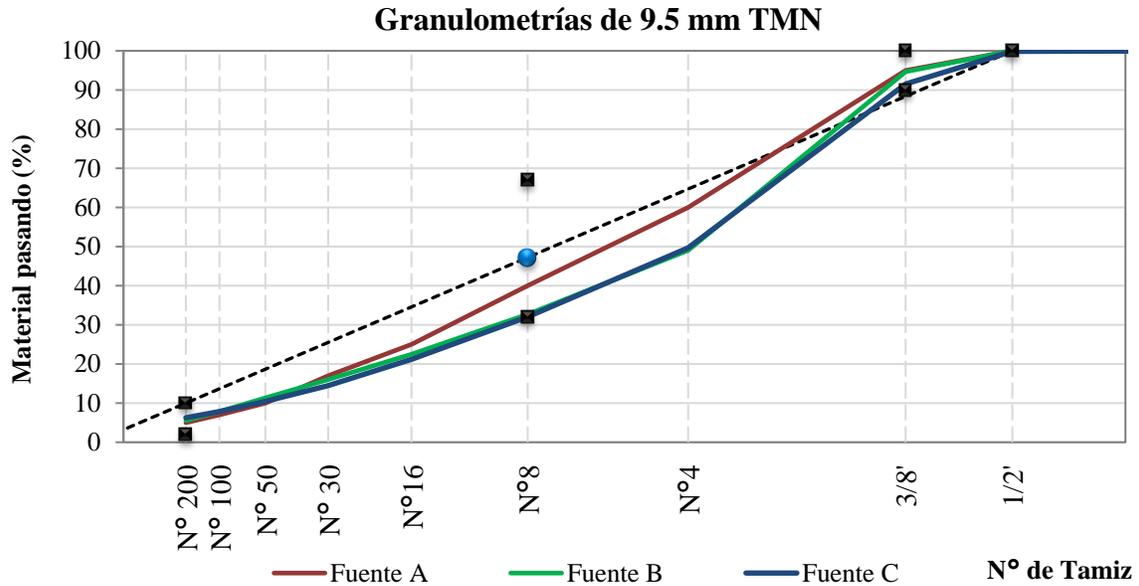


Figura 7. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 9.5 mm

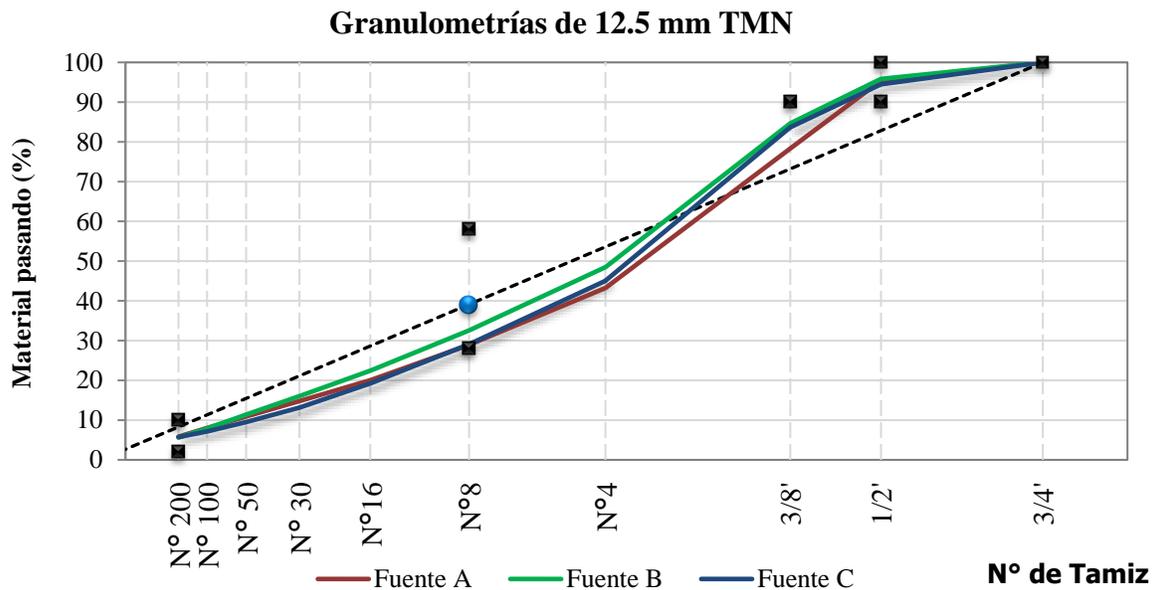


Figura 8. Configuraciones granulométricas de diseño de mezclas de TMN de 12.5 mm



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 11** muestra las propiedades volumétricas de la totalidad de las mezclas diseñadas.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 37 de 69
---------------------------	--	-----------------



Tabla 11. 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	6.0	14.1	71.7	1.4
	9.5 SBS+Cal	6.0	14.4	72.3	1.4
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	6.2	15.0	73.6	1.2
	12.5 SBS+Cal	5.9	14.4	72.3	1.3



4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Tras la conclusión de la Etapa I del esquema experimental se han completado los siguientes ensayos de laboratorio.

Tabla 12. Ensayos de laboratorio de la Etapa I

Procedimiento de laboratorio	Cantidad de ensayos
Diseño de mezcla Superpave	36
Módulo Dinámico	144
Resistencia Retenida a la Tensión Diametral	144
Flow Number	144

4.1 Módulo Dinámico

Los resultados del ensayo de módulo dinámico se sintetizan a partir de las curvas maestras para cada condición.

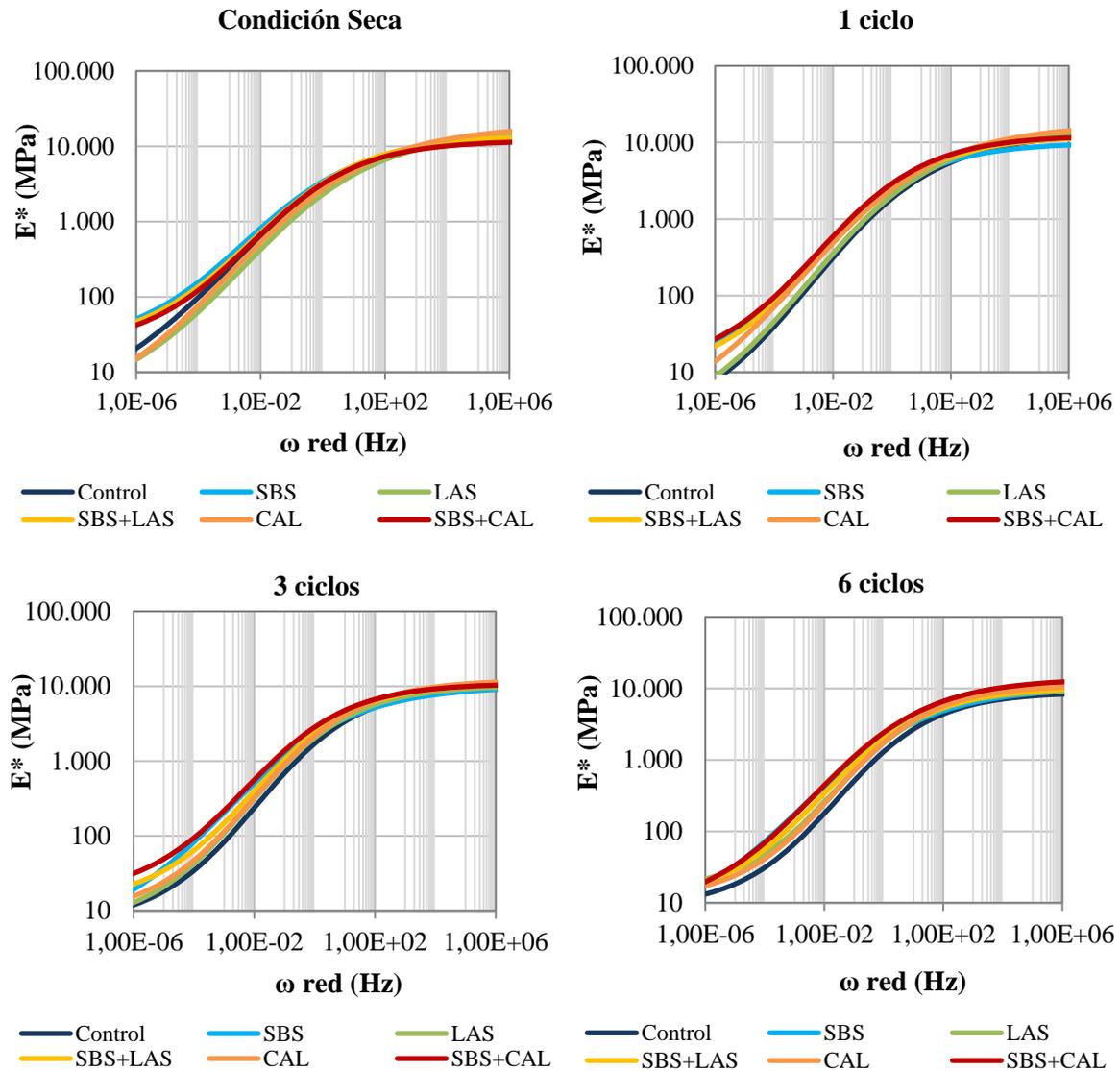


Figura 9. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Barranca de TMN de 9.5 mm

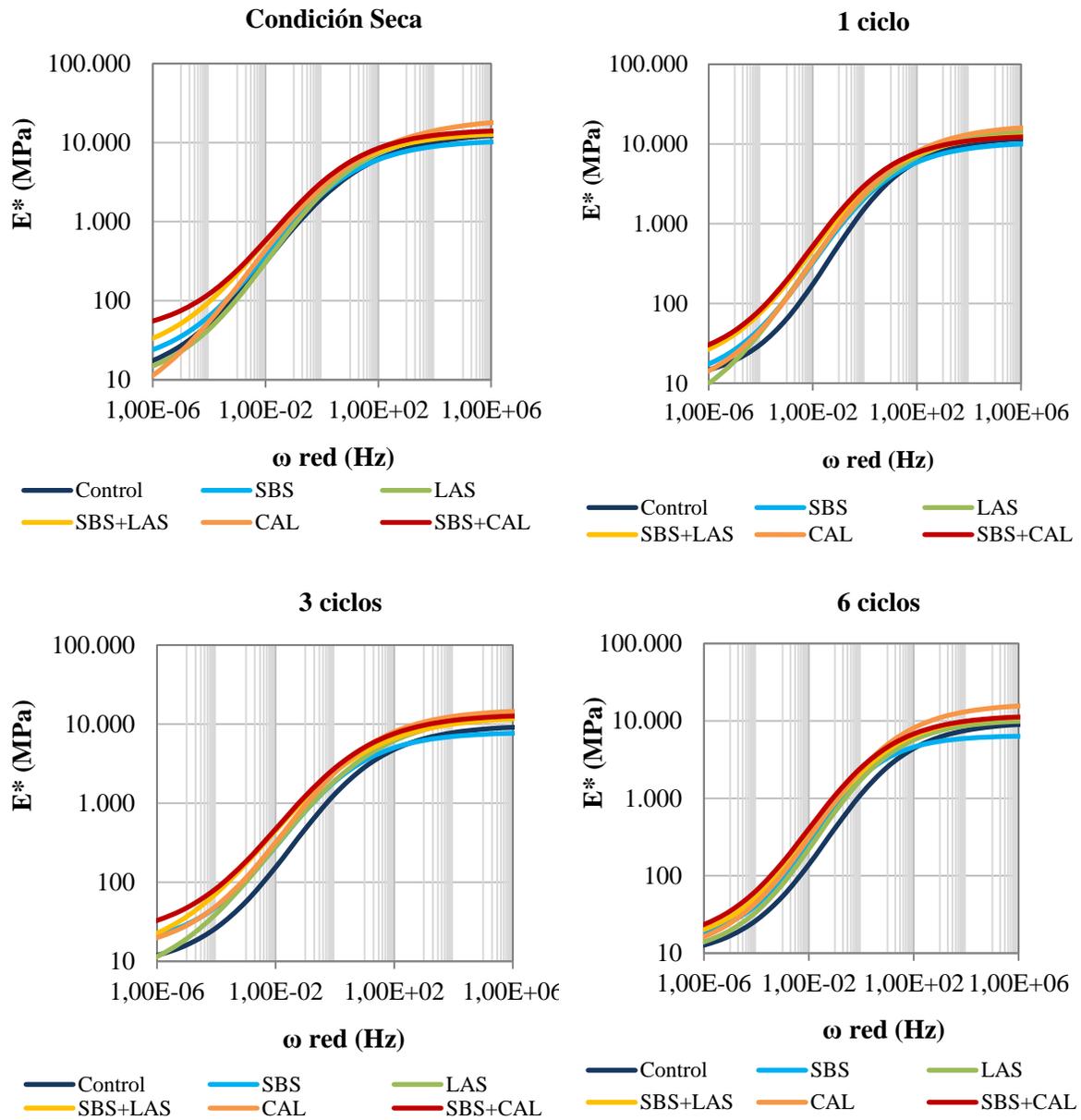


Figura 10. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Barranca de TMN de 12.5 mm

