



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

# PITRA

Programa de  
Infraestructura  
del Transporte

## ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADHESIÓN ASFALTO - AGREGADO EN COSTA RICA **LM-PI-UMP-038- R2**

### PREPARADO POR

Alejandra Baldi-Sevilla, José Pablo Aguiar-Moya,  
Jorge Salazar-Delgado, Ellen Rodríguez-Castro, Luis  
Guillermo Loría-Salazar



programa de infraestructura  
del transporte

PITRA

San José, Costa Rica  
Diciembre, 2016

UMP

Unidad de  
Materiales y Pavimentos

# ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADHESIÓN ASFALTO - AGREGADO EN COSTA RICA LM-PI-UMP-038-R2

Baldi-Sevilla, Alejandra<sup>1</sup>; Aguiar-Moya, José Pablo<sup>2</sup>; Salazar-Delgado, Jorge<sup>3</sup>; Rodríguez-Castro, Ellen<sup>4</sup>; Loría-Salazar, Luis Guillermo<sup>5</sup>

1. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
2. Coordinador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
3. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
4. Investigador, Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA-Lanamme UCR
5. Coordinador General Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR

**Palabras Clave:** Adhesión, Cohesión, Energía Superficial, Desempeño

**Resumen:** El daño por humedad es una de las fallas más importantes que deterioran al pavimento. Se ha reconocido que este tipo de daño responde al debilitamiento de la interacción entre el asfalto y el agregado (reducción de la adhesión) y al debilitamiento de las interacciones cohesivas en el asfalto, ambos por efecto del agua. Producto de ello, ocurre el desprendimiento del asfalto de la superficie del agregado (desnudamiento) y el desprendimiento de agregados de la superficie del pavimento (desmoronamiento). Desde esta perspectiva, el daño por humedad es el detonante de otros mecanismos de falla y podría resultar tan severo que provoque la pérdida total de la mezcla asfáltica. Sin embargo, existen otros factores que contribuyen al daño por humedad, tales como el diseño de mezcla (materiales seleccionados, contenido de vacíos y de asfalto), la producción y construcción de la misma, factores ambientales, entre otros. Por lo tanto, no es posible definir completamente el daño por humedad con base en mecanismos individuales tales como desnudamiento o desmoronamiento: es necesario desarrollar una visión integral del fenómeno. Por esta razón, la presente investigación busca abordar el proceso de daño por humedad desde la perspectiva fundamental (dada por la fisicoquímica de las superficies) hasta sus repercusiones a nivel mecánico. Con tal de alcanzar este objetivo, se contó con varias fuentes tanto de agregado como de asfalto, las cuales fueron caracterizadas en términos de energía superficial. Adicionalmente, con estos materiales se produjo mezcla asfáltica, cuyo desempeño mecánico fue evaluado en condiciones húmedas. Los resultados obtenidos permiten enlazar las propiedades de superficie de los materiales con su comportamiento real en presencia de agua, utilizando ciertos parámetros fisicoquímicos relacionados con la compatibilidad del asfalto y el agregado con el agua. Adicionalmente, se logró establecer una relación entre el proceso de adhesión (y de desplazamiento en presencia de agua) y la polaridad tanto del asfalto como del agregado.

---

## Referencias

1. Aguiar-Moya, J. P., Leiva-Villacorta, F., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Rodríguez-Castro, E., & Loría-Salazar, L. G. (2014). Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Costa Rica LM-PI-UMP-038-R2. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
2. Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., & Loria-Salazar, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2505, 57-65. DOI: 10.3141/2505-08
3. Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J. F., Loria-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F. & Cely-Leal, N. (2016). Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199884
4. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loria-Salazar, L. & Bhasin, A. (2016). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. Aceptado para publicación en *Road Materials and Pavement Design*.
5. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Loria-Salazar, L. (2016). Effect of aggregate-bitumen compatibility on asphalt moisture susceptibility. Aceptado para publicación en *Road Materials and Pavement Design*.

# PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS OF ASPHALT-AGGREGATE INTERFACIAL ADHESION IN COSTA RICA LM-PI-UMP-038-R2

Baldi-Sevilla, Alejandra<sup>1</sup>; Aguiar-Moya, José Pablo<sup>2</sup>; Salazar-Delgado, Jorge<sup>3</sup>; Rodríguez-Castro, Ellen<sup>4</sup>; Loría-Salazar, Luis Guillermo<sup>5</sup>

1. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
2. Coordinator, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
3. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
4. Researcher, Materials and Pavements Division, PITRA-Lanamme UCR
5. General Coordinator, Transport infrastructure Program (PITRA), Lanamme UCR

**Keywords:** Adhesion, Cohesion, Surface energy, Performance

**Abstract:** Moisture damage is one of the most severe failures in asphalt mixtures. This failure occurs due to the weakening of the adhesion between binder and aggregate and the weakening of the interactions within the binder (cohesion) by the effect of water. As consequence, processes such as stripping and raveling deteriorate the pavement structure. From this perspective, moisture damage is a catalyst for other failure modes and it might cause the total loss of the asphalt mixture. However, there are other factors contributing to moisture damage, such as mix design (selected materials, voids content, asphalt content), environmental conditions, among others. Therefore, it is not possible to relate moisture-induced damage to a single mechanism such as stripping or raveling, it is necessary to develop an integral perception of this phenomenon. In this sense, the objective of this study is to characterize moisture-induced damage from the fundamental properties of materials (given by their surface properties) to their mechanical performance. In order to achieve this goal, several binder and aggregate sources were characterized in terms of surface energy. Additionally, the mechanical performance of the resulting asphalt mixture was tested under humid conditions. The results obtained allowed relating the surface properties of binders and aggregates to their performance in the presence of water. The previous was possible by means of applying certain physicochemical parameters that characterize the compatibility of binder and aggregate to water. In addition, it was possible to relate the adhesion between binder and aggregate to their polarity.

---

## References

1. Aguiar-Moya, J. P., Leiva-Villacorta, F., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Rodríguez-Castro, E., & Loria-Salazar, L. G. (2014). Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Costa Rica LM-PI-UMP-038-R2. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
2. Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., & Loria-Salazar, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2505, 57-65. DOI: 10.3141/2505-08
3. Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J. F., Loria-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F. & Cely-Leal, N. (2016). Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199884
4. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loria-Salazar, L. & Bhasin, A. (2016). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. Accepted for publication in *Road Materials and Pavement Design*.
5. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Loria-Salazar, L. (2016). Effect of aggregate-bitumen compatibility on asphalt moisture susceptibility. Accepted for publication in *Road Materials and Pavement Design*.

---

Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Rodríguez-Castro, E., Loría-Salazar, L. G. (2016). *Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Costa Rica LM-PI-UMP-038-R2*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

REPORTE: LM-PI-UMP-038-R2

# ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADHESIÓN ASFALTO - AGREGADO EN COSTA RICA

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

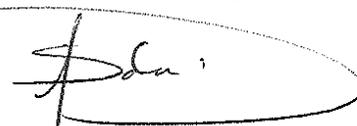
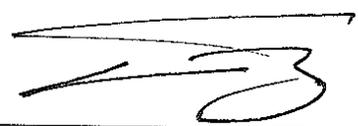
Diciembre, 2016.

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



Información técnica del documento

<b>1. Informe</b> LM-PI-UMP-038-R1		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADHESIÓN ASFALTO - AGREGADO EN COSTA RICA		<b>4. Fecha del Informe</b> Diciembre, 2016
<b>5. Organización y dirección</b> 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		
<b>6. Resumen:</b> El daño por humedad es una de las fallas más importantes que deterioran al pavimento asfáltico. Se reconoce que este tipo de daño responde al debilitamiento de la interacción física y química entre asfalto y agregado (reducción de la adhesión) y al debilitamiento de las interacciones cohesivas del asfalto, ambos por efecto del agua. Producto de ello, ocurre el desprendimiento del asfalto de la superficie del agregado (desnudamiento) y el desprendimiento de agregados de la superficie del pavimento (desmoronamiento). Desde esta perspectiva, el daño por humedad es detonante de otros mecanismos de falla y podría resultar tan severo que provoque la pérdida total de la mezcla asfáltica. Sin embargo, existen otros factores que contribuyen al daño por humedad, como el diseño de mezcla (materiales seleccionados, contenido de vacíos y de asfalto), la producción y construcción de la misma, factores ambientales, entre otros. Por tanto, no es posible definir completamente el daño por humedad con base en mecanismos individuales como desnudamiento o desmoronamiento, es necesario desarrollar una visión integral del fenómeno. Por esta razón, la presente investigación busca abordar el proceso de daño por humedad desde la perspectiva fundamental (dada por la fisicoquímica de las superficies) hasta sus repercusiones a nivel mecánico. Para ello, se contó con varias fuentes de agregado y de asfalto, las cuales fueron caracterizadas en términos de energía superficial. Adicionalmente, con estos materiales se produjo mezcla asfáltica, cuyo desempeño mecánico fue evaluado en condiciones húmedas. Los resultados obtenidos permiten enlazar las propiedades de superficie de los materiales con su comportamiento real en presencia de agua, utilizando ciertos parámetros fisicoquímicos relacionados con la compatibilidad del asfalto y el agregado con el agua. Adicionalmente, se logró establecer una relación entre el proceso de adhesión (y de desplazamiento en presencia de agua) y la polaridad del asfalto y del agregado.		
<b>7. Palabras clave</b> Adhesión, cohesión, energía superficial, desempeño, mezcla asfáltica	<b>8. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>9. Núm. de páginas</b> 46
<b>10. Preparado por:</b>		
Quim. Alejandra Baldi Sevilla, M. Sc. Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 07 / 12 / 16	Quim. Jorge Salazar Delgado Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 07 / 12 / 16	Ing. Ellen Rodríguez Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 07 / 12 / 16
<b>11. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos   Fecha: 07 / 12 / 16	<b>12. Aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA   Fecha: 07 / 12 / 16	

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
1. Resumen ejecutivo.....	11
1.1. Objetivo general.....	11
1.2. Objetivos específicos.....	11
2. Metodología.....	12
2.1. Materiales utilizados .....	12
2.2. Envejecimiento de las muestras de asfalto .....	12
2.2.1. Envejecimiento térmico.....	12
2.1.2. Envejecimiento a la intemperie.....	13
2.3. Modificación del asfalto .....	14
2.4. Medición de la energía superficial .....	15
2.5. Diseño de la mezcla asfáltica .....	18
2.6. Módulo dinámico .....	19
2.7. Ensayos reológicos.....	20
2.7.1. Multiple Stress Creep Recovery.....	20
2.7.2. Fatiga.....	20
3. Resultados y discusión .....	21
3.1. Efecto de la compatibilidad asfalto-agregado sobre la susceptibilidad ante el daño por humedad de una mezcla asfáltica .....	21
3.1.1. Comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.....	21
3.1.2. Parámetros fisicoquímicos relacionados con el daño por humedad .....	23
3.1.3. Relación entre la aproximación fisicoquímica y el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica .....	25
3.2. Influencia de la polaridad del asfalto y del agregado sobre la adhesión interfacial .....	27