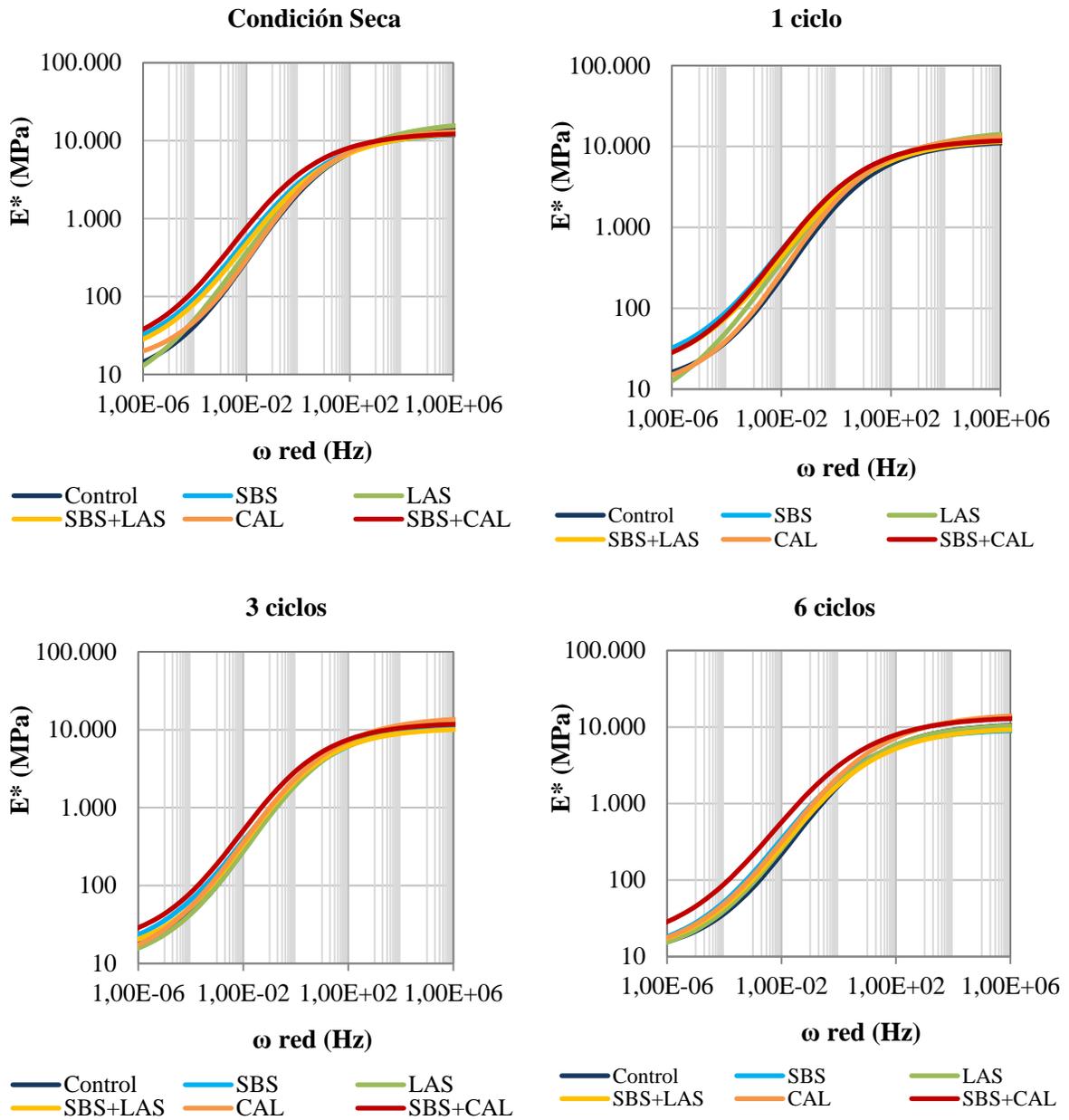


Figura 11. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Guápiles de TMN de 9.5 mm

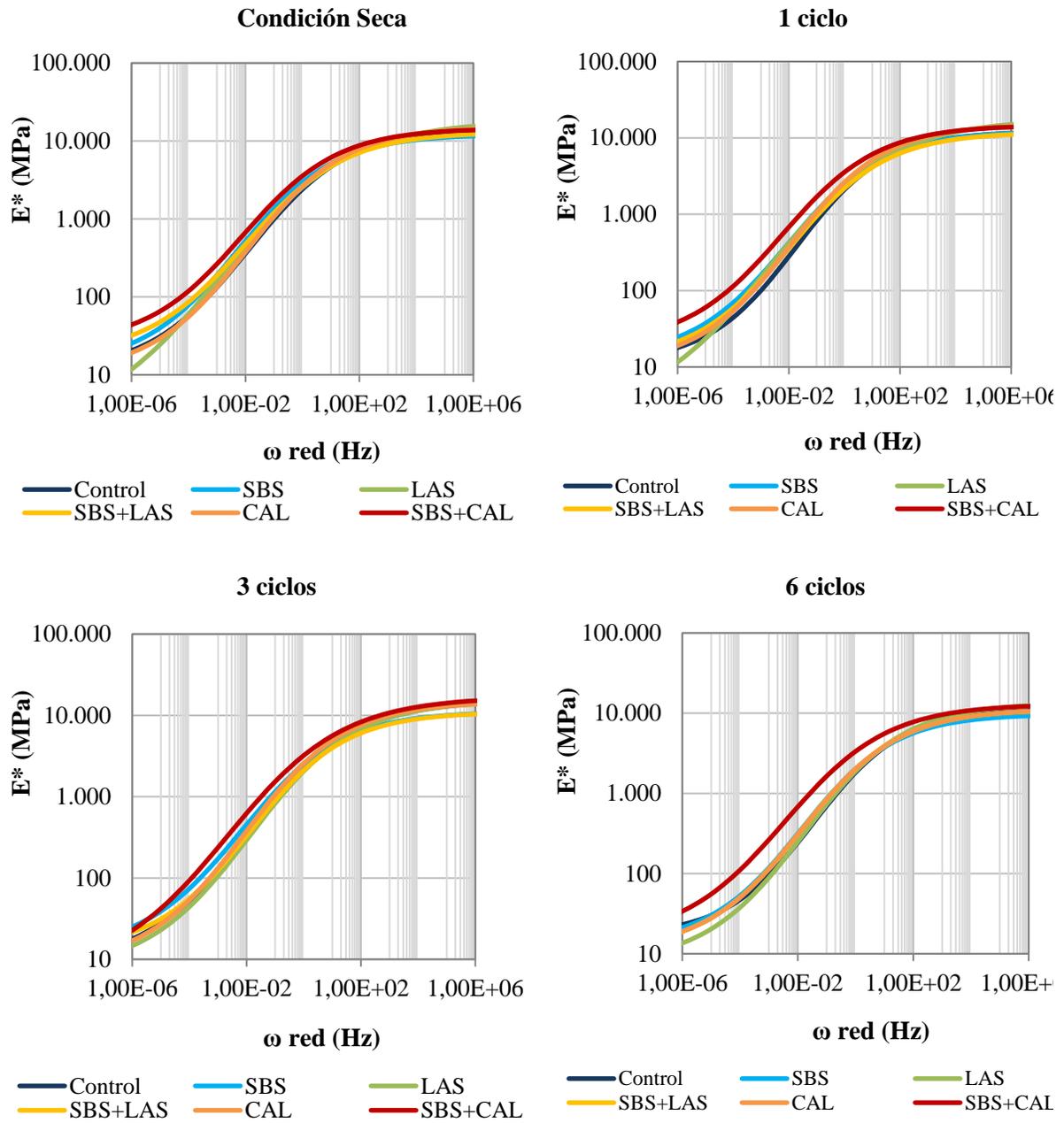


Figura 12. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Guápiles de TMN de 12.5 mm

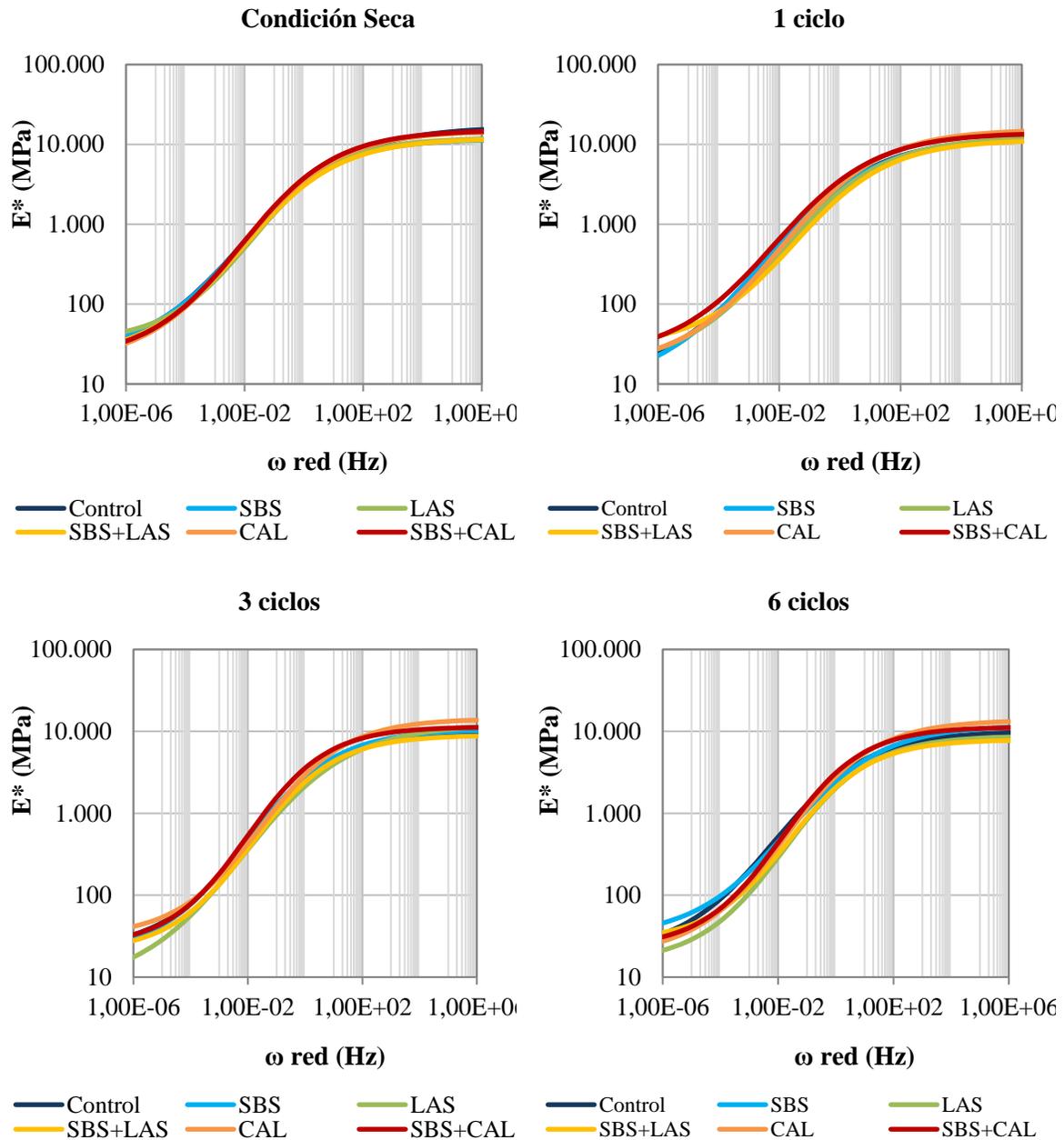


Figura 13. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Río Claro de TMN de 9.5 mm

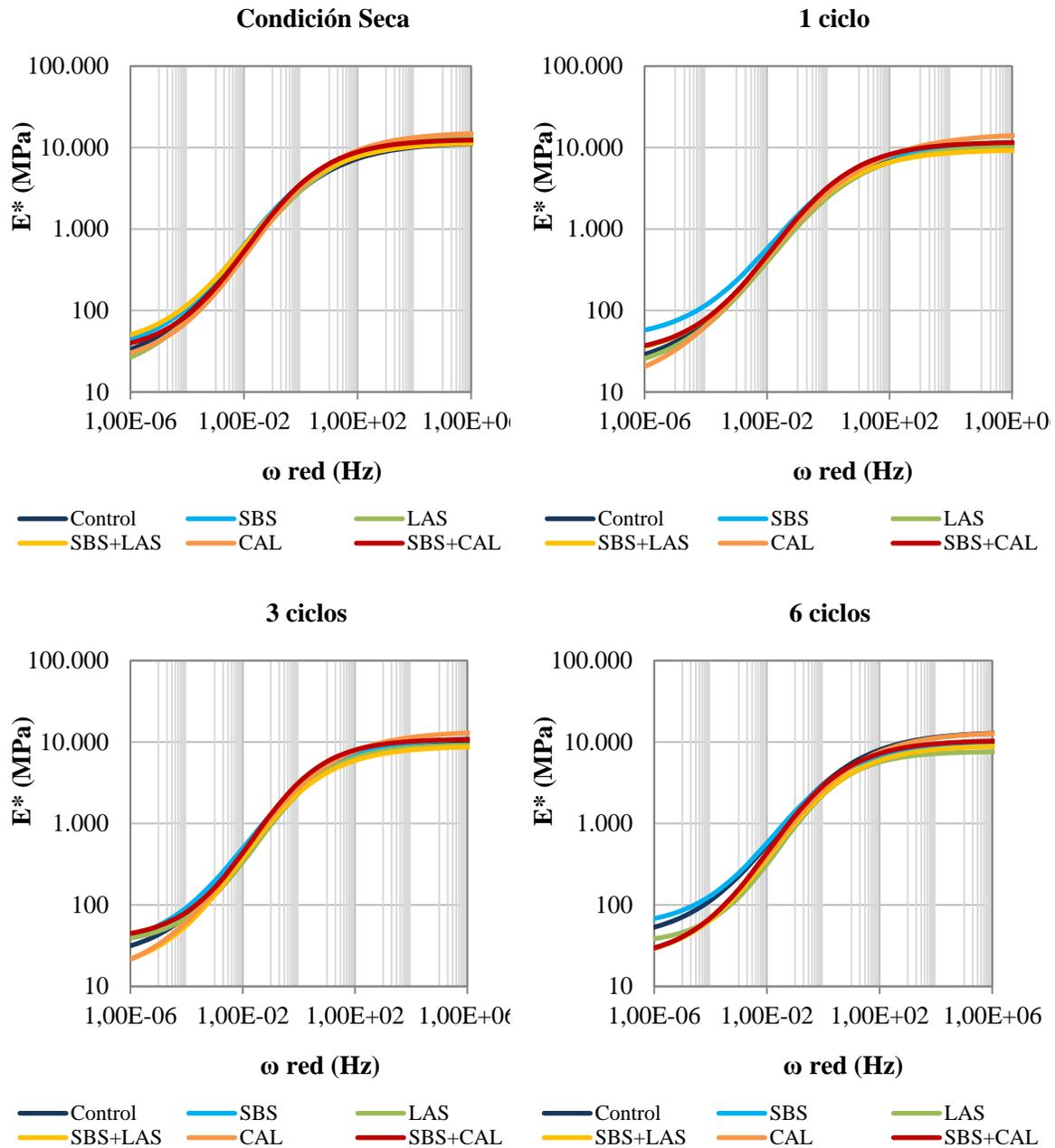


Figura 14. Curvas maestras de módulo dinámico de la mezcla de Río Claro de TMN de 12.5 mm

Los resultados del ensayo de módulo dinámico que se muestran a continuación presentan 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 (condiciones típicas de operación), y el número de ciclos n corresponde a 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento.

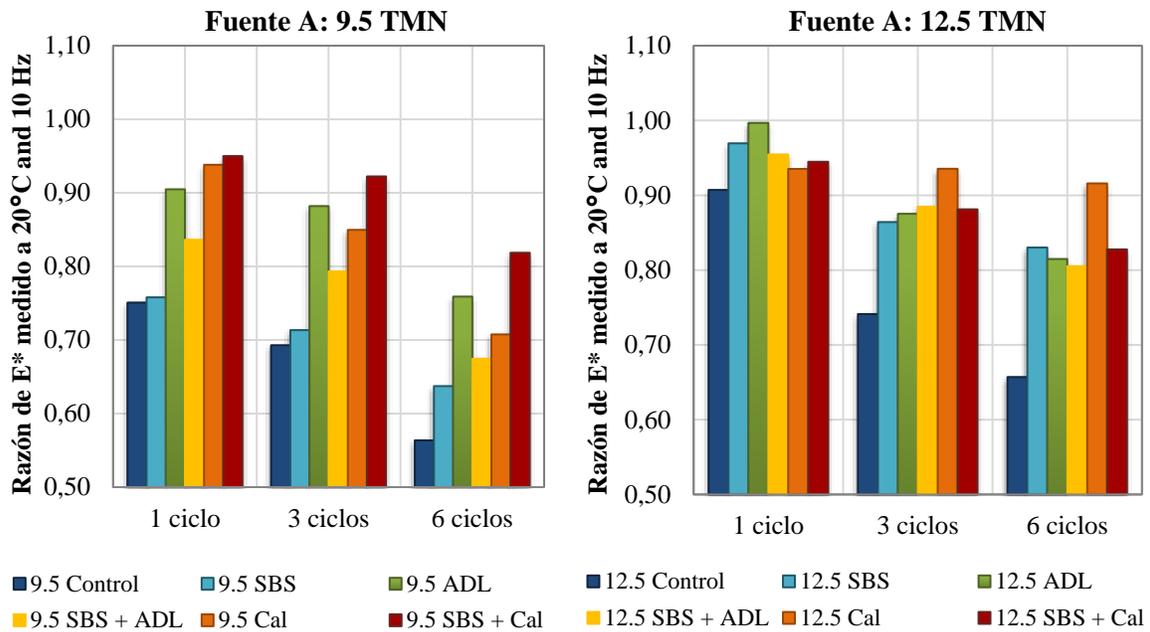


Figura 15. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente A

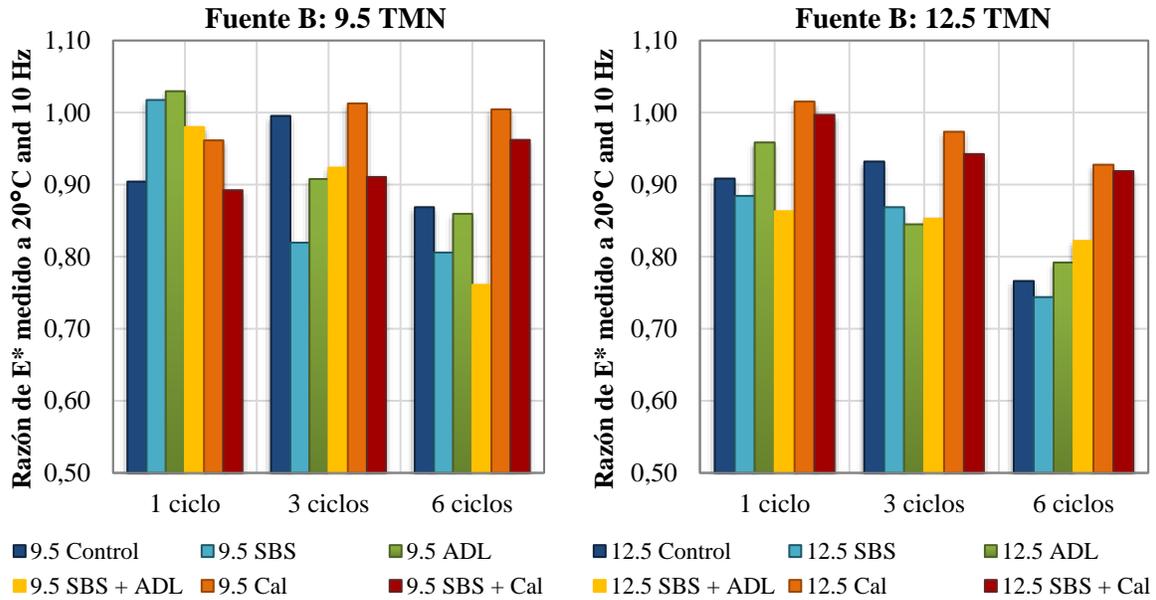


Figura 16. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente B

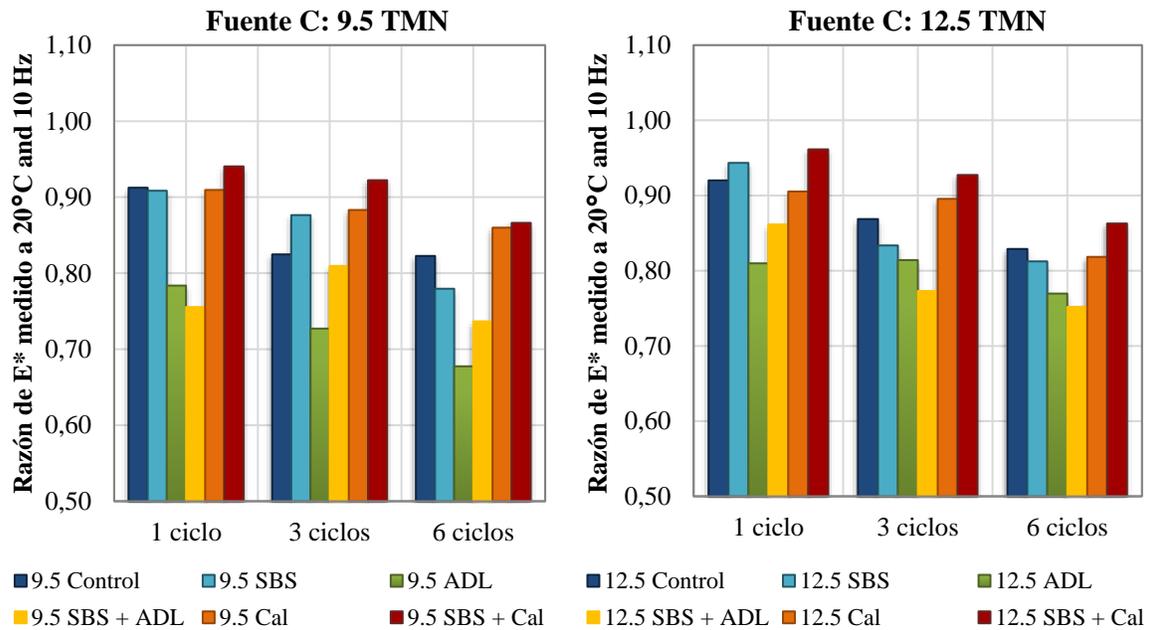


Figura 17. Resultados de razones de E^* a 20°C a 10 Hz respecto a ciclos de acondicionamiento de la Fuente C



En el caso de la Fuente A, para las mezclas de TMN de 9.5 mm el mejor desempeño al daño por humedad se obtuvo para el tratamiento producto de la combinación de 2% SBS y 1% de cal. Por su parte, en las mezclas de 12.5 mm de TMN, los mejores índices se obtienen para las mezclas modificadas con cal. Los resultados obtenidos para la Fuente B para ambas configuraciones granulométricas muestran los mejores índices para las mezclas que contienen cal. Por su parte, los resultados obtenidos para la Fuente C revelan el mejor desempeño en las mezclas que contienen la combinación del polímero SBS y la cal como agente antidesnudante.