3.3. Efecto de la oxidación sobre la resistencia al daño por humedad de combinaciones asfalto-agregado .....	33
3.3.1. Efecto de los aditivos y el envejecimiento sobre la energía superficial del asfalto.....	33
3.3.2. Efecto de los aditivos y la oxidación sobre la resistencia al daño por humedad .....	35
3.3.3. Efecto de los aditivos sobre la resistencia a la deformación y a la fatiga del asfalto .....	38
3.3.4. Relación entre la cohesión del asfalto y su desempeño .....	39
3.4. Efecto de la oxidación a la intemperie sobre las propiedades adhesivas del asfalto .....	40
4. Conclusiones.....	43
5. Acciones a corto plazo .....	44
6. Referencias .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Muestras de asfalto colocadas en moldes de silicón antiadherentes, b) Muestras de asfalto durante el envejecimiento a la intemperie ubicadas en el techo del edificio B del LanammeUCR	14
Figura 2. a) Implementación del goniómetro; b) Ángulo de contacto	16
Figura 3. E*R de mezclas asfálticas producidas con a) Grava 1 y b) Grava 2	22
Figura 4. Relación entre E*R y ER2 para las combinaciones agregado-asfalto propuestas	25
Figura 5. Trabajo de adhesión ( $W_{AB}$ ) para las combinaciones de las fuentes de agregado y asfalto modificado con a) diatomita (D) y b) diatomita hidrófoba (HD) (la columna que representa el asfalto control está separada para facilitar su identificación)	28
Figura 6. Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de adhesión para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4	29
Figura 7. Trabajo de desplazamiento para las combinaciones de agregado y asfalto modificado con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba	30
Figura 8. Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de desplazamiento para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4	30
Figura 9. Razón de Energía ( $ER_i$ ) de los pares de agregado y los asfaltos modificados con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba	31
Figura 10. Efecto de la basicidad del agregado sobre a) $W_{AB}$ y b) $W_{wet}$	32
Figura 11. Efecto de la basicidad de los agregados de la base de datos sobre a) $W_{AB}$ y b) $W_{wet}$ . Los valores fueron calculados usando los asfaltos modificados con diatomita y diatomita hidrófoba	32
Figura 12. Influencia del contenido de aditivo sobre la cohesión del asfalto no envejecido.	34
Figura 13. Cohesión del asfalto en función de la dispersividad	35
Figura 14. Influencia del aditivo sobre a) $W_{AB}$ ; b) $W_{wet}$ y c) $ER_1$ para las combinaciones asfalto-caliza 1	36
Figura 15. Influencia de los componentes dispersivo ( $\gamma^{LW}$ ) y polar ( $\gamma^{AB}$ ) de la energía superficial del asfalto sobre a) $W_{AB}$ ; b) $W_{wet}$ y c) $ER_1$	37
Figura 16. Efecto de la oxidación sobre a) $W_{AB}$ ; b) $W_{wet}$ y c) $ER_1$	37
Figura 17. Influencia del aditivo sobre a) deformación (compliance) y b) recuperación elástica del asfalto	38
Figura 18. Número de ciclos para la falla por fatiga del asfalto	39

Figura 19. Relación entre la cohesión del asfalto y a) $ER_1$ ; b) deformación (compliance); c) recuperación elástica y d) fatiga _____	40
Figura 20. Valores de POTS para las combinaciones asfalto-agregado _____	41
Figura 21. Curvas de disipación de energía de asfalto en diferentes condiciones de oxidación _____	42
Figura 22. Correlación entre los valores de POTS y a) $W_{AB}$ y b) $ER_2$ _____	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales utilizados y su respectiva designación _____	12
Tabla 2. Asfaltos modificados _____	15
Tabla 3. Granulometría de las mezclas _____	19
Tabla 4. Propiedades volumétricas de las mezclas _____	19
Tabla 5. Energía superficial de los materiales _____	23
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las combinaciones agregado-asfalto _____	24
Tabla 7. Indicadores de compatibilidad, $W_{AW}$ y $W_{BW}$ _____	26
Tabla 8. Caracterización fisicoquímica de asfaltos y agregados _____	27
Tabla 9. Energía superficial de los asfaltos (no envejecidos y oxidados) y del agregado calizo _____	34

## 1. Resumen ejecutivo

El daño por humedad es una de las fallas más importantes que deterioran al pavimento. Se ha reconocido que este tipo de daño responde al debilitamiento de la interacción entre el asfalto y el agregado (reducción de la adhesión) y al debilitamiento de las interacciones cohesivas en el asfalto, ambos por efecto del agua (Caro et al., 2008; Xu y Wang, 2016). Producto de ello, ocurre el desprendimiento del asfalto de la superficie del agregado (desnudamiento) y el desprendimiento de agregados de la superficie del pavimento (desmoronamiento). Desde esta perspectiva, el daño por humedad es el detonante de otros mecanismos de falla y podría resultar tan severo que provoque la pérdida total de la mezcla asfáltica (Airey y Choi, 2015). Sin embargo, existen otros factores que contribuyen al daño por humedad, tales como el diseño de mezcla (materiales seleccionados, contenido de vacíos y de asfalto), la producción y construcción del pavimento, factores ambientales, entre otros (Hicks, Santucci y Aschenbrener, 2003). Por lo tanto, no es posible definir completamente el daño por humedad con base en mecanismos individuales tales como desnudamiento o desmoronamiento, es necesario desarrollar una visión integral del fenómeno. Por esta razón, la presente investigación busca abordar el proceso de daño por humedad desde la perspectiva fundamental (dada por la fisicoquímica de las superficies) hasta sus repercusiones a nivel mecánico. Con tal de alcanzar este objetivo, se contó con varias fuentes tanto de agregado como de asfalto, las cuales fueron caracterizadas en términos de energía superficial. Adicionalmente, con estos materiales se produjo mezcla asfáltica, cuyo desempeño mecánico fue evaluado en condiciones húmedas. Los resultados obtenidos permiten enlazar las propiedades de superficie de los materiales con su comportamiento real en presencia de agua, utilizando ciertos parámetros fisicoquímicos relacionados con la compatibilidad del asfalto y el agregado con el agua. Adicionalmente, se logró establecer una relación entre el proceso de adhesión (y de desplazamiento en presencia de agua) y la polaridad tanto del asfalto como del agregado.

### 1.1. Objetivo general

Determinar la susceptibilidad a la humedad de materiales para pavimentos de uso común en Costa Rica.

### 1.2. Objetivos específicos

1) Cuantificar la adhesividad de una fuente de asfalto con distintos tipos de agregado mineral de uso común en Costa Rica.

- 2) Caracterizar el efecto del uso de aditivos de diferente índole en la susceptibilidad al daño por humedad.
- 3) Relacionar las propiedades de superficie de los materiales utilizados en pavimentos con el desempeño mecánico de mezclas asfálticas resultantes, expuestas a condiciones húmedas.

## 2. Metodología

### 2.1. Materiales utilizados

Los materiales empleados a lo largo del proyecto se enlistan en la Tabla 1. A cada material se le designó un nombre con el cual serán referidos a lo largo del texto.

Los agregados utilizados corresponden a materiales de mayor uso en Costa Rica y los cuales presentan una resistencia variada en cuanto al daño por humedad. Históricamente, los agregados calizos han mostrado tener una mayor resistencia ante el daño por humedad, mientras que los agregados silíceos (gravas) tienden a presentar una mayor problemática en presencia de agua. Sin embargo, esta diferenciación no puede basarse solamente en la naturaleza química de los agregados. Por ejemplo, de las Gravas seleccionadas la Grava 3 (proveniente del Caribe Central) muestra un adecuado desempeño ante la humedad. Por el contrario, la Grava 4 y la Caliza 2 (provenientes de la Costa Pacífica) muestran mayor susceptibilidad ante la humedad (Aguiar-Moya et al., 2014).

**Tabla 1.** Materiales utilizados y su respectiva designación

Material	Descripción	Designación
Agregado	Grava 899-16	Grava 1
	Grava 689-15	Grava 2
	Grava 1152-12	Grava 3
	Grava 1153-12	Grava 4
	Caliza 1136-12	Caliza 1
	Caliza 1212-12	Caliza 2
	Grava 687-15	Grava 5
	Grava 688-15	Grava 6
Asfalto	0925-14 (PG70-22)	Asfalto 1
	1468-13 (PG70-22)	Asfalto 2

### 2.2. Envejecimiento de las muestras de asfalto

#### 2.2.1. Envejecimiento térmico

Las muestras de asfalto fueron sometidas a envejecimiento, de acuerdo con la metodología de diseño Superpave. De acuerdo con esta metodología, el asfalto se somete a un acondicionamiento bajo

condiciones controladas en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO, del inglés Rolling Thin Film Oven) (ASTM D 2872). Tal procedimiento se considera representativo del envejecimiento que le ocurre al material durante su producción, mezclado, colocación y compactación en carretera. Por tanto, este tipo de envejecimiento se denomina envejecimiento a corto plazo del asfalto. Una vez finalizado este proceso, el material se somete a un segundo proceso de acondicionamiento en el Horno de Envejecimiento a Presión (PAV, del inglés Pressure Aging Vessel) (ASTM D 6521). El envejecimiento en PAV es más severo que en el RTFO, ya que el asfalto es sometido a condiciones de temperatura y presión altas. Tal procedimiento busca simular el envejecimiento que le ocurre al material a largo plazo, es decir, luego de varios años de servicio en carretera. Adicionalmente, el asfalto fue sometido hasta cinco ciclos consecutivos de envejecimiento en el PAV, con el objetivo de alcanzar un mayor grado de oxidación en las muestras y analizar los cambios físicos, químicos y mecánicos consecuentes.

### **2.1.2. Envejecimiento a la intemperie**

Las muestras de asfalto fueron colocadas en moldes (Figura 1.a) y se mantendrán expuestas a la intemperie (Figura 1.b) durante un período de cinco años. Las muestras correspondientes al primer año de acondicionamiento fueron retiradas y analizadas. Los resultados obtenidos serán discutidos en una de las secciones del presente informe.



a)



b)

**Figura 1.** a) Muestras de asfalto colocadas en moldes de silicón antiadherentes, b) Muestras de asfalto durante el envejecimiento a la intemperie ubicadas en el techo del edificio B del LanammeUCR

### 2.3. Modificación del asfalto

Se produjeron dos grupos de asfaltos modificados de acuerdo con el objetivo de la investigación. Se utilizaron dos fuentes de asfalto clasificado según la metodología de diseño Superpave PG70-22 (PG del inglés Performance Grade). Los aditivos se adicionaron en el porcentaje detallado en la Tabla 2 con agitación bajo cortante hasta lograr la incorporación completa del aditivo. Las condiciones de incorporación para cada asfalto se indican en la Tabla 2.

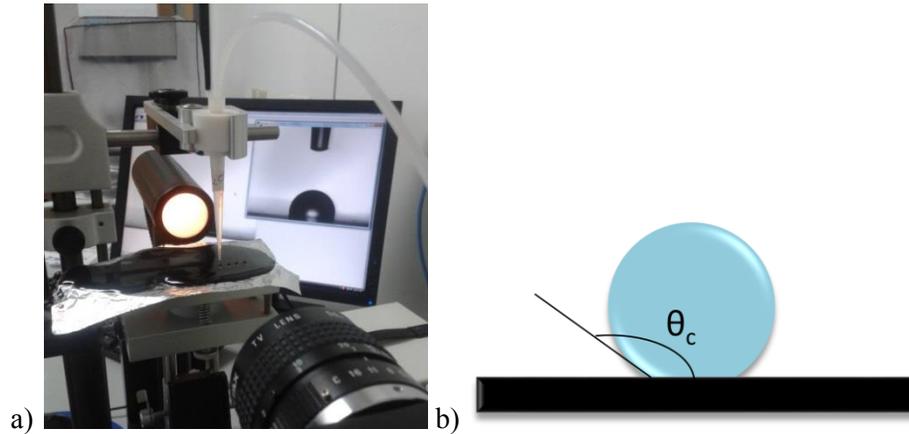
**Tabla 2.** Asfaltos modificados

Objetivo	Asfalto	Aditivo	Porcentaje, %	Temperatura de incorporación, °C	Tiempo de incorporación, h
1 Comparar desempeño mecánico y resistencia fisicoquímica ante el daño por humedad.	Asfalto 1 (0925-14)	SBS	2	177	3.0
		SBS + Cal	2 (SBS); 1 (Cal)	177	3.0
		Cal	1	185	1.5
		Antidesnudante líquido (LAS)	0,5	159	0.33
2 Evaluar la resistencia fisicoquímica de la interfaz asfalto-agregado.	Asfalto 2 (1468-13)	Nanosilica	2	175	1.5
		Nanosilica	4		
		Nanosilica	6		
		Diatomita	2		
		Diatomita	4		
		Diatomita	6		
3 Evaluar el efecto de la oxidación del asfalto sobre su resistencia ante el daño por humedad.	Asfalto 2 (1468-13)	Diatomita	10	175	1.5
		Diatomita	2		
		hidrófoba*	2		
		Diatomita hidrófoba	4		
		Diatomita hidrófoba	6		
Diatomita hidrófoba	10				

\*la diatomita hidrófoba consiste en diatomita convencional cuya superficie se modificó químicamente para alterar su polaridad y afinidad al agua

#### 2.4. Medición de la energía superficial

La medición de la energía superficial de los asfaltos y agregados empleados en este estudio se obtuvo mediante la utilización de un goniómetro (Figura 2a). Las muestras de asfalto se prepararon calentando el material hasta que su fluidez, luego de lo cual se vertió una cantidad específica sobre un portaobjetos. Los portaobjetos se introdujeron en el horno a 100 °C hasta lograr una película homogénea de asfalto. Las muestras de agregado se obtuvieron a partir de piedra bruta, la cual fue rebanada y pulida hasta lograr una superficie lisa y homogénea. Las muestras fueron lavadas con agua destilada en el baño ultrasónico durante 1 hora y colocadas en el horno a 100 °C durante al menos dos horas para asegurar la remoción del agua. Las muestras de asfalto y agregado se mantuvieron a 20 °C en una desecadora hasta el momento de la medición.