A nivel general, el mejor desempeño se alcanza en mezclas con contenidos de cal. La adición del polímero SBS sumado a la adición de cal revela diferentes efectos en función del tipo de fuente.

4.2 Resistencia Retenida a la Tensión Diametral

La **Figura 18** y la **Figura 19** presentan un resumen de los resultados obtenidos del ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta obtenidos para la condición seca, 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento, para las granulometrías de 9.5 y 12.5 mm respectivamente.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 48 de 69
---------------------------	--	-----------------

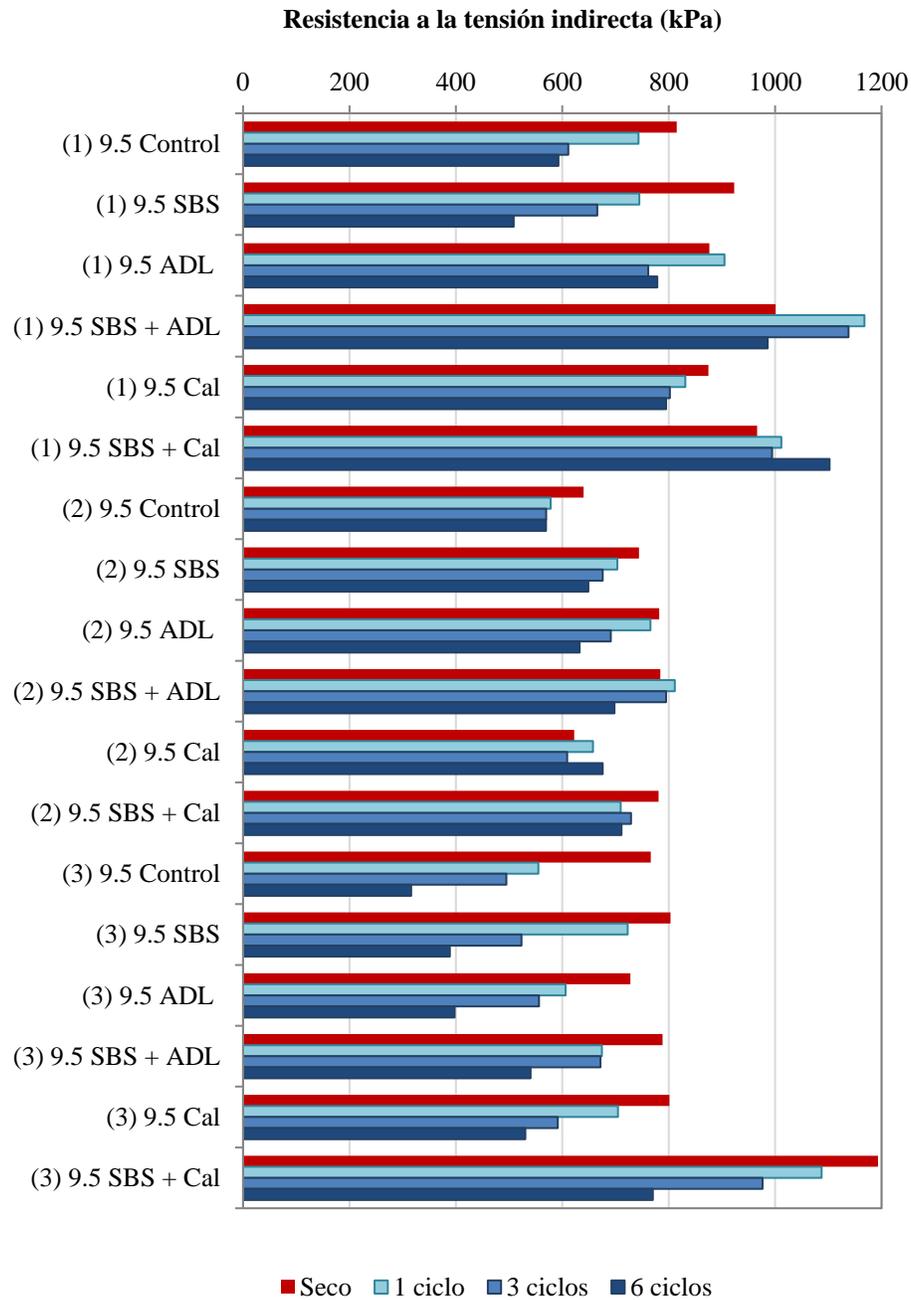


Figura 18. Resultados del ensayo de TSR (TMN 9.5 mm)

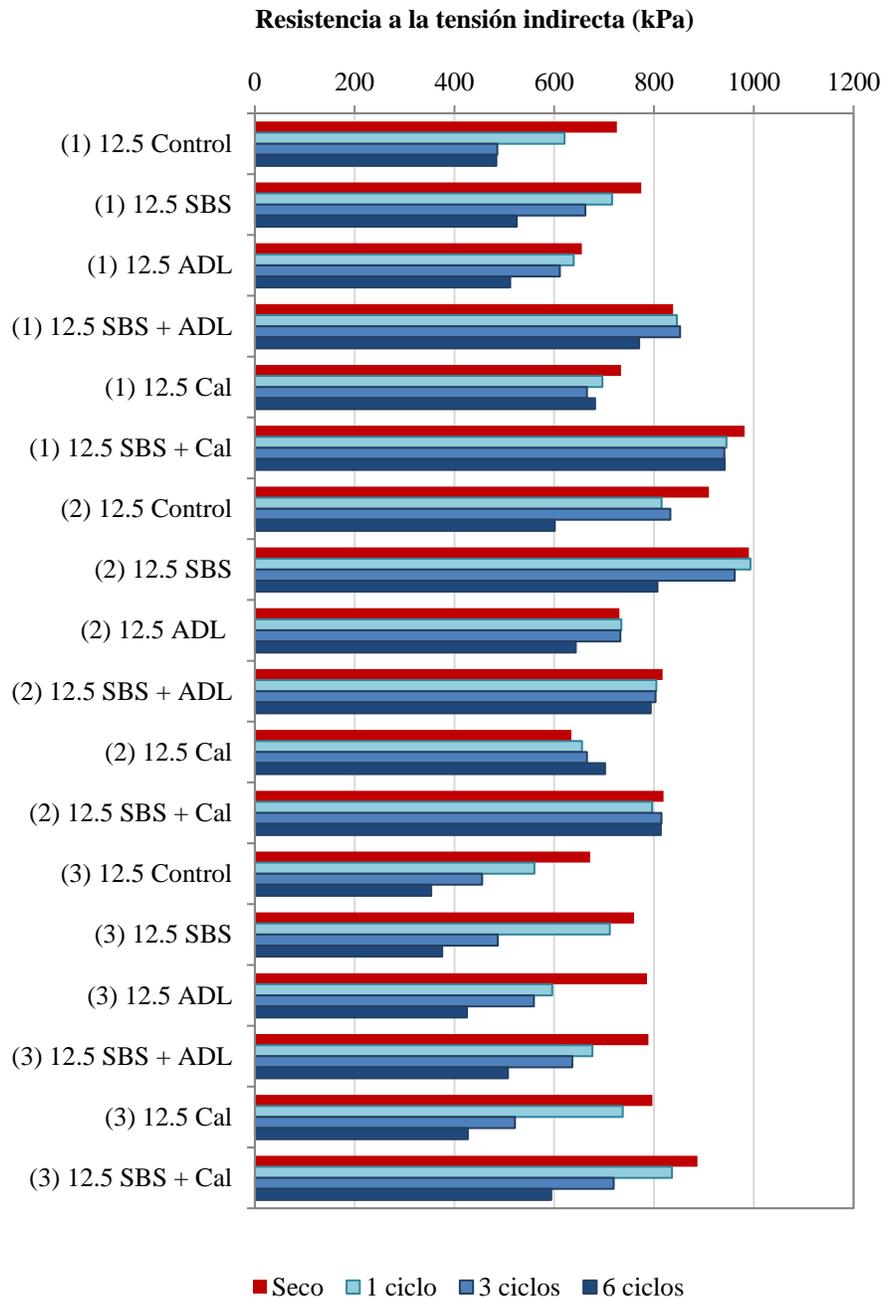


Figura 19. Resultados del ensayo de TSR (TMN 12.5 mm)



En ambas configuraciones granulométricas se identifica que las mayores magnitudes en el parámetro TSR se obtienen para las mezclas que contienen el polímero SBS. Por otro lado, con el objetivo de evaluar la susceptibilidad al daño por humedad se obtiene la relación RRTD definida por la siguiente expresión:

$$RRTD = \frac{TSR_{n \text{ ciclos de hielo y deshielo}}}{TSR_{sin \text{ acondicionar}}}$$

Los valores de RRTD obtenidos en función de número de ciclos de hielo y deshielo se presentan a continuación.

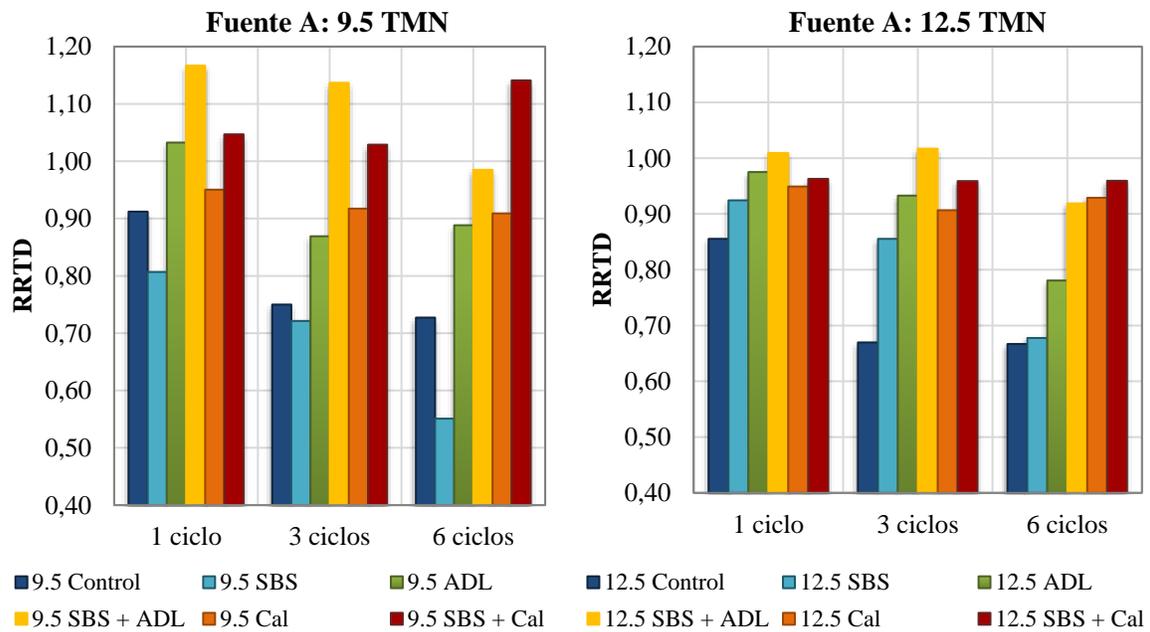


Figura 20. Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente A

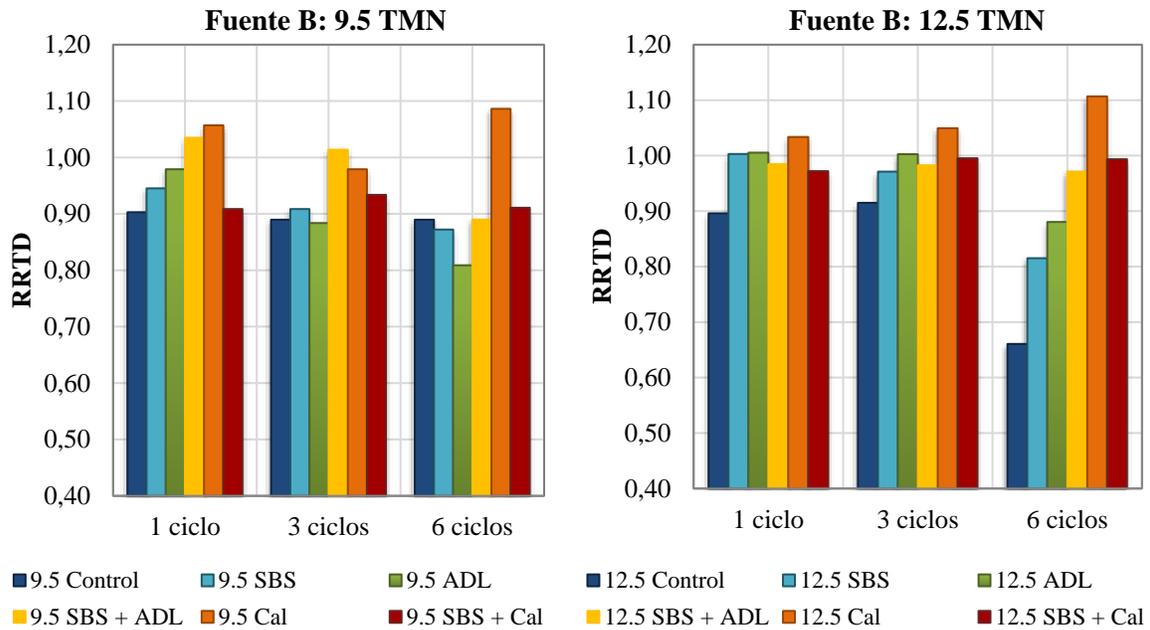


Figura 21. Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente B

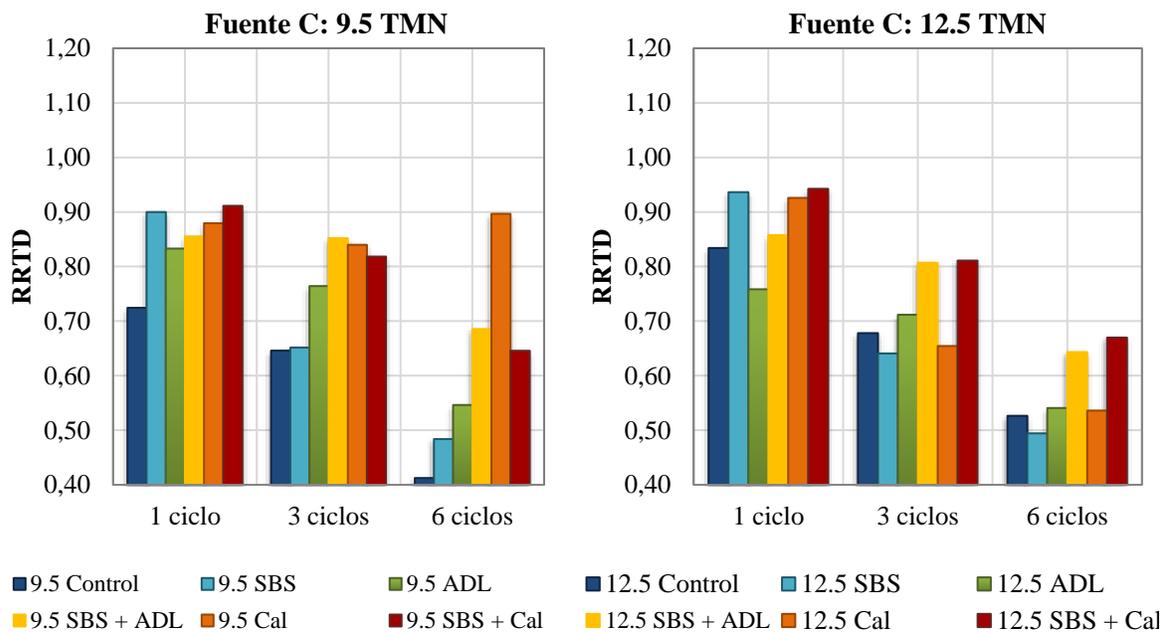


Figura 22. Resultados del ensayo de RRTD de la Fuente C



Los mayores índices se identifican para la Fuente A, mientras que las relaciones más bajas se asocian con la Fuente C. En todas las mezclas se evidencia una caída de resistencia pronunciada que ocurre a los 6 ciclos de hielo y deshielo, correspondiente a la condición más crítica.

4.3 Flow Number

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos del ensayo de Flow Number obtenidos para la condición seca, 1, 3 y 6 ciclos de acondicionamiento, de forma análoga a lo presentado anteriormente.

REPORTE: LM-PI-UMP-044-R5	Fecha de emisión: 5 de diciembre de 2018	Página 53 de 69
---------------------------	--	-----------------

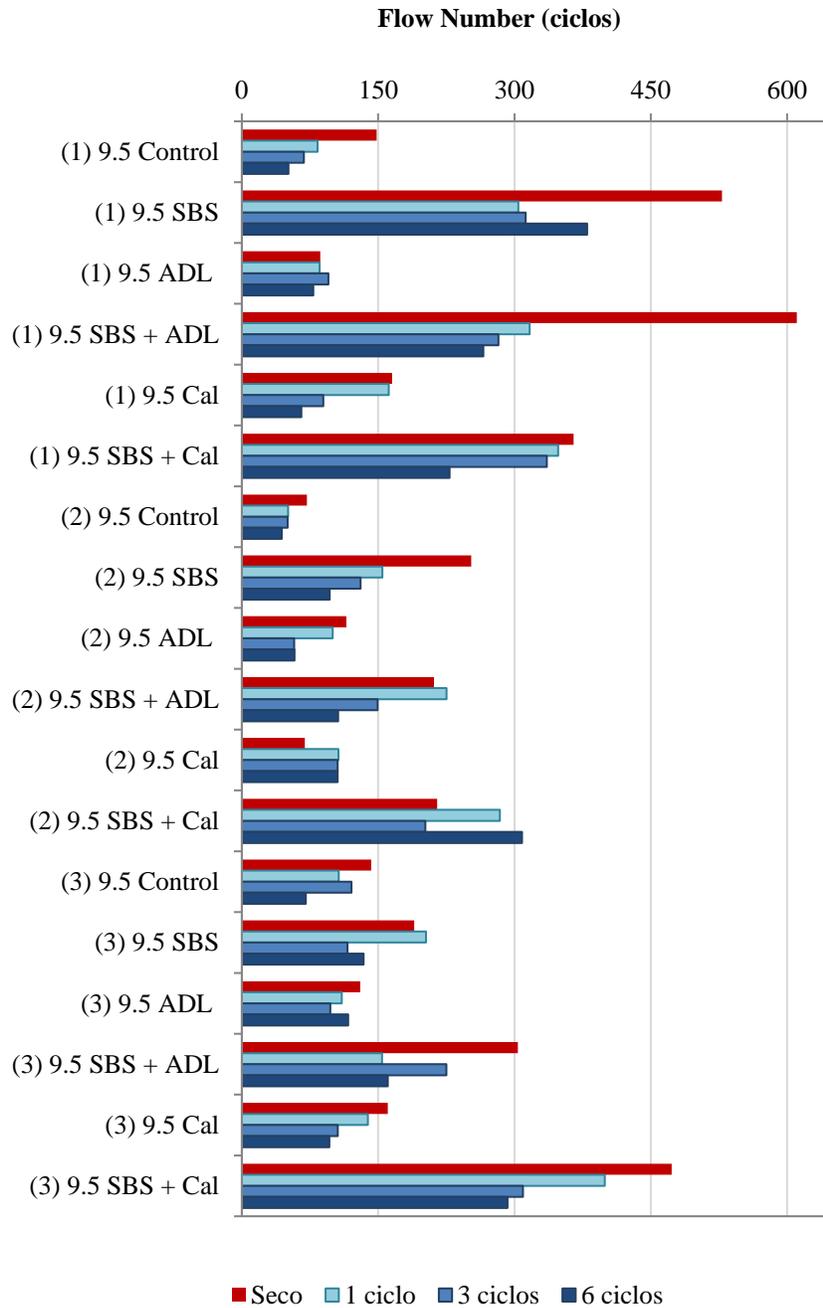


Figura 23. Resultados del ensayo de FN (TMN 9.5 mm)

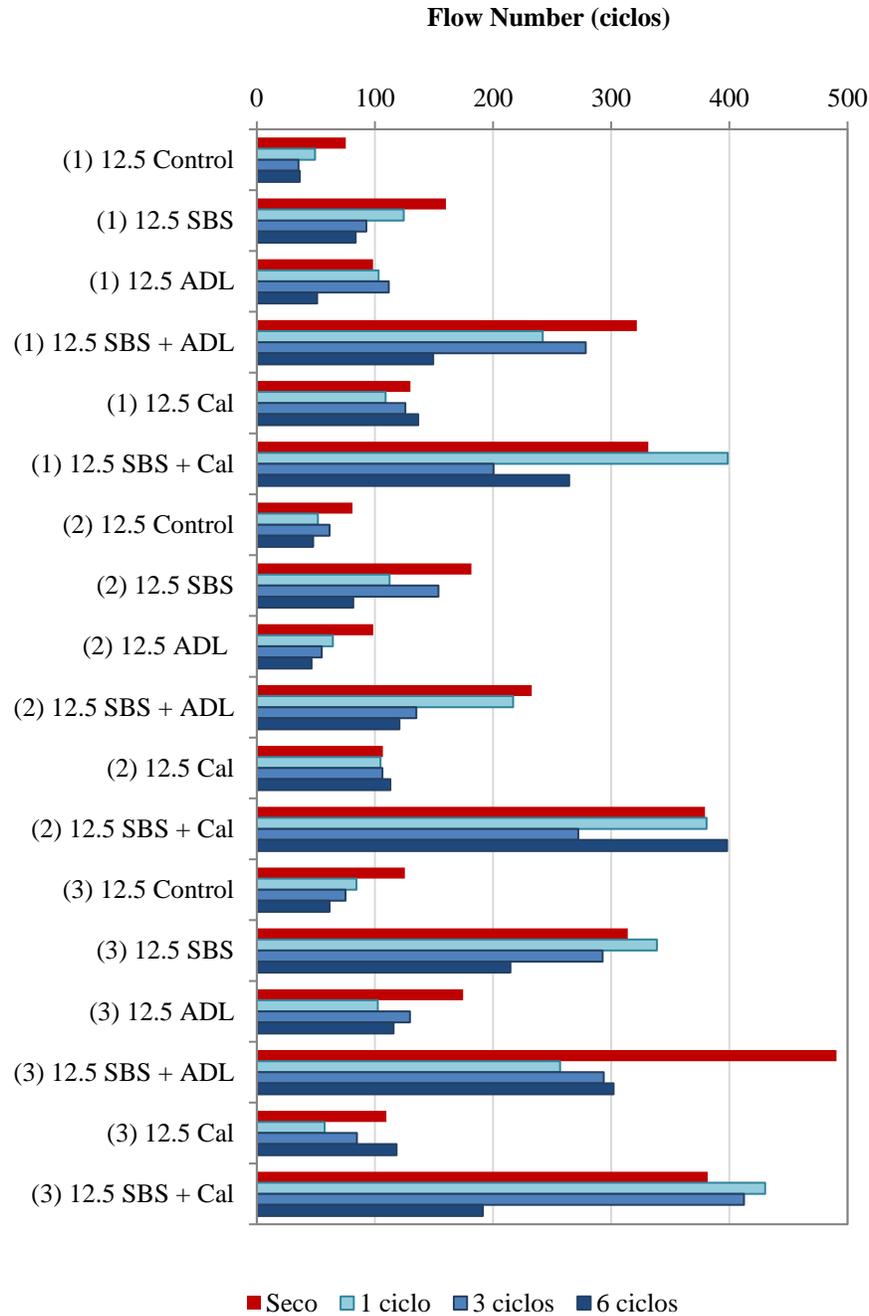


Figura 24. Resultados del ensayo de FN (TMN 12.5 mm)



Con el objetivo de evaluar la susceptibilidad al daño por humedad se obtiene la Razón de FN definida por la siguiente expresión:

$$\text{Razón de FN} = \frac{FN_n \text{ ciclos de hielo y deshielo}}{FN_{\text{sin acondicionar}}}$$

Los resultados se presentan en las siguientes Figuras.