**Figura 2.** a) Implementación del goniómetro; b) Ángulo de contacto

Dado que se produjeron superficies uniformes tanto de asfalto como de agregado, es posible medir el ángulo de contacto formado entre cada superficie y una gota de líquido de prueba, de acuerdo a la Figura 2b. (Little y Bhasin, 2006; Arabani y Hamedí, 2011; Wei y Zhang, 2012; Aguiar-Moya et al., 2015). La relación matemática entre el ángulo de contacto y energía superficial está dada por la ecuación de Young-Dupré (Ecuación 1).

$$\gamma_l^T (1 + \cos\theta_{sl}) = 2\sqrt{\gamma_l^{LW}\gamma_s^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_l^+\gamma_s^-} + 2\sqrt{\gamma_l^-\gamma_s^+} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde los subíndices  $l$  y  $s$  se refieren al líquido y al sólido,  $\theta_{sl}$  es el ángulo de contacto formado entre el sólido y la gota del líquido,  $\gamma_l^T$  es la energía superficial total del disolvente empleado,  $\gamma^{LW}$ ,  $\gamma^+$  y  $\gamma^-$  son los componentes dispersivo, ácido y básico de la energía superficial, respectivamente. Dado que la Ecuación 1 tiene tres incógnitas (correspondientes a los componentes de la energía superficial del sólido), es necesario emplear un mínimo de tres disolventes para obtener un sistema de tres ecuaciones que pueda ser resuelto con una matriz (Hefer, Bhasin y Little, 2006; Arabani y Hamedí, 2011; Wei y Zhang, 2012; Nejad, Hamedí y Azarhoosh, 2013).

El trabajo de adhesión,  $W_{AB}$ , entre el asfalto y el agregado se obtiene a partir del valor de los componentes de la energía superficial, según la Ecuación 2.

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_l^{LW}\gamma_s^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_l^+\gamma_s^-} + 2\sqrt{\gamma_l^-\gamma_s^+} \quad (\text{Ecuación 2})$$

El trabajo de adhesión representa la energía necesaria para separar al asfalto de la superficie del agregado. Por lo tanto, un valor alto de trabajo de adhesión implica una mejor interacción entre ambos materiales.

De manera similar a la (Ecuación 2 Ecuación 2, las interacciones agregado-agua ( $W_{AW}$ ) y asfalto-agua ( $W_{BW}$ ) se obtienen a partir de la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

$$W_{AW} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_W^+} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$W_{BW} = 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_W^+} \quad (\text{Ecuación 4})$$

En estos casos, los parámetros  $W_{AW}$  y  $W_{BW}$  representan la compatibilidad del agregado y el asfalto, respectivamente, con el agua. Aquellos materiales que posean valores mayores de  $W_{AW}$  o  $W_{BW}$  tendrán interacciones más favorables con el agua y, por lo tanto, podrían resultar más susceptibles ante el daño por humedad.

Un parámetro importante que cuantifica la sensibilidad de cierta combinación asfalto-agregado ante el daño por humedad es el trabajo de desplazamiento,  $W_{wet}$  (Ecuación 5).

$$W_{wet} = \gamma^A + \gamma^B - \gamma^{AB} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde  $\gamma^A$  es la energía superficial total del agregado,  $\gamma^B$  es la energía superficial total del asfalto y  $\gamma^{AB}$  es la energía de la interfaz agregado-asfalto.

El trabajo de desplazamiento es la energía que se libera al separarse la interacción entre el asfalto y el agregado por efecto del agua. Se considera que el fenómeno de desplazamiento es termodinámicamente desfavorable si la cantidad de energía liberada es baja, es decir, si el valor de  $W_{wet}$  es bajo. De esta forma, una combinación asfalto-agregado con bajo  $W_{wet}$  tenderá a ser menos sensible al desplazamiento del asfalto de la superficie del agregado (desnudamiento).

Little y Bhasin (2006) combinaron el trabajo de adhesión y el de desplazamiento en un solo parámetro llamado Razón de Energía (ER, del inglés Energy Ratio) (Ecuación 6).

$$ER_1 = W_{AB}/W_{wet} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Se considera que dada combinación agregado-asfalto será resistente al daño por humedad (desnudamiento) si el valor obtenido de  $W_{AB}$  es alto,  $W_{wet}$  es bajo y el valor resultante de ER1 es alto

(mayor de 0.8). Un valor alto de  $W_{AB}$  implica que la interacción entre los componentes es alta y difícil de romper. Por otro lado, como se mencionó previamente, un valor bajo de  $W_{wet}$  implica que el desplazamiento del asfalto de la superficie del agregado por efecto del agua no es favorable, por lo que no se daría con facilidad.

Al incluir la cohesión del ligante asfáltico ( $W_{BB}$ ) en la Ecuación 6 surge otro parámetro (Ecuación 7) que toma en cuenta la capacidad del mismo para difundirse y recubrir correctamente la superficie del agregado.

$$ER_2 = |W_{AB} - W_{BB} / W_{wet}| \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde  $W_{BB}$  está dado por

$$W_{BB} = 2\gamma^B \quad (\text{Ecuación 8})$$

La cohesión representa las interacciones químicas que tienen lugar en el asfalto. Un material altamente cohesivo (alto  $W_{BB}$ ) es un material cuyas interacciones intramoleculares son fuertes.

Al igual que con  $ER_1$ , las combinaciones con un valor de  $ER_2$  por encima de 0.8 se consideran adecuadas y con una menor susceptibilidad al daño por humedad.

## 2.5. Diseño de la mezcla asfáltica

Se diseñaron y prepararon dos grupos de mezcla asfáltica, con base en dos fuentes de agregado tipo grava: 10 mezclas se diseñaron con la Grava 1, y 9 mezclas se prepararon con la Grava 2. Los asfaltos utilizados en las mezclas corresponden al asfalto 1 modificado con los aditivos especificados en la Tabla 2. Asfaltos modificados (objetivo 1). El asfalto 1 sin modificar se mantuvo como control. Cada grupo de muestras se diseñó con dos granulometrías diferentes: 9.5 y 12.5 NMMAS (del inglés Nominal Maximum Aggregate Size). Las granulometrías, así como las propiedades volumétricas de las mezclas resultantes se enlistan en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

**Tabla 3.** Granulometría de las mezclas

Malla	% Pasando			
	Grava 1		Grava 2	
	9.5 NMAS	12.5 NMAS	9.5 NMAS	12.5 NMAS
3/4"	100	100	100	100
1/2"	100	95.4	100	95.9
3/8"	95.0	78.3	94.7	84.7
N° 4	60.0	43.3	49.0	48.5
N° 8	40.0	28.9	32.7	32.6
N° 16	25.0	20.0	22.5	22.4
N° 30	17.0	14.8	16.0	16.0
N° 50	10.0	10.9	11.4	11.4
N° 100	7.0	8.0	7.8	7.9
N° 200	5.0	5.8	5.6	5.6

**Tabla 4.** Propiedades volumétricas de las mezclas

Agregado	Mezcla	% Asfalto	% VMA	% Vacíos	% VFA	Razón polvo/asfalto
1 (9.5 NMAS)	Control	6.5	15.5	4.0	73.7	1.0
	2% SBS	6.5	15.8	4.1	74.3	1.0
	2%SBS+1%Cal	6.6	16.0	4.1	74.4	1.0
	1% Cal	6.7	16.3	4.2	74.4	0.9
	0.5% LAS	6.5	15.9	4.0	72.7	1.0
1 (12.5 NMAS)	Control	7.0	15.8	4.0	74.5	1.1
	2% SBS	6.5	15.1	4.0	73.3	1.2
	2%SBS+1%Cal	6.3	14.3	4.0	72.0	1.3
	1% Cal	6.0	14.0	4.0	71.5	1.3
	0.5% LAS	6.5	14.7	4.0	72.7	1.2
2 (9.5 NMAS)	Control	6.6	15.6	4.0	74.5	1.1
	2% SBS	6.6	15.6	4.0	74.5	1.1
	2%SBS+1%Cal	6.5	15.5	4.0	74.0	1.1
	1% Cal	6.5	15.6	4.0	74.4	1.1
	0.5% LAS	6.4	15.2	4.0	73.8	1.1
2 (12.5 NMAS)	Control	6.2	14.9	4.0	73.3	1.2
	2% SBS	6.2	14.7	4.0	72.9	1.2
	2%SBS+1%Cal	5.9	14.4	4.0	72.6	1.3
	1% Cal	5.9	14.5	4.0	72.2	1.3
	0.5% LAS	6.1	14.5	4.0	72.1	1.2

## 2.6. Módulo dinámico

Con el objetivo de simular de forma agresiva el daño por humedad en las mezclas, éstas se expusieron a 1, 3 y 6 ciclos de congelamiento/descongelamiento. Con este tipo de acondicionamiento se pretende simular la presión que se da dentro de la mezcla asfáltica debido al congelamiento y descongelamiento del agua dentro de la misma. Tal presión podría generar grietas en la película de asfalto, lo cual promueve el desnudamiento y facilita la entrada de agua a la interfaz agregado-asfalto (Stuart, 1990). Cada ciclo consistió en mantener los especímenes saturados a -18 °C durante 16 h, seguido por una inmersión en un baño de agua a 60 °C durante 24 h (AASHTO T283). Se determinó el módulo dinámico ( $E^*$ ) de los especímenes acondicionados y sin acondicionar (secos) con base en

AASHTO TP79 (2012). Los resultados permitieron la estimación de la razón  $E^*R$ , de acuerdo a la Ecuación 9. Un mayor detalle del ensayo puede consultarse en informes previos (Vargas-Nordbeck, Aguiar-Moya y Loría-Salazar, 2015).

$$E^*R = E^*(\text{acondicionado}) / E^*(\text{seco}) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Los múltiples ciclos de acondicionamiento, así como el uso de  $E^*R$  como indicador del potencial daño por humedad en mezclas asfálticas, han demostrado ser apropiados en la predicción del desempeño de las mezclas luego de ser expuestas a condiciones severas de humedad (Vargas-Nordbeck, et al., 2016). Por lo tanto, tales criterios se utilizaron en este estudio para evaluar la respuesta mecánica de las mezclas propuestas al ser expuestas al agua.

## 2.7. Ensayos reológicos

### 2.7.1. Multiple Stress Creep Recovery

El ensayo *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) se aplica en la caracterización del potencial de deformación del asfalto. Mediante este procedimiento se cuantifica la deformación (compliance),  $J_{nr}$ , así como la recuperación elástica que experimenta el asfalto tras ser sometido a varios ciclos de carga, cada uno seguido de un período de descanso. El parámetro  $J_{nr}$  cuantifica la deformación acumulada en el material que le impide regresar a su estado inicial. Por otro lado, la recuperación elástica es un indicador de la capacidad del asfalto de recuperar su condición original luego de la carga aplicada (D'Angelo, 2009).

El ensayo MSCR se lleva a cabo en un reómetro de corte dinámico utilizando asfalto envejecido térmicamente a corto plazo en el horno rotatorio de película delgada (RTFO). La temperatura utilizada corresponde a la temperatura alta del grado de desempeño para cada asfalto. Se emplea la geometría plato-plato de 25 mm, una frecuencia de 10 rad/s y una deformación del 10 %.

### 2.7.2. Fatiga

El ensayo de fatiga consiste en aplicar esfuerzo controlado a una muestra de asfalto mientras se monitorea el cambio resultante en el módulo dinámico. Una vez que el valor del módulo cae al 50 % de su valor inicial se considera que el material ha fallado y se contabiliza el número de ciclos para que tal falla ocurra.

Este ensayo se realiza en el reómetro de corte dinámico y se utilizan las muestras envejecidas a largo plazo en el horno de envejecimiento a presión (PAV) a la temperatura baja del grado de desempeño. Se utiliza la geometría plato-plato de 8 mm, una frecuencia de 10 rad/s y una deformación del 1 %.

### 3. Resultados y discusión

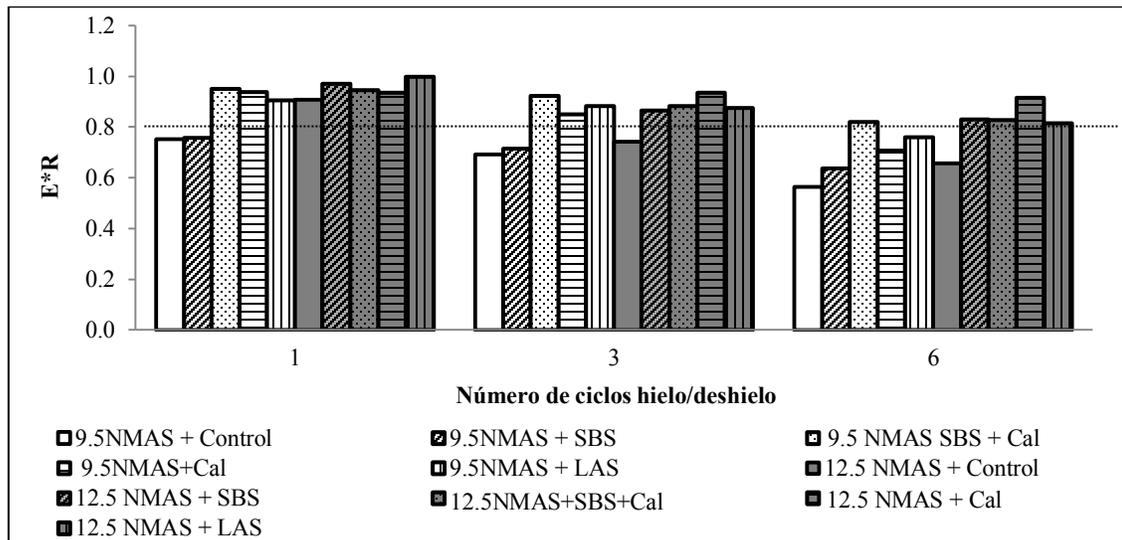
#### 3.1. Efecto de la compatibilidad asfalto-agregado sobre la susceptibilidad ante el daño por humedad de una mezcla asfáltica

El desnudamiento del asfalto es una de las etapas del daño por humedad en una mezcla asfáltica. Una de las razones por las que se da el desnudamiento es el debilitamiento de las interacciones entre el asfalto y el agregado por efecto del agua. La humedad debilita la interfaz existente entre ambos materiales, provocando una pérdida de adhesión y, por ende, el ligante se ve desplazado de la superficie del agregado. De esta forma, encontrar combinaciones agregado-asfalto que tengan buena compatibilidad y alta resistencia al desnudamiento es crucial para lograr la durabilidad del pavimento. Esta parte de la investigación busca analizar la compatibilidad de diversas combinaciones agregado-asfalto mediante ensayos fisicoquímicos y relacionar los resultados con el desempeño mecánico de mezclas asfálticas producidas a partir de estas combinaciones.

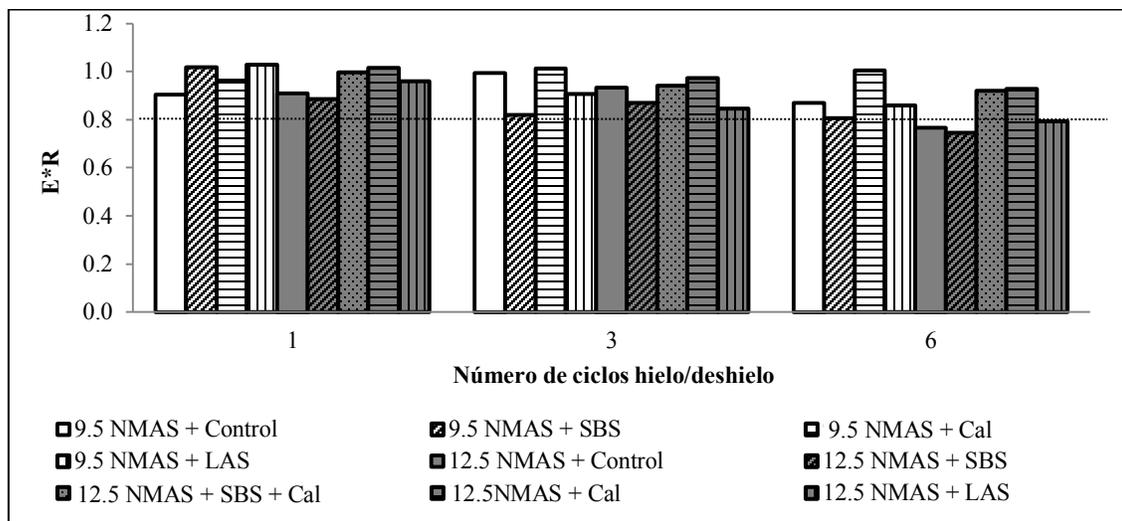
Los materiales utilizados en esta sección corresponden al asfalto 1 sin modificar y modificado según se describe en la Tabla 2 (objetivo 1). Los agregados utilizados fueron las Gravitas 1 y 2. Las pruebas mecánicas se realizaron a las mezclas asfálticas descritas en las Tablas 3 y 4.

##### 3.1.1. Comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas

La razón de módulo dinámico ( $E^*R$ ) (Ecuación 9) obtenida para las mezclas asfálticas propuestas y los distintos ciclos de acondicionamiento se ilustra en la Figura 3.



a)



b)

**Figura 3.** E\*R de mezclas asfálticas producidas con a) Grava 1 y b) Grava 2

Los datos de E\*R fueron calculados a 20 °C y 10 Hz, ya que se considera que estas condiciones son las típicas a las que opera un pavimento. Además, se busca establecer una concordancia entre estos valores y los de la energía superficial, los cuales se obtienen a 20 °C.

Es importante resaltar que cuando una mezcla asfáltica exhibe un valor de E\*R por debajo de 0.8 presenta una mayor susceptibilidad al daño por humedad. Con base en esto, es posible observar que la mayoría de las mezclas producidas con la Grava 2 tienen valores de E\*R superiores a 0.8, incluida la mezcla de asfalto control, lo cual sugiere que estas mezclas podrían mostrar un mejor desempeño en

presencia de agua. Por otro lado, de las mezclas producidas con la Grava 1, las combinaciones que involucran al asfalto control y al modificado con SBS (9.5 NMAS) presentan E\*R por debajo de 0.8, por lo que podrían resultar más susceptibles.

De forma general, se observa que los aditivos logran un aumento en el E\*R de las mezclas cuando se compara con la mezcla de control. Además, las mezclas producidas con los asfaltos modificados mostraron E\*R superior a 0.8, lo cual las hace menos propensas al daño por humedad.

Con respecto a los ciclos sucesivos de acondicionamiento, se observó que los asfaltos modificados, particularmente los modificados con Cal y con LAS (aditivos considerados como antidesnudentes), mostraron una alta resistencia a la humedad, ya que los valores de E\*R obtenidos luego de 6 y 9 ciclos de hielo y deshielo supera en muchos casos el valor límite de 0.8. Con respecto a los acondicionamientos, es posible notar en la Figura 3 que la Grava 2 produce mezclas más resistentes que la Grava 1, para las cuales hay una mayor pérdida de módulo para la granulometría 9.5 NMAS. Estos resultados sugieren que la Grava 2 es más adecuada para obtener mezclas asfálticas más resistentes a la humedad. Sin embargo, como se explicará en las siguientes secciones, estas diferencias no sólo se deben al diseño de mezcla, sino a la compatibilidad química entre los materiales involucrados y el agua.

### 3.1.2. Parámetros fisicoquímicos relacionados con el daño por humedad

Los valores obtenidos de energía superficial para los materiales utilizados, así como los líquidos de prueba empleados en la medición de la energía superficial se enlistan en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Energía superficial de los materiales

Material	Identificación	$\gamma^T$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^{LW}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^+$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^-$ (mJ/m <sup>2</sup> )
Líquido de prueba*	Agua	72.8	21.8	65.0	10.0
	Glicerina	64.0	34.4	16.9	12.9
	Etilenglicol	48.0	31.4	1.58	42.5
	Formamida	58.0	35.6	1.95	65.7
Asfalto	Control	15.6	11.3	4.17	1.14
	2% SBS	15.9	12.8	3.69	0.669
	2% SBS + 1% Cal	15.9	12.1	3.29	1.12
	1% Cal	24.4	24.0	0.536	0.0829
	0.5% LAS	28.7	28.7	0.0213	0.00
Agregado	Grava 1	27.9	15.0	6.91	5.99
	Grava 2	14.9	6.35	7.26	2.51

\*basado en la escala de Della Volpe (1997).

A partir de los valores de energía superficial de la Tabla 5 se calcularon los parámetros fisicoquímicos descritos por las Ecuaciones 2; 5; 7 y 8. Los resultados están encontrados en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros fisicoquímicos de las combinaciones agregado-asfalto

Asfalto	$W_{BB}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	Grava 1			Grava 2		
		$W_{AB}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$W_{wet}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	ER <sub>2</sub>	$W_{AB}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$W_{wet}$ (mJ/m <sup>2</sup> )	ER <sub>2</sub>
Control	31.3	41.7	33.5	8.3	29.2	42.7	0.05
2% SBS	31.8	41.4	36.0	8.3	28.5	44.8	0.07
2% SBS + 1% Cal	31.9	41.4	33.7	7.8	29.0	43.0	0.07
1% Cal	48.9	43.1	41.4	5.5	28.6	48.6	0.42
0.5% LAS	57.4	42.4	44.3	15.6	27.7	51.3	0.58

Es importante recordar que el valor de trabajo de adhesión,  $W_{AB}$ , debe ser lo más alto posible y el valor del trabajo de desplazamiento,  $W_{wet}$ , lo más bajo posible de forma que se obtengan valores de ER<sub>2</sub> superiores a 0.8. Los resultados en la Tabla 6 muestran que el  $W_{AB}$  no se ve afectado por la presencia de los aditivos, puesto que muestra poca variación. Por el contrario, se observa que el valor de  $W_{wet}$  parece ser afectado en mayor medida por los aditivos (principalmente los antidesnudantes, cal y LAS), los cuales aumentan el  $W_{wet}$ , siendo esto lo menos conveniente pues implica un aumento en la compatibilidad del ligante y el agua. Sin embargo, al combinar ambos parámetros en ER<sub>2</sub>, se observa que la mayoría de las combinaciones hechas con asfaltos modificados muestran valores de ER<sub>2</sub> superiores a aquellas hechas con asfalto control. Particularmente, las combinaciones que involucran asfalto modificado con LAS muestran los valores de ER<sub>2</sub> más altos: se observa que el ER<sub>2</sub> aumentó dos y diez veces con respecto al asfalto control, al ser combinado con la Grava 1 y la Grava 2, respectivamente. Una posible explicación a este comportamiento estaría dada por la alta cohesión interna ( $W_{BB}$ ) de estos asfaltos: al poseer moléculas con interacciones intermoleculares más fuertes se espera que bloqueen el paso del agua de una forma más eficiente. Por otro lado, es importante resaltar que las combinaciones que involucran SBS no mostraron mejora alguna a la resistencia al daño por humedad del ligante.

Los resultados de ER<sub>2</sub> para ambas gravas sugieren que las combinaciones producidas con la Grava 1 tengan una resistencia al desnudamiento superior a aquellas producidas con la Grava 2. Es necesario señalar que los parámetros mostrados en la Tabla 6 son un indicativo de la facilidad con la que el asfalto será desplazado de la superficie del asfalto en presencia del agua (desnudamiento), dado que tales parámetros describen la calidad de la interfaz agregado-agregado tanto en estado seco como húmedo. Sin embargo, el desnudamiento es sólo uno de los muchos mecanismos de deterioro que le ocurren a una mezcla asfáltica expuesta a condiciones de humedad. Por lo tanto, es necesario utilizar

otros parámetros para describir el comportamiento de la mezcla bajo tales condiciones, como se explicará en la siguiente sección.

### 3.1.3. Relación entre la aproximación fisicoquímica y el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica

La falla de una mezcla asfáltica expuesta a la humedad se da por el deterioro del mastic (mezcla de asfalto y finos del agregado) ocasionado por el agua. A su vez, la compatibilidad que tengan los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica con el agua podría determinar la susceptibilidad de la misma al daño por humedad.