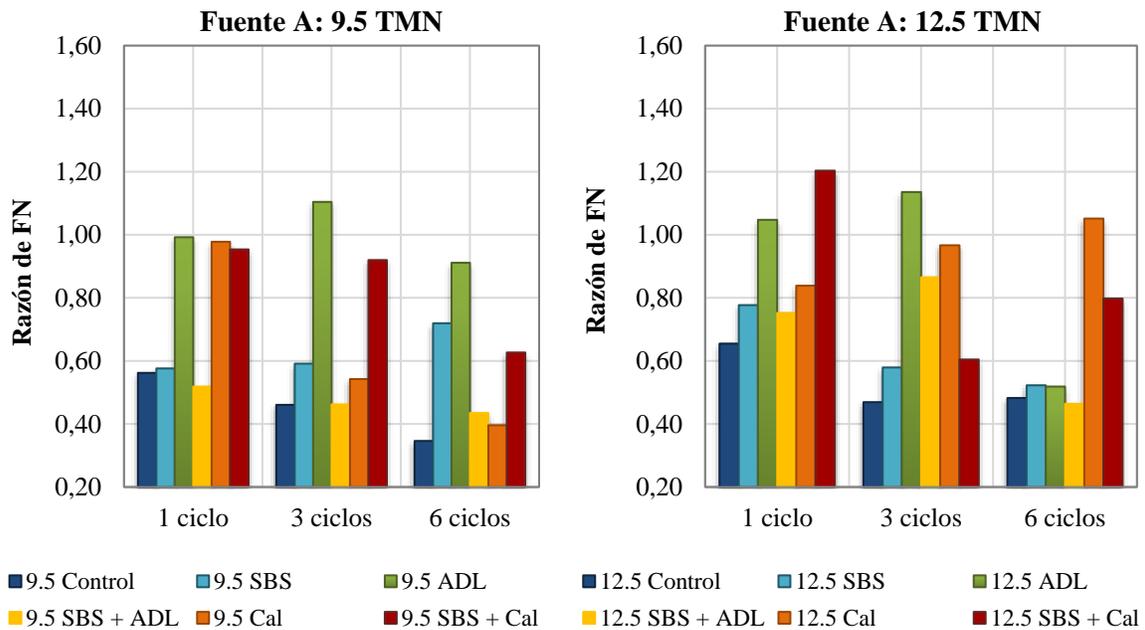


Figura 25. Resultados de FN de la Fuente A

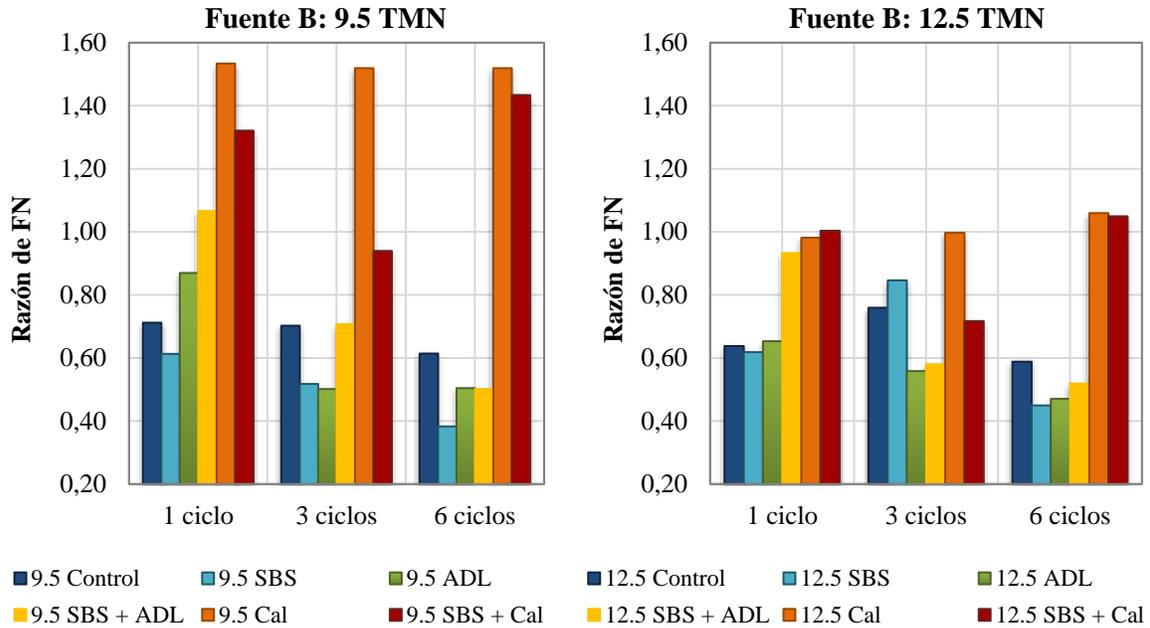


Figura 26. Resultados de FN de la Fuente B

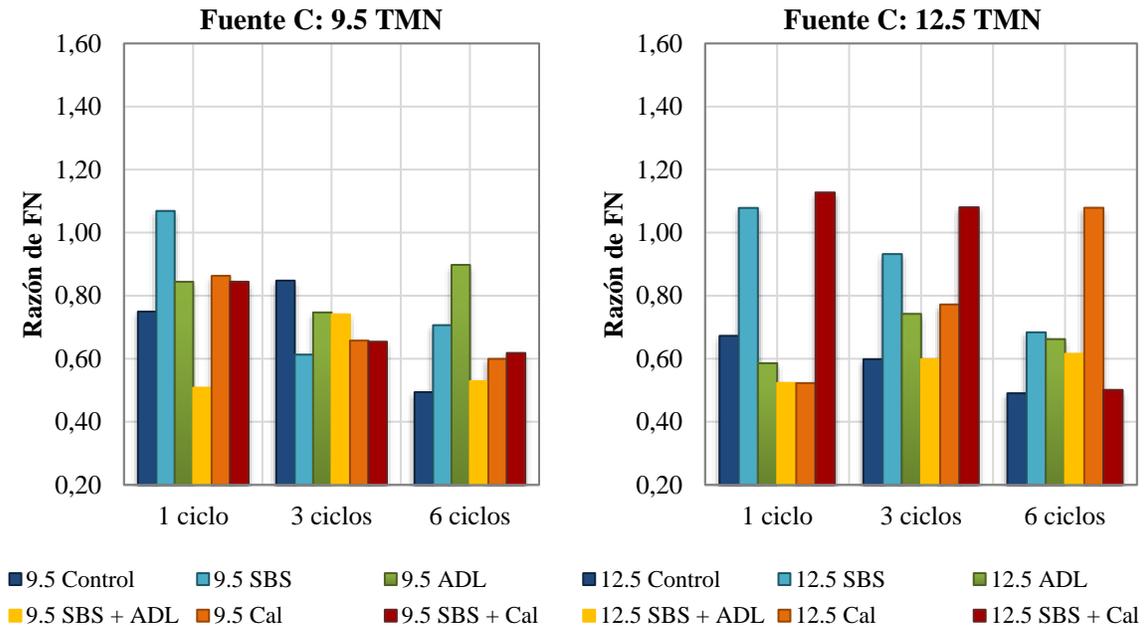


Figura 27. Resultados de FN de la Fuente C



Los resultados del ensayo de Flow Number son ampliamente variables. Sin embargo, se identifica que los mayores índices se alcanzan en las mezclas modificadas con cal conformadas con agregados de la Fuente B.

4.4 Síntesis de resultados

En la siguiente sección se presenta una síntesis del programa experimental con resultados de los promedios de las relaciones entre los parámetros medidos a través de ensayos de desempeño, considerando la condición más crítica de acondicionamiento para las diferentes granulometrías y fuentes. Dicha relación representa el estado más severo de daño inducido en el presente experimento, el cual permite evidenciar entre las mezclas con potencial daño a la presencia de humedad.

La **Figura 28** presenta la comparación entre los módulos E^* medidos a partir del ensayo de módulo dinámico entre especímenes acondicionados con 6 ciclos respecto a especímenes secos. El promedio general de los datos evidencia las relaciones más altas para la Fuente B. Adicionalmente se reafirma el criterio que los mejores resultados son obtenidos para los tratamientos con contenidos de cal.

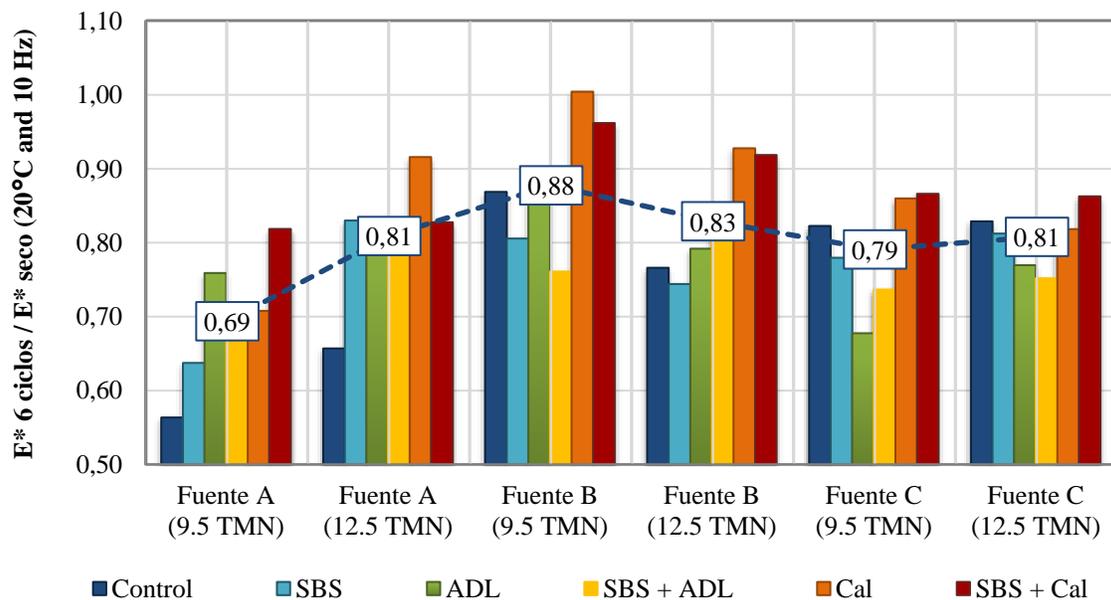


Figura 28. Resultados de razones de E^* a 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca, medidos a 20°C a 10 Hz

La **Figura 29** muestra la comparación entre los valores de RRTD para los 6 ciclos de acondicionamiento. Los resultados de los promedios generales para la relación de RRTD mostrada evidencian una alta susceptibilidad al daño por humedad en las mezclas de la Fuente C. Por otra parte, se revela el aporte sustancial de las mezclas modificadas con cal y en la combinación de cal y SBS.