La medición del módulo de los especímenes antes y después del acondicionamiento muestra que las mezclas asfálticas producidas con la Grava 1 tuvieron una pérdida en el módulo de 33.7 % en promedio, mientras que para las mezclas con Grava 2 la pérdida fue de 16.8 %. Estos datos sugieren que la Grava 2 tendrá una resistencia superior en cuanto al deterioro por humedad. Sin embargo, los parámetros fisicoquímicos de la Tabla 6 muestran lo contrario. Los resultados opuestos indican que el desnudamiento (descrito por los parámetros de la Tabla 6) no es el mecanismo de deterioro principal en las mezclas, por lo que la falla no puede aproximarse o predecirse a partir de  $W_{AB}$ ,  $W_{wet}$  o  $ER_2$  solamente. Para ilustrar esto los valores de  $E^*R$  se relacionaron con  $ER_2$  en la Figura 4.

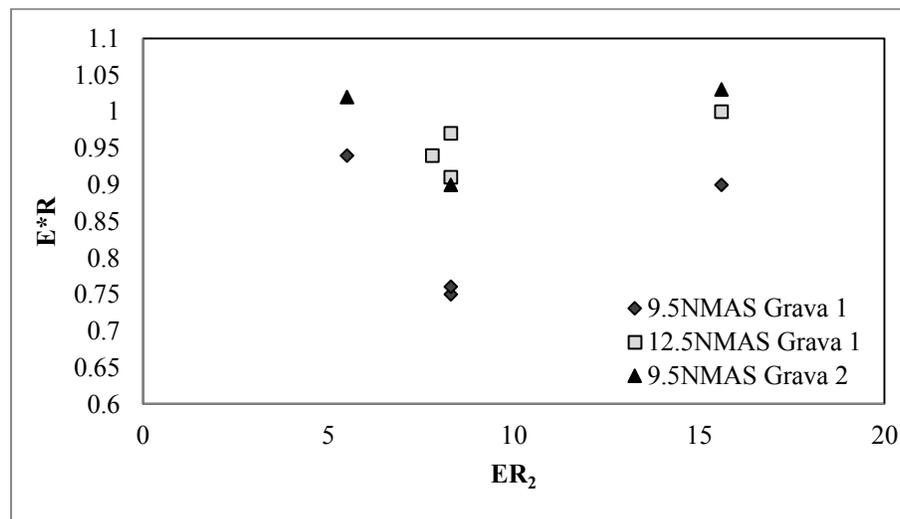


Figura 4. Relación entre  $E^*R$  y  $ER_2$  para las combinaciones agregado-asfalto propuestas

De acuerdo a la Figura 4 es posible observar que no existe una relación entre el valor de  $E^*R$  y el de  $ER_2$ , es decir, no es posible establecer una relación entre el deterioro mecánico que experimentan los especímenes de las mezclas asfálticas propuestas y los parámetros descriptores de susceptibilidad al

desnudamiento. Lo anterior responde a que, como se mencionó previamente, los parámetros  $W_{AB}$ ,  $W_{wet}$  y  $ER_2$  son un indicativo de la calidad de la interfaz agregado-asfalto y de su comportamiento en condiciones húmedas, por lo que representan una medida de la susceptibilidad del asfalto a ser desplazado de la superficie del agregado. Dado que en una mezcla asfáltica expuesta a la humedad existen muchos otros mecanismos de falla además del desnudamiento (Caro et al., 2008), se considera necesario evaluar la efectividad de otros parámetros en la cuantificación de la susceptibilidad de las mezclas al deterioro en presencia del agua. En este sentido, la compatibilidad tanto del asfalto como del agregado con el agua se plantea como un mejor indicador de la susceptibilidad de estos materiales a fallar en condiciones húmedas (Baldi-Sevilla, et al., 2016b). Se espera que un material más compatible con el agua presente una mayor interacción con ésta, por lo que podría aumentar la vulnerabilidad de la mezcla asfáltica al permitir el fácil ingreso de humedad en el sistema. Para estudiar este efecto se cuantificó  $W_{AW}$  y  $W_{BW}$  de los materiales en cuestión, los resultados se enlistan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Indicadores de compatibilidad,  $W_{AW}$  y  $W_{BW}$

Material	$W_{BW}$ (erg/cm <sup>2</sup> )	$W_{AW}$ (erg/cm <sup>2</sup> )
Control	61.5	-
2% SBS	58.7	-
2% SBS + 1% Cal	61.0	-
1% Cal	55.0	-
0.5% LAS	51.4	-
Grava 1	-	92.3
Grava 2	-	66.2

Partiendo de que la absorción de agua por parte del mastic está relacionada con la falla de la mezcla asfáltica, se espera que los materiales con mayor compatibilidad con el agua sean más vulnerables. De esta forma, es posible observar en la Tabla 7 que la Grava 1 tiene una mayor compatibilidad con el agua que la Grava 2 (mayor  $W_{AW}$ ), lo cual explica el bajo desempeño mecánico de las mezclas asfálticas producidas con este agregado, comparado con las producidas con la Grava 2. Estos resultados sugieren que la compatibilidad del agregado con el agua dicta la respuesta mecánica final de la mezcla en mayor medida de la que lo hace el asfalto, lo cual es consistente con investigaciones previas (Zhang et al., 2015; Baldi-Sevilla, 2015; Baldi-Sevilla et al., 2016a).

Al comparar el desempeño de las mezclas producidas con el mismo agregado y distintos asfaltos es posible notar ciertas diferencias, las cuales pueden ser explicadas a partir de la compatibilidad del asfalto con el agua,  $W_{BW}$ . Según la Tabla 7, los asfaltos modificados con Cal y con LAS tienen una menor compatibilidad (menor  $W_{BW}$ ) con el agua, con lo cual se justifica que las

mezclas producidas con estos asfaltos hayan mostrado un desempeño superior en las pruebas mecánicas, incluso después de que las mismas hayan sido expuestas a varios ciclos de hielo/deshielo.

### 3.2. Influencia de la polaridad del asfalto y del agregado sobre la adhesión interfacial

Durante la producción de una mezcla asfáltica la superficie del agregado es recubierta por una película de asfalto, por lo que se forma una interfaz agregado-asfalto. La calidad de esta interfaz está establecida por las características fisicoquímicas de la superficie de ambos materiales y es determinante en el comportamiento de la mezcla asfáltica ante el daño por humedad; una interfaz agregado-asfalto de mala calidad implica una mayor susceptibilidad al desnudamiento. Para analizar el efecto de la polaridad sobre la adhesión y la susceptibilidad a la humedad de materiales asfálticos, se cambió la polaridad de los asfaltos a partir de la modificación del mismo. Estos asfaltos se combinaron con distintas fuentes de agregado y se caracterizó sus propiedades de superficie.

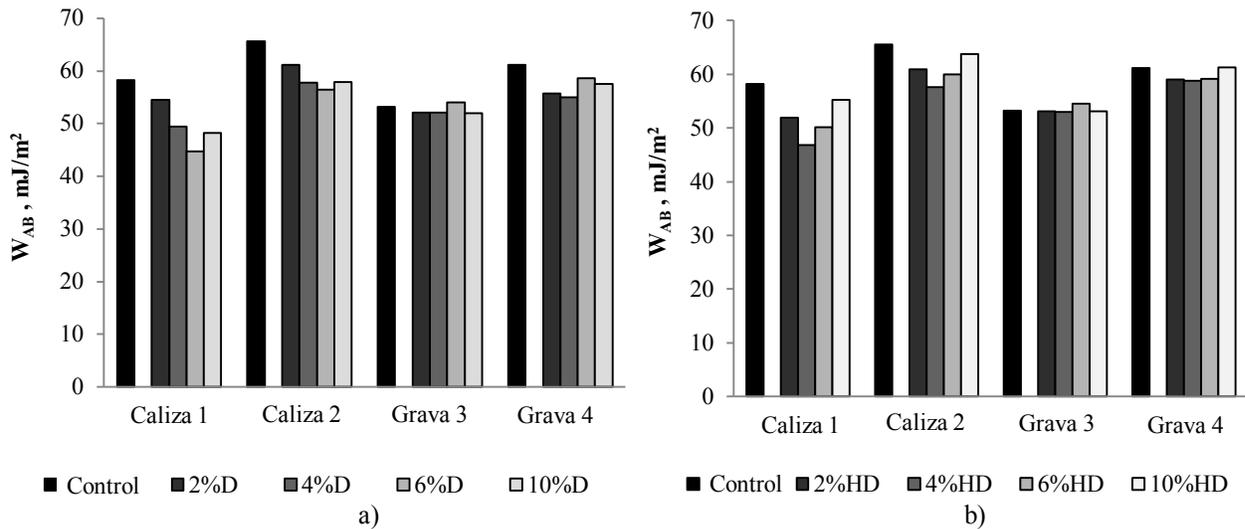
Los materiales utilizados en esta sección corresponden al asfalto 2 modificado con diatomita y diatomita hidrófoba, como se indica en la Tabla 2 (objetivo 2). Las fuentes de agregado utilizadas fueron las Gravas 3 y 4 y las Calizas 1 y 2. La energía superficial de los asfaltos y agregados utilizados en esta sección se enlistan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Caracterización fisicoquímica de asfaltos y agregados

Material	Energía superficial (mJ/m <sup>2</sup> )				
	$\gamma^T$	$\gamma^{LW}$	$\gamma^{AB}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$
Control	20.1	19.0	1.03	0.128	2.07
2% Diatomita	17.5	16.7	0.836	0.0380	4.59
4% Diatomita	15.0	11.8	3.15	0.521	4.76
6% Diatomita	13.2	6.94	6.26	2.93	3.35
10% Diatomita	14.0	10.2	3.81	1.31	2.78
2% Diatomita Hidrófoba	15.9	12.9	3.02	0.790	2.88
4% Diatomita Hidrófoba	13.3	8.63	4.69	2.12	2.59
6% Diatomita Hidrófoba	15.4	11.0	4.42	1.27	3.84
10% Diatomita Hidrófoba	17.6	15.7	1.95	0.536	1.82
Caliza 1	42.1	39.4	2.77	0.226	8.49
Caliza 2	54.7	46.9	27.9	0.572	26.5
Grava 3	51.2	23.3	3.77	5.87	33.2
Grava 4	44.1	40.3	7.79	0.0710	50.2

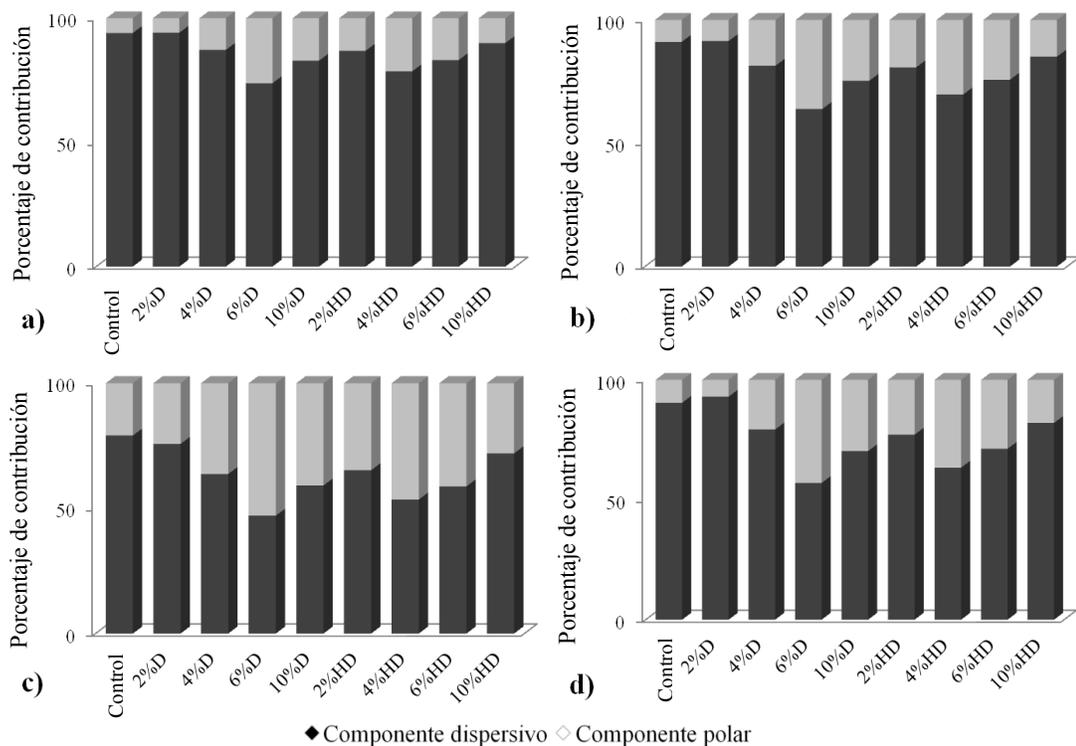
Los datos de la Tabla 8 muestran que la adición de diatomita y diatomita hidrófoba alteran de manera efectiva la polaridad de los asfaltos, el valor del componente dispersivo disminuye y el componente polar aumenta. Esto es esperable puesto que la diatomita es una partícula polar, incluso la diatomita hidrófoba pues su superficie no fue modificada en su totalidad. Por esta razón, los asfaltos modificados con estos aditivos presentan, en general, una mayor polaridad.

Las variaciones en la energía superficial de los asfaltos afectan directamente los valores de trabajo de adhesión,  $W_{AB}$ , y de trabajo de desplazamiento,  $W_{wet}$ . En el caso del  $W_{AB}$ , los resultados se ilustran en la Figura 5.



**Figura 5.** Trabajo de adhesión ( $W_{AB}$ ) para las combinaciones de las fuentes de agregado y asfalto modificado con a) diatomita (D) y b) diatomita hidrófoba (HD) (la columna que representa el asfalto control está separada para facilitar su identificación)

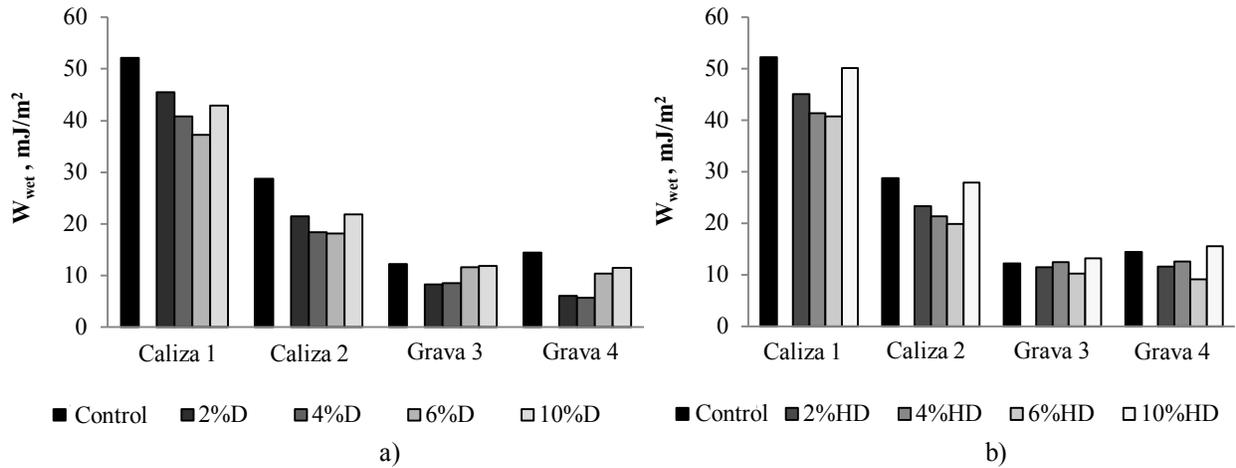
De acuerdo a la Figura 5 el  $W_{AB}$  disminuye para los asfaltos modificados, lo cual indica que los cambios en la energía superficial introducidos por la diatomita y la diatomita hidrófoba afectan la adhesión con el agregado. A manera de comprender este comportamiento, la contribución de los componentes dispersivo y polar al trabajo de adhesión se ilustra en la Figura 6, en la que se observa que, en general, el componente dispersivo contribuye en mayor medida a la adhesión del asfalto. Dado que el asfalto es el adhesivo en una mezcla asfáltica, varias teorías de adhesión se han propuesto (Little y Jones, 2003), entre ellas, se ha reconocido el hecho de que las interacciones de Van der Waals o dispersivas están estrechamente relacionadas a la adhesión entre el ligante y el agregado (Apeageyi, Grenfell, y Airey, 2014), lo cual es consistente con los datos mostrados en la Figura 6.



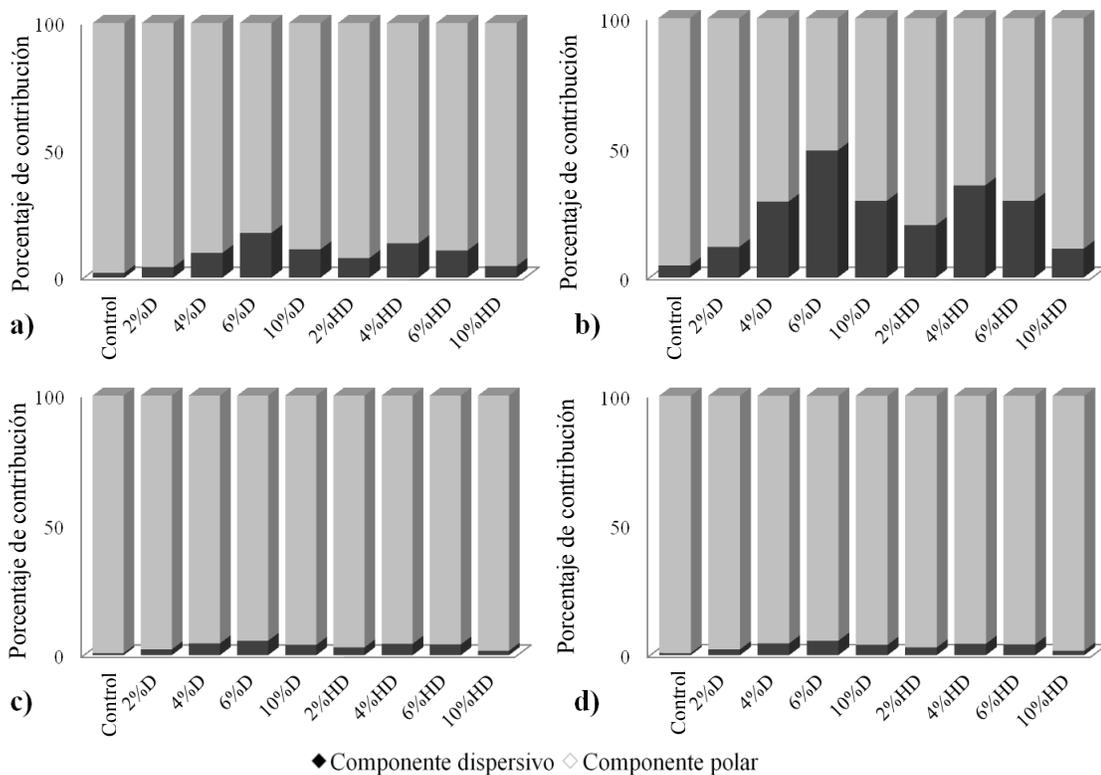
**Figura 6.** Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de adhesión para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4

La Figura 7 muestra los resultados del trabajo de desplazamiento,  $W_{wet}$ , para las combinaciones propuestas. Es posible observar que los aditivos ocasionan una disminución en el  $W_{wet}$ , lo cual implica que el proceso de desnudamiento del asfalto por efecto del agua se ve menos favorecido. Debido a que los asfaltos modificados tienen una mayor polaridad que el asfalto control, puede inferirse con base en los resultados que un aumento en la polaridad ocasiona la reducción en el trabajo de desplazamiento. Para ilustrar esto, el porcentaje de contribución de los componentes dispersivo al  $W_{wet}$  se ilustra en la Figura 8, donde se puede observar que el componente polar es el mayor contribuyente al desplazamiento, por lo que  $W_{wet}$  será más sensible a los cambios en la polaridad del bitumen.

Es importante resaltar la influencia de los agregados sobre el trabajo de desplazamiento, se observan grandes diferencias entre las combinaciones producidas con las distintas fuentes de agregado. Se profundizará en este punto más adelante.

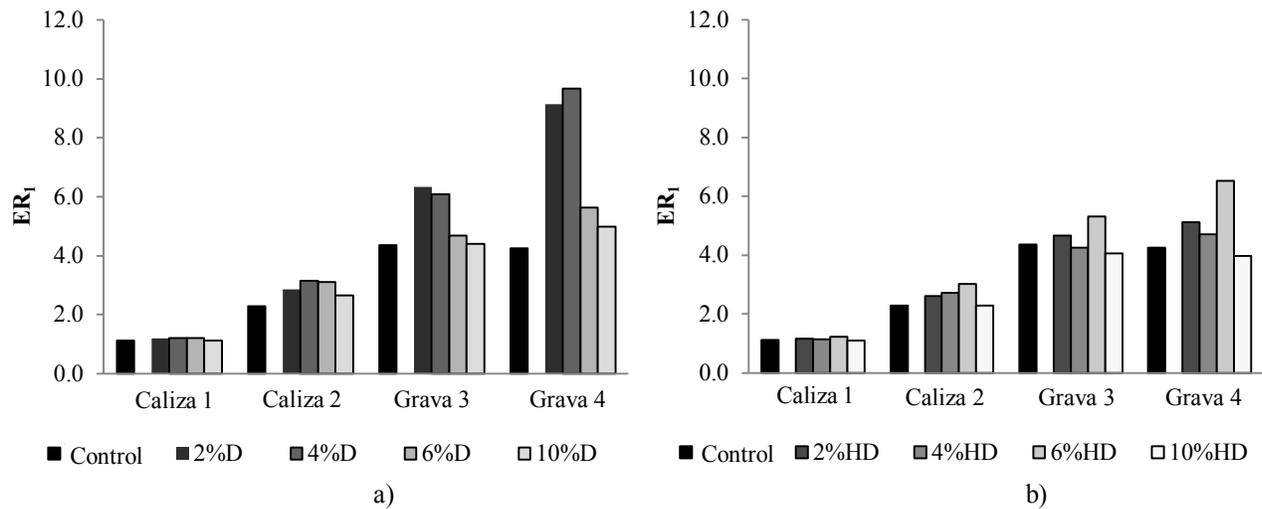


**Figura 7.** Trabajo de desplazamiento para las combinaciones de agregado y asfalto modificado con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba



**Figura 8.** Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de desplazamiento para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4

En esta sección, el parámetro  $ER_1$  es utilizado para cuantificar la resistencia al desnudamiento de las distintas combinaciones agregado-asfalto. Los resultados se ilustran en la Figura 9.

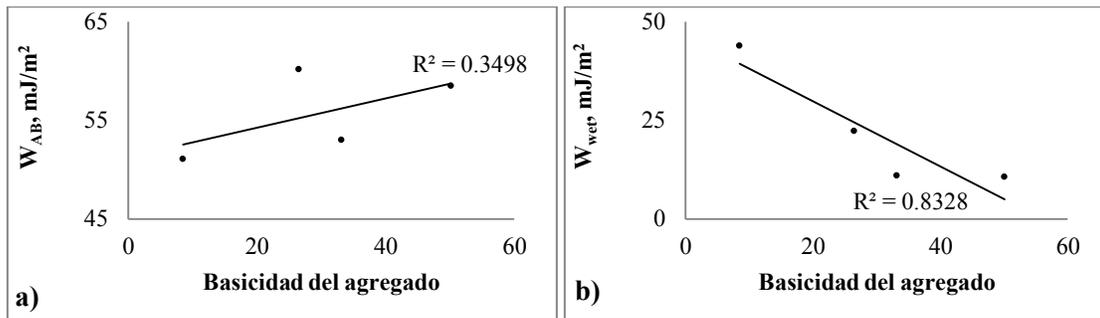


**Figura 9.** Razón de Energía ( $ER_1$ ) de los pares de agregado y los asfaltos modificados con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba

Es necesario recordar que el valor de  $ER_1$  debe ser alto para que la combinación agregado-asfalto sea considerada como adecuada. Al respecto, dado que  $ER_1$  es la razón entre el  $W_{AB}$  y el  $W_{wet}$ , es posible afirmar que la durabilidad de la interfaz agregado-asfalto estará dada por la calidad de la adhesión entre ambos materiales en estado seco, así como por su resistencia a la humedad. A partir de los datos de la Figura 9 es posible afirmar que los aditivos mejoran la durabilidad de la interfaz agregado-asfalto puesto que las combinaciones que involucran asfaltos modificados exhiben valores altos de  $ER_1$ , comparados con el asfalto control.