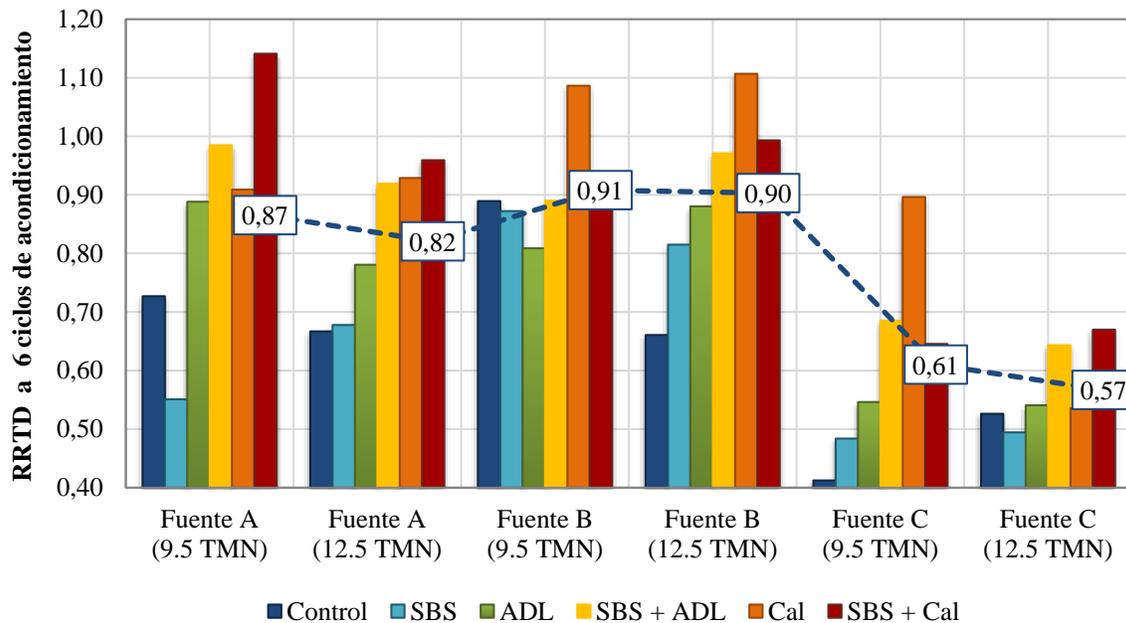


Figura 29. Resultados de razones de RRTD de 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca

Para el ensayo de Flow Number se presenta la **Figura 30**, de manera consistente a las figuras anteriores. En este caso se identifican los mejores índices para la Fuente B. Por otra parte, los resultados son consistentes en el tanto el mejor tratamiento se presenta para mezclas con contenidos de cal. Por otro lado, se observa que la adición de polímero SBS no resulta ser beneficioso en todas las configuraciones para efectos de daño por humedad.

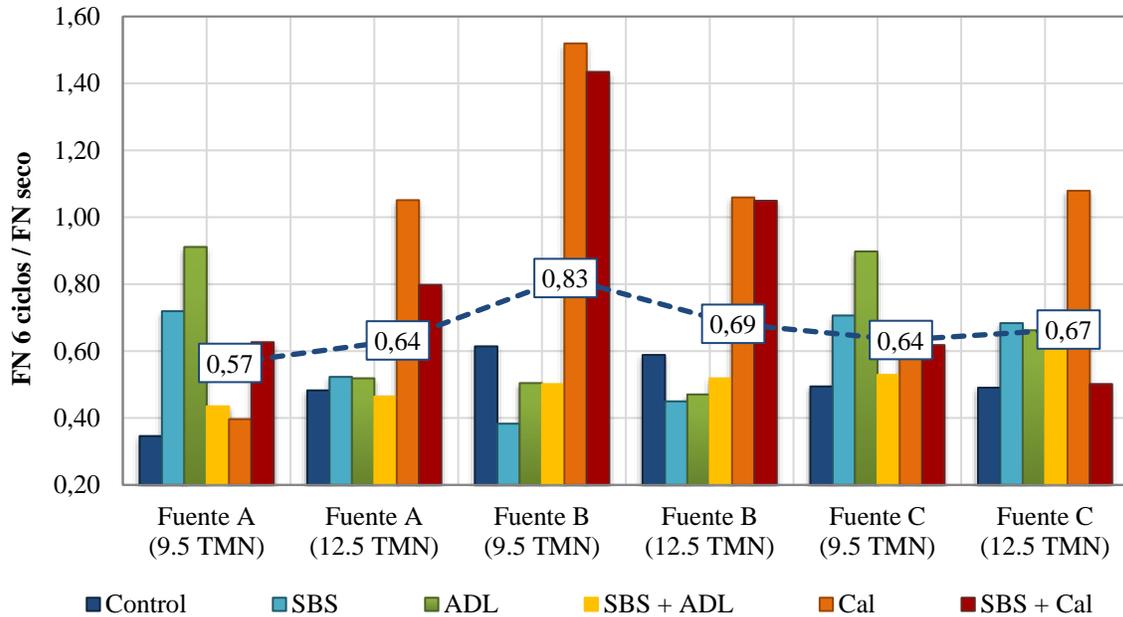


Figura 30. Resultados de razones de FN de 6 ciclos de acondicionamiento respecto a la condición seca

Respecto al tipo de tratamiento, la **Figura 31** presenta una síntesis de los promedios de las relaciones obtenidas por tipo de ensayo, considerando el acondicionamiento más agresivo (6 ciclos de hielo y deshielo). Los promedios de las relaciones revelan las mayores magnitudes para los tratamientos de Cal y SBS + Cal. Asimismo se identifica una mayor dispersión de los datos en el ensayo de Flow Number.

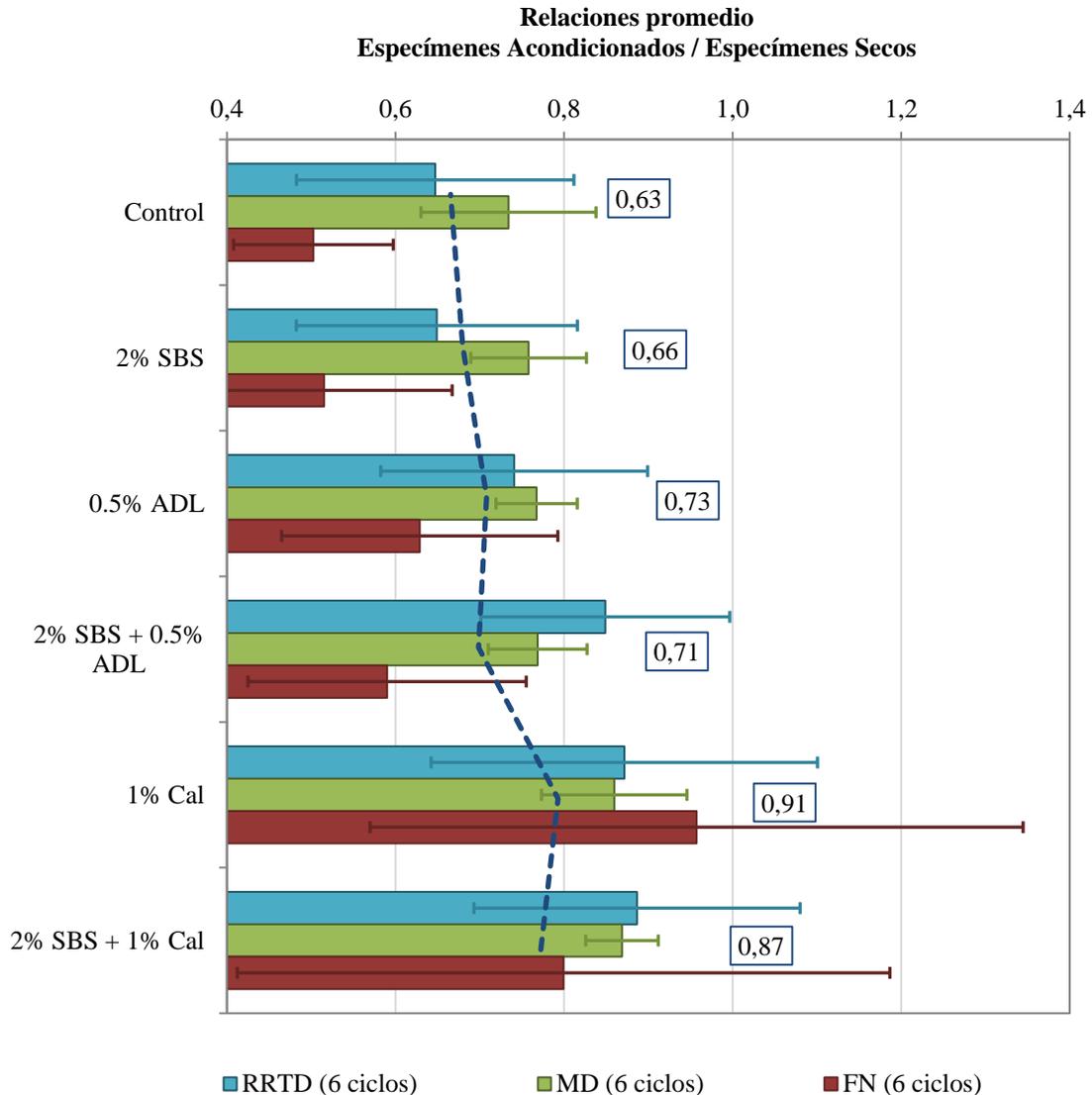


Figura 31. Promedios de las relaciones obtenidas por tipo de tratamiento

Finalmente se presenta la **Figura 32** con los resultados de los promedios de los ensayos de módulo dinámico y Flow Number para cada uno de los tratamientos.

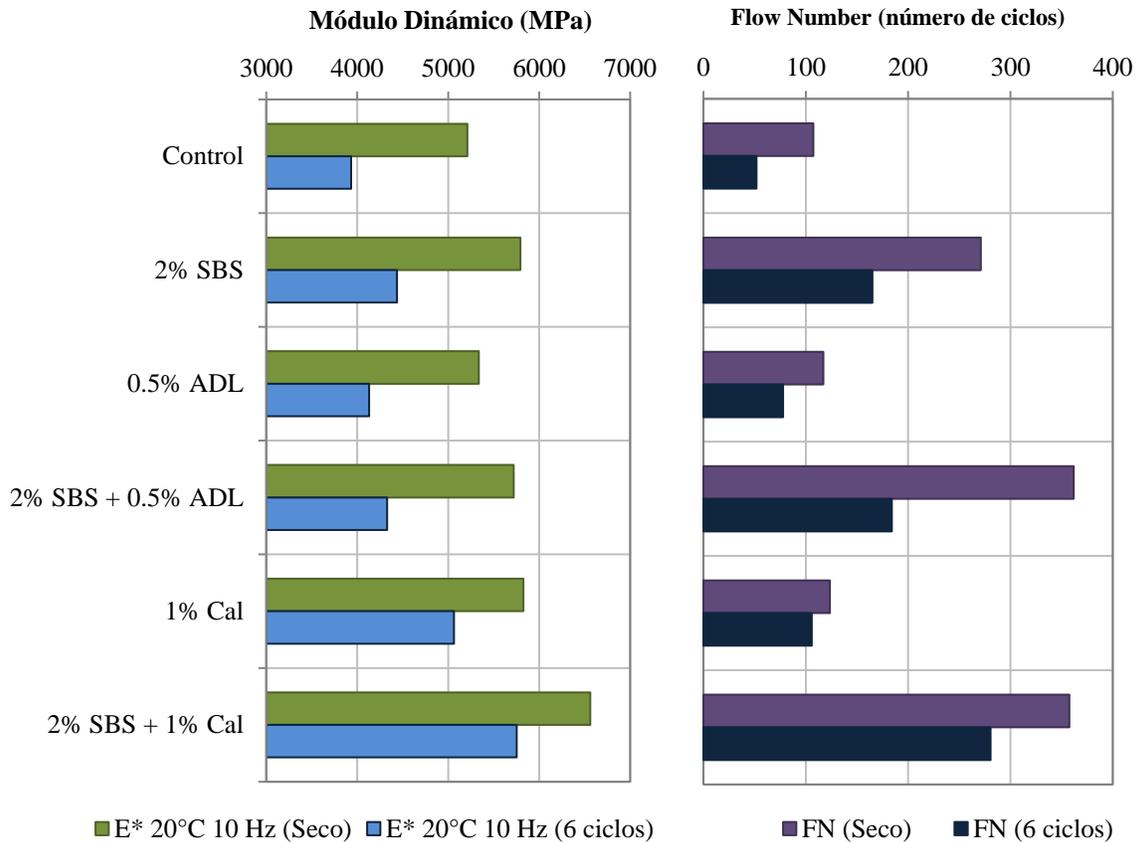


Figura 32. Promedio de resultados de Módulo Dinámico y Flow Number

5 CONCLUSIONES

Basado en los resultados presentados al término de la Etapa I del proyecto se resumen los principales hallazgos de cada una de las fases de la investigación:

5.1 Fuentes de agregados

A nivel general los mejores índices ante la resistencia al daño por humedad en los tres ensayos de desempeño se obtuvieron para las mezclas conformadas con agregados de Guápiles (Fuente B). En contraposición, las menores razones se asocian con las mezclas producidas con agregados de Río Claro.