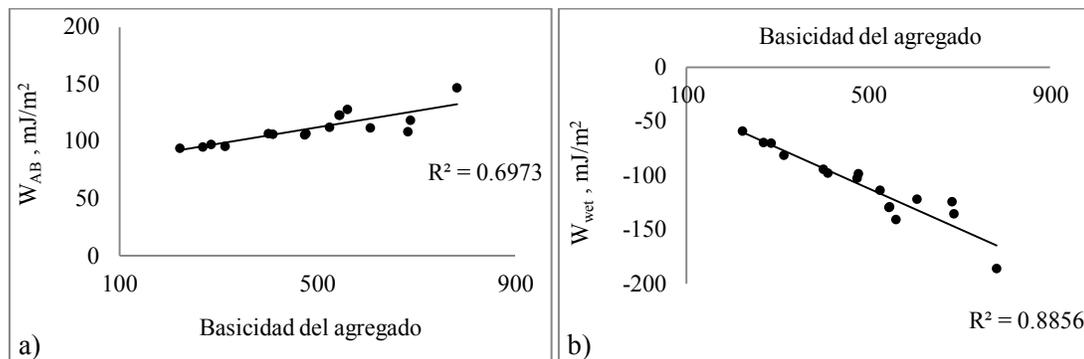
Es posible observar en la Figura 9 que existe un porcentaje óptimo de aditivo que produce el más alto valor de  $ER_1$ . En el caso de las combinaciones con diatomita, el contenido óptimo de ésta es del 4 % (excepto para las combinaciones con la Grava 3, para la cual el contenido óptimo corresponde al 2 %). Un porcentaje del 6 % de diatomita hidrófoba resulta óptimo para todos los agregados analizados. Estos resultados sugieren que el incremento continuo del contenido de aditivo no necesariamente implica una mejora de la durabilidad de la interfaz resultante.

De manera adicional, es importante señalar que los valores de  $W_{AB}$ ,  $W_{wet}$  y  $ER_1$  tienen diferentes magnitudes de acuerdo al agregado empleado. Se encontró que la razón de este comportamiento está relacionada con la basicidad del agregado, tal como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Efecto de la basicidad del agregado sobre a)  $W_{AB}$  y b)  $W_{wet}$

Las tendencias mostradas en la Figura 10 indican que los agregados con basicidad alta generan interfaces con una mejor adhesión y una menor tendencia al desnudamiento. Sin embargo, no es posible generalizar este comportamiento utilizando únicamente las cuatro fuentes de agregado empleadas a lo largo de esta sección. Por lo tanto, el mismo análisis se aplicó a varias fuentes de agregado cuyos datos de energía superficial se obtuvieron de una base de datos (Lytton et al., 2005) (Figura 11).



**Figura 11.** Efecto de la basicidad de los agregados de la base de datos sobre a)  $W_{AB}$  y b)  $W_{wet}$ . Los valores fueron calculados usando los asfaltos modificados con diatomita y diatomita hidrófoba

Las tendencias de la Figura 11 respaldan la observación de que los agregados con mayor basicidad producen interfaces de mayor calidad en términos de adhesión y desnudamiento. Al respecto, es importante resaltar que las Gravas 3 y 4 producen las combinaciones de mayor durabilidad (Figura 9), en comparación con las Calizas 1 y 2. Las gravas están compuestas principalmente por óxidos de silicio y aluminio, los cuales son minerales de naturaleza básica, mientras que las calizas están compuestas casi en su totalidad por carbonato de calcio (calcita), un mineral de menor basicidad que los óxidos de silicio y aluminio. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas, en las que se afirma que adicionar cal hidratada (un material básico) a los agregados antes de la producción

de una mezcla asfáltica mejora significativamente su resistencia al desnudamiento (Airey et al., 2008). De esta forma, los resultados sugieren que la basicidad del agregado (ligada a su mineralogía) es una propiedad importante que debe tomarse en cuenta durante la selección de materiales para pavimentos con durabilidad superior.

### **3.3. Efecto de la oxidación sobre la resistencia al daño por humedad de combinaciones asfalto-agregado**

La modificación del asfalto se realiza con el objetivo de mejorar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Sin embargo, con el paso del tiempo la oxidación que le ocurre al material altera estas propiedades y los aditivos podrían verse afectados. Entonces, con el objetivo de analizar la influencia del aditivo sobre la fisicoquímica del asfalto y su efecto sobre la oxidación, se produjeron asfaltos modificados con nanosílica y diatomita a distintos porcentajes. Una porción de los asfaltos fue envejecida y la porción restante se mantuvo como control. A todas las muestras se les realizó ensayos para evaluar su resistencia ante el daño por humedad, así como su respuesta mecánica. Los resultados mostraron que la presencia de los aditivos afecta las propiedades del asfalto mediante la modificación de las interacciones intermoleculares que tienen lugar en el material (cohesión). De igual forma, los aditivos tienen un efecto sobre el comportamiento del ligante ante la oxidación.

Los materiales utilizados en esta sección corresponden al asfalto 2 modificado con nanosílica y diatomita de acuerdo a la Tabla 2 (objetivo 3). La susceptibilidad al daño por humedad se evaluó al combinar los asfaltos con la Caliza 1.

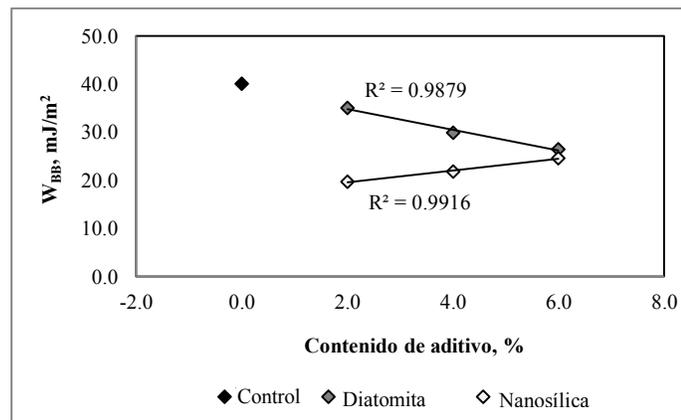
#### **3.3.1. Efecto de los aditivos y el envejecimiento sobre la energía superficial del asfalto**

La energía superficial del asfalto varía con la presencia de la nanosílica y la diatomita, así como con la oxidación. En la Tabla 9 se resumen los resultados.

**Tabla 9.** Energía superficial de los asfaltos (no envejecidos y oxidados) y del agregado calizo

	Material	$W_{BB}$ mJ/m <sup>2</sup>	$\gamma^T$ mJ/m <sup>2</sup>	$\gamma^{LW}$ mJ/m <sup>2</sup>	$\gamma^{AB}$ mJ/m <sup>2</sup>	$\gamma^+$ mJ/m <sup>2</sup>	$\gamma^-$ mJ/m <sup>2</sup>
Asfalto	Control	40.2	20.1	19.00	1.03	0.13	2.07
	Control oxidado	35.0	17.5	15.10	2.41	0.72	2.02
	2% Diatomita	35.0	17.5	16.70	0.84	0.04	4.59
	2% Diatomita oxidado	25.8	12.9	5.04	7.87	4.78	3.24
	4% Diatomita	30.0	15.0	11.80	3.15	0.52	4.76
	4% Diatomita oxidado	24.0	12.0	2.58	9.44	6.83	3.26
	6% Diatomita	26.4	13.2	6.94	6.27	2.93	3.35
	6% Diatomita oxidado	24.2	12.1	2.95	9.12	6.96	2.99
	2% Nanosilica	19.7	9.86	2.02	7.84	7.84	1.96
	2% Nanosilica oxidado	24.8	12.4	4.28	8.12	4.74	3.48
	4% Nanosilica	21.8	10.9	3.9	6.98	6.31	1.93
	4% Nanosilica oxidado	25.0	12.5	4.2	8.32	4.77	3.63
	6% Nanosilica	24.6	12.3	5.7	6.60	4.14	2.63
	6% Nanosilica oxidado	38.0	19.0	18.4	0.60	0.03	2.81
	Agregado	Caliza 1	-	42.1	39.4	2.77	0.226

De manera general se observa que los aditivos disminuyen la dispersividad ( $\gamma^{LW}$ ) y aumentan la polaridad ( $\gamma^{AB}$ ) del asfalto. Dado que ambos materiales son partículas polares, este aumento en la polaridad es esperable. En general, los aditivos provocan la disminución de la energía superficial total del asfalto, lo cual implica cambios en la cohesión del material. De hecho, la cohesión del asfalto varía de manera lineal con el contenido de aditivo (Figura 12).



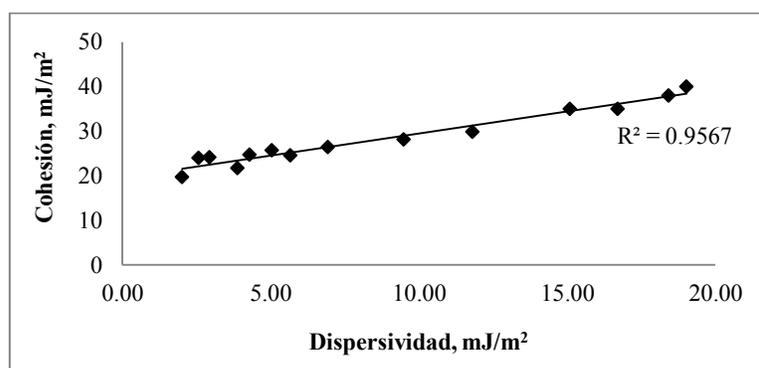
**Figura 12.** Influencia del contenido de aditivo sobre la cohesión del asfalto no envejecido.

De acuerdo a la Figura 12 los aditivos tienen un efecto contrario en la cohesión, un incremento en la cantidad de nanosilica causa un incremento lineal en la cohesión del asfalto. Lo contrario se observa con la diatomita, para la cual un aumento en su contenido implica una disminución lineal en cohesión. En general, ambos aditivos causan una disminución en las interacciones que originalmente tienen lugar en el asfalto, sin embargo, la continua adición de nanosilica parece restablecer estas

interacciones, lo cual se ve reflejado en un incremento en la cohesión. Por el contrario, la continua adición de diatomita debilita las interacciones, por lo que se observa una reducción en la cohesión.

La oxidación del asfalto afecta sus propiedades de superficie, en el caso del asfalto control se observa que el componente dispersivo disminuye y el polar (acidez) aumenta ligeramente, probablemente debido a los compuestos oxigenados formados con la oxidación. El resultado final es la reducción de la energía superficial total del asfalto. Con respecto a los asfaltos modificados con diatomita se observa la misma tendencia, sin embargo, la magnitud de las diferencias es considerablemente mayor. En este sentido, los resultados sugieren que la diatomita ocasiona que el asfalto sea más propenso a la oxidación, ya que causa un incremento drástico en la polaridad del mismo luego de que éste se ha envejecido. Por otro lado, la nanosílica causa que la energía superficial del asfalto aumente luego de la oxidación, mediante el aumento en los componentes dispersivo y polar.

Los cambios observados en los componentes de la energía superficial de los asfaltos tanto por la presencia de aditivos como por la oxidación repercuten directamente en la cohesión del material. En específico, se observó que el componente dispersivo está relacionado linealmente con la cohesión (Figura 13). Cabe resaltar que no se encontró ninguna relación entre los componentes ácido y básico y la cohesión resultante, por lo que se concluye que las interacciones dispersivas (del tipo Van der Waals que tienen lugar entre moléculas de escasa o nula polaridad) son determinantes en el asfalto. La observación anterior es razonable debido a que el asfalto es un material constituido por hidrocarburos, principalmente, por lo cual puede generalizarse que su naturaleza química es no polar.