Los resultados de caracterización de los agregados permiten asociar una mayor afinidad del material proveniente de la fuente de Río Claro (Fuente C) con el agua, medido a través del parámetro W_{AW} . Al mismo tiempo, los resultados son consistentes en el tanto los agregados provenientes de Guápiles (Fuente B) presentan la menor magnitud en el parámetro W_{AW} , asociado a una menor afinidad con el agua. No obstante, se destaca que los indicadores propuestos por (41) presentan resultados poco consistentes con los resultados observados a nivel de mezcla y tipos de materiales.

5.2 Tratamientos

Posterior al análisis de los tratamientos utilizados en el proyecto es posible justificar que la adición de cal en la mezcla asfáltica evidencia una ganancia de resistencia al daño por humedad. El aporte de este material en la resistencia al agua es más notorio conforme la mezcla se somete a un mayor nivel de daño.

La modificación de la mezcla utilizando el polímero SBS no genera un beneficio cuantificable ante la resistencia al daño por humedad. La verificación de los índices señala que resultados considerando la modificación del asfalto con SBS son efectivos en combinación con la cal. No obstante, al realizar un análisis individual de los ensayos de desempeño, se identifica que las mayores magnitudes de Flow Number y Resistencia a la Tensión Diametral se obtuvieron para las mezclas que contienen SBS en combinación con algún agente antidesnudante. De manera de que existe evidencia de que la incorporación del polímero mejora la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.

La combinación del asfalto modificado con SBS y cal representa una alternativa positiva para el mejoramiento de la mezcla asfáltica. Por una parte, el polímero incrementa las propiedades mecánicas de la mezcla, mientras que la cal disminuye la susceptibilidad a la humedad.

Por su parte, la adición de ADL genera un incremento cuantificable en la resistencia al daño por humedad respecto a la mezcla control. No obstante, su aporte no es tan pronunciado como el alcanzado en las mezclas modificadas con cal.

De forma paralela a lo anterior, resulta importante resaltar que existe una afectación de los agentes modificadores en las propiedades volumétricas de la mezcla, por lo que se requiere de la verificación del diseño en caso de su incorporación.



5.3 Especificación actual

El Manual de Especificaciones CR-2010 define en la Sección 402 los criterios de aceptación de resistencia al daño por humedad en mezclas asfálticas. El requerimiento más riguroso para mezclas de alto desempeño especifica un valor mínimo de 85% en el parámetro de Resistencia Retenida sin efectuar período de congelamiento (representado como la línea punteada de la **Figura 33**).

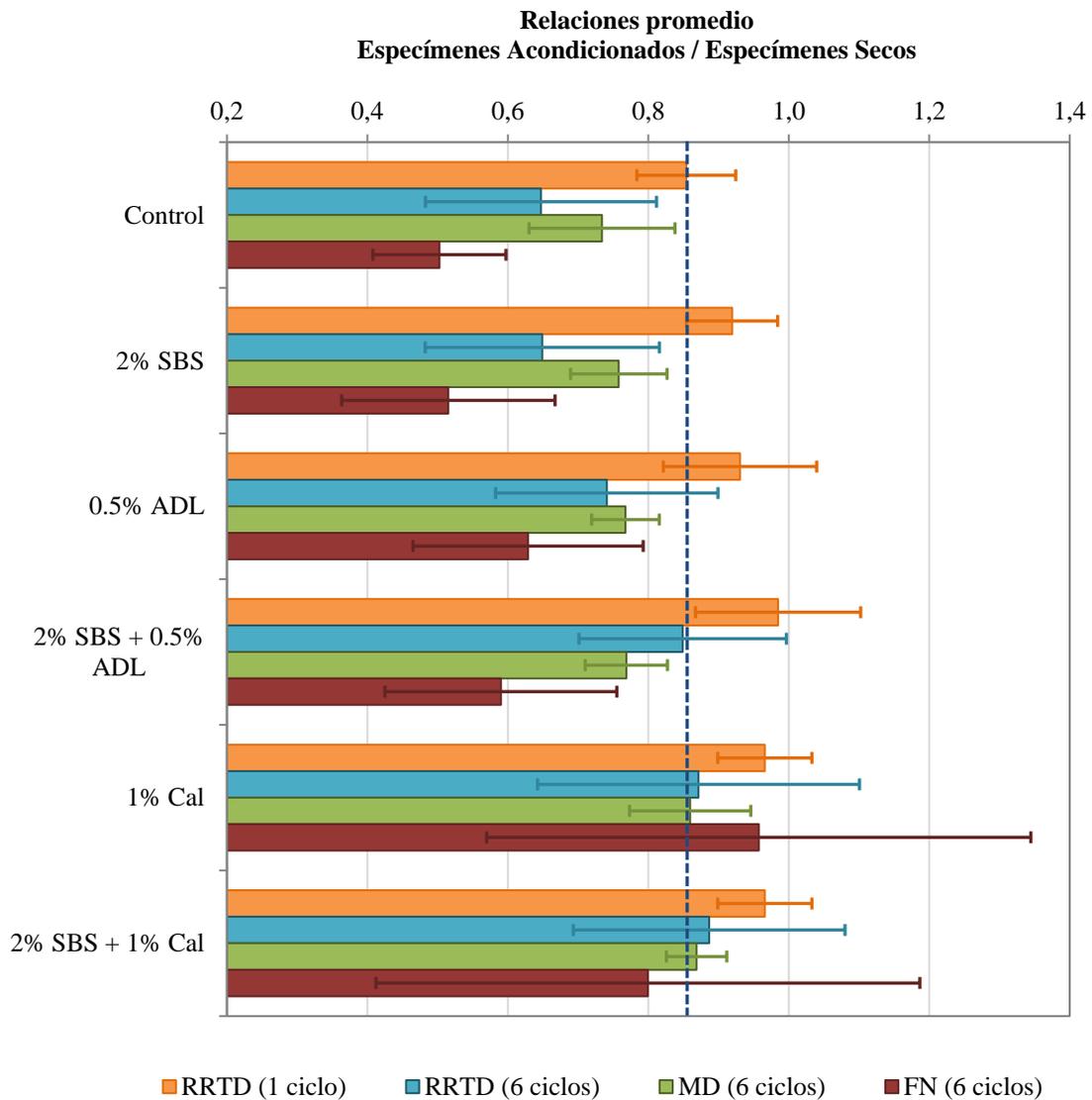


Figura 33. Promedios de las relaciones obtenidas por tipo de tratamiento



Del análisis global de los resultados se revela que el promedio general de mezclas alcanza el 85% especificación en el ensayo RRTD 1 ciclo, el cual considera un periodo de congelamiento y por tanto resulta ser más agresivo que la condición especificada en el CR 2010.

De acuerdo a lo anterior, uno de los principales hallazgos del proyecto consiste en la justificación técnica de que el parámetro actualmente definido como criterio de aceptación ante el daño por humedad no logra discriminar entre mezclas susceptibles o no al daño por humedad, lo cual se refleja en la realidad de los pavimentos en Costa Rica. Por otro lado, es posible identificar las bondades de las técnicas de mejoramiento del desempeño de mezclas asfálticas a través del uso de modificantes.

Por otro lado, los resultados de las relaciones para los ensayos RRTD, MD y FN a 6 ciclos permiten discriminar entre tratamientos alta susceptibilidad al daño por humedad. A nivel general, las mezclas modificadas con cal presentan el desempeño ante el fenómeno de daño por humedad.

6 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones de la investigación se enfocan en dos líneas: la selección de mejores materiales para el diseño de mezcla asfáltica resistentes al daño por humedad en Costa Rica y la validación de las especificaciones respecto a los criterios de aceptación de las mezclas ante este deterioro.

Basado en el análisis de la totalidad de mezclas en relación con su susceptibilidad a la presencia de humedad y considerando el efecto de los agentes antidesnudentes, granulometría y fuentes de agregado, se recomienda la utilización de agregados provenientes de Guápiles sobre agregados provenientes de las fuentes de Barranca y Río Claro. Adicionalmente, se cuenta con respaldo técnico que justifica que la adición de cal en la mezcla asfáltica genera un incremento significativo en la resistencia al daño por humedad, de modo que se recomienda la incorporación de cal en proyectos que se demanden condiciones críticas ante este tipo de deterioro.

El análisis desarrollado permite identificar una inconsistencia en los parámetros de aceptación de la especificación respecto al comportamiento de los materiales ante diferentes niveles de daño en presencia de agua. Por tanto, se recomienda la realización de un nuevo planteamiento de la especificación mediante de un ensayo alternativo en sustitución al ensayo de Resistencia Retenida a



la Tensión Diametral. La conclusión de la segunda etapa del proyecto permitirá plantear un nuevo procedimiento de aceptación para ser incorporado dentro del manual de especificaciones.

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. Amirkhanian. 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.
17. Kringos, N. and Scarpas, A., 2005. Raveling of asphaltic mixes due to water damage: computational identification of controlling parameters. Transportation research record: journal of the transportation research board, 1929, 79-87.
18. Kringos, N. and Scarpas, A., 2006. Numerical simulation of the physical processes inducing moisture damage in asphaltic mixtures. 10th international conference on asphalt pavements (ISAP), Quebec, Canada pp. 732-741.
19. Kringos, N., Scarpas, A. and Kasbergen, C., 2007. Three dimensional elasto-visco-plastic finite element model for combined physical-mechanical moisture induced damage in asphaltic mixes. Journal of the association of asphalt paving technologists, (in press).
20. Kringos y Scarpas. 2008. A..Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures. *International Journal of Solids and Structures*. 45 (9). p 2671-2685.
21. 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.



22. 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.
23. 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.
24. ASTM D 3625. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. American Society for Testing and Materials, 2012.
25. AASHTO T 182. Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
26. Curtis, C.W., K. Ensley, and J. Epps. Fundamental Properties of Asphalt –Aggregate
27. Interactions Including Adhesion and Absorption. Final Report SHRP-A-341, National Research Council, Washington D.C., 1991.
28. 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.
29. Lottman, R.P. Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. NCHRP Report 192, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 1978.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.



34. 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.
35. Hunter, E.R. and K. Ksaibati. Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures. University of Wyoming, Laramie, Wyoming, 2002.
36. Little, D.N., J.A. Epps and P.E. Sebaaly . The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, 2006.
37. 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.
38. 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.
39. 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.
40. Baldi, A., Aguiar, J.P., Vargas, A. y Loría, L.G., (2017). Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 18(2), 318-328. doi.org/10.1080/14680629.2017.1304248
41. Little, D., & Bhasin, A. (2006). Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement. NCHRP project 9-37. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program.