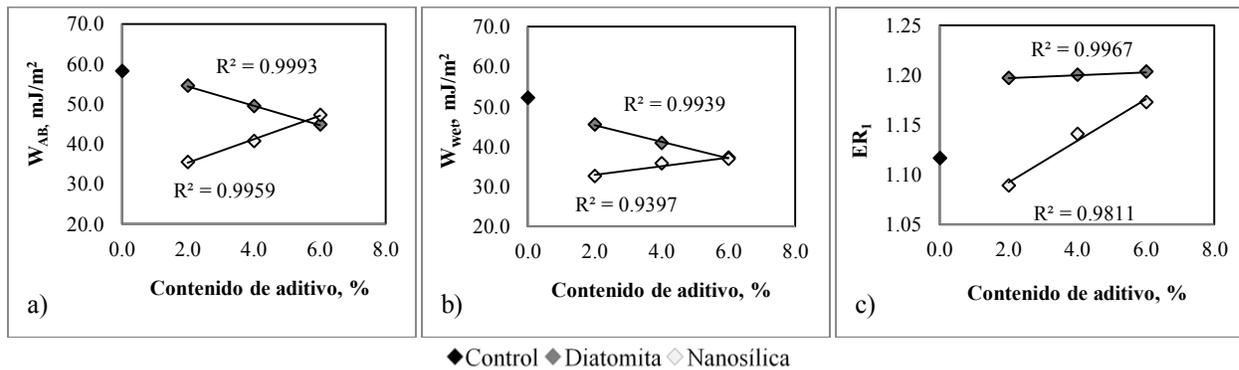


**Figura 13.** Cohesión del asfalto en función de la dispersividad

### 3.3.2. Efecto de los aditivos y la oxidación sobre la resistencia al daño por humedad

Las propiedades de superficie de los materiales para pavimentos dictan la calidad de la interfaz agregado-asfalto formada durante la producción de una mezcla asfáltica, la cual a su vez está

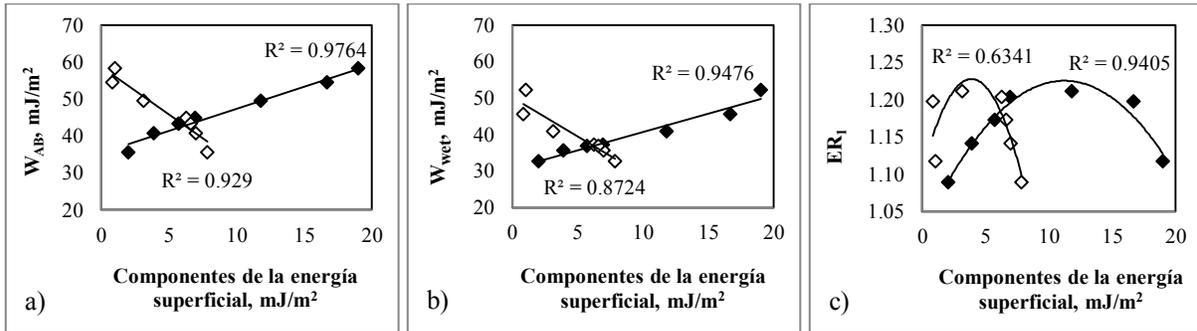
relacionada con el correcto desempeño de los materiales en condiciones de alta humedad. A partir de los datos de la Tabla 9. Energía superficial de los asfaltos (no envejecidos y oxidados) y del agregado calizo se obtuvieron los parámetros de trabajo de adhesión ( $W_{AB}$ ), trabajo de desplazamiento en presencia de agua ( $W_{wet}$ ) y razón de Energía ( $ER_1$ ), los cuales se consideran adecuados en la evaluación de la resistencia de las interfaces agregado-asfalto ante la humedad. Los resultados se muestran en la Figura 14.



**Figura 14.** Influencia del aditivo sobre a)  $W_{AB}$ ; b)  $W_{wet}$  y c)  $ER_1$  para las combinaciones asfalto-caliza 1

Recuérdese que para que una interfaz agregado-asfalto sea considerada como resistente a la humedad, el valor de  $W_{AB}$  debe ser alto,  $W_{wet}$  bajo y el  $ER_1$  resultante superar el valor de 0.8 (Aguilar-Moya et al., 2016a). De esta forma, los datos de la Figura 14.a muestran que tanto la diatomita como la nanosilica disminuyen la compatibilidad del asfalto control con el agregado calizo, lo cual se ve reflejado en un menor trabajo de adhesión. Por otra parte, tales aditivos ocasionan que el proceso de desplazamiento por efecto del agua sea menos favorable (Figura 14.b). En consecuencia, los valores de  $ER_1$  resultantes (Figura 14.c) son superiores para los asfaltos modificados (a excepción del asfalto con 2 % de nanosilica), para los cuales se observa que el valor de  $ER_1$  es más sensible a la presencia de nanosilica, puesto que el valor de este parámetro incrementa en mayor medida con la continua adición de este material, mientras que el contenido de diatomita parece no tener efecto sobre el valor de  $ER_1$ . Al respecto, es necesario señalar que las combinaciones que involucran asfalto modificado con diatomita producen interfaces agregado-asfalto de resistencia superior, tal y como lo muestran los altos valores de  $ER_1$  de estos asfaltos.

Las tendencias observadas en la Figura 14 pueden explicarse a partir de las características fisicoquímicas de la superficie de los asfaltos. Para ilustrar esto, los parámetros  $W_{AB}$ ,  $W_{wet}$  y  $ER_1$  se graficaron en función de los componentes de la energía superficial de los ligantes (Figura 15).

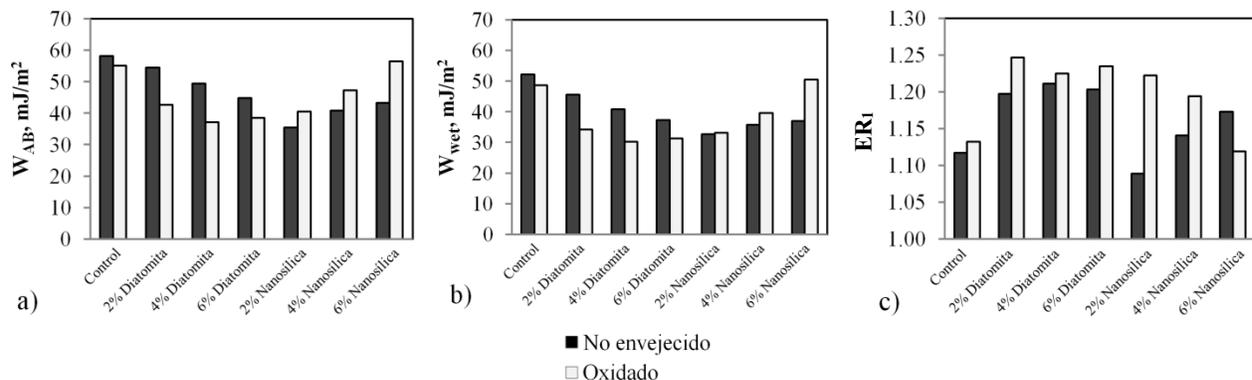


◆ Componente dispersivo ◇ Componente polar

**Figura 15.** Influencia de los componentes dispersivo ( $\gamma^{LW}$ ) y polar ( $\gamma^{AB}$ ) de la energía superficial del asfalto sobre a)  $W_{AB}$ , b)  $W_{wet}$  y c)  $ER_1$

En el caso del trabajo de adhesión (Figura 15.a), es posible notar que una alta dispersividad y una baja polaridad producen interfaces con fuerte adhesión con el agregado, lo cual sugiere que las interacciones dispersivas tienen una influencia importante en el proceso de adhesión. Por el contrario, en el caso del trabajo de desplazamiento (Figura 15.b), se observa que los asfaltos con baja dispersividad y alta polaridad hacen que el asfalto sea menos propenso a desnudar por causa del agua. Estos resultados sugieren que los valores de los componentes polar y dispersivo deben estar balanceados de forma que se obtengan interfaces con un correcto desempeño en presencia de humedad, lo anterior explica la tendencia observada para  $ER_1$  en la Figura 15.c.

Las transformaciones que ocurren en el ligante producto de la oxidación influyen en su energía superficial y, por lo tanto, afectan sus propiedades adhesivas en estado seco y húmedo. A manera de evaluar este efecto, en la Figura 16 se ilustra la variación de los parámetros fisicoquímicos con la oxidación del asfalto.



**Figura 16.** Efecto de la oxidación sobre a)  $W_{AB}$ , b)  $W_{wet}$  y c)  $ER_1$

De acuerdo a la Figura 16 la adhesión del asfalto control disminuye con la oxidación, de igual forma, disminuye la adhesión de las combinaciones que involucran asfalto modificado con diatomita. Sin embargo, en el caso de estas últimas se observa que la adhesión disminuye de forma más abrupta, lo cual indica que la diatomita hace que el asfalto sea más propenso al desnudamiento en estado seco. Los resultados se deben a un incremento en la polaridad del ligante debido a la presencia de diatomita, lo cual debilita la adhesión, como se puntualizó previamente. Lo contrario ocurre a los asfaltos modificados con nanosílica, para los cuales la adhesión incrementa tras la oxidación debido al aumento de la dispersividad en el asfalto. Esto último favorece la adhesión en estado seco, además se observa que la interacción entre el asfalto y el agregado no se vería comprometida en el tiempo. En el caso de las combinaciones con asfalto control y asfalto modificado con diatomita la magnitud del trabajo de desplazamiento disminuye tras la oxidación; para el asfalto modificado con nanosílica, aumenta. El efecto neto de estos cambios se refleja en valores de  $ER_1$  más altos para los asfaltos modificados, la adición de tanto diatomita como nanosílica produce interfaces fisicoquímicamente más resistentes, incluso tras la oxidación.

### 3.3.3. Efecto de los aditivos sobre la resistencia a la deformación y a la fatiga del asfalto

Los aditivos introducidos en el asfalto afectan sus propiedades mecánicas. Por esta razón, además de investigar el efecto de los mismos sobre la susceptibilidad a la humedad del ligante, es necesario analizar las repercusiones de la modificación en términos de desempeño mecánico del material. Para ello, se realizó ensayos de MSCR y fatiga a las muestras de asfalto para evaluar este aspecto. Los resultados del ensayo MSCR se ilustran en la Figura 17.

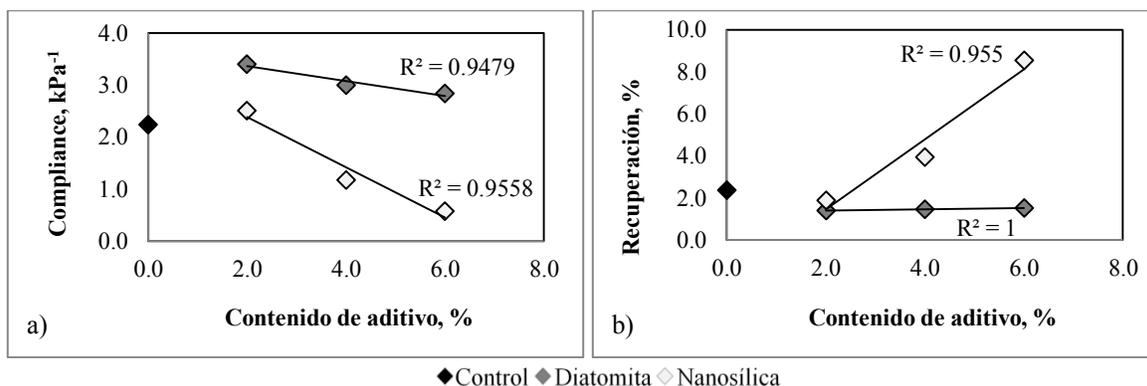


Figura 17. Influencia del aditivo sobre a) deformación (compliance) y b) recuperación elástica del asfalto

La Figura 17 muestra que la deformación (compliance) del asfalto se ve afectada linealmente por el contenido de aditivo. Al comparar con el asfalto control se observa que la modificación con diatomita (en los tres porcentajes), así como nanosílica al 2 % incrementa la susceptibilidad del asfalto a la deformación (Figura 17.a) y, por lo tanto, disminuye su capacidad de recuperación elástica (Figura 17.b). Por otro lado, se observa cómo la incorporación de 4 % y 6 % de nanosílica disminuye la deformación y aumenta la recuperación del asfalto de manera significativa.

Los resultados del ensayo de fatiga (Figura 18) muestran que el uso de diatomita al 4 % y de nanosílica a los tres porcentajes propuestos incrementa significativamente el comportamiento a fatiga del asfalto. En este caso, las tendencias son independientes del contenido de aditivo.

La explicación a los resultados obtenidos en estas pruebas será dada en la siguiente sección.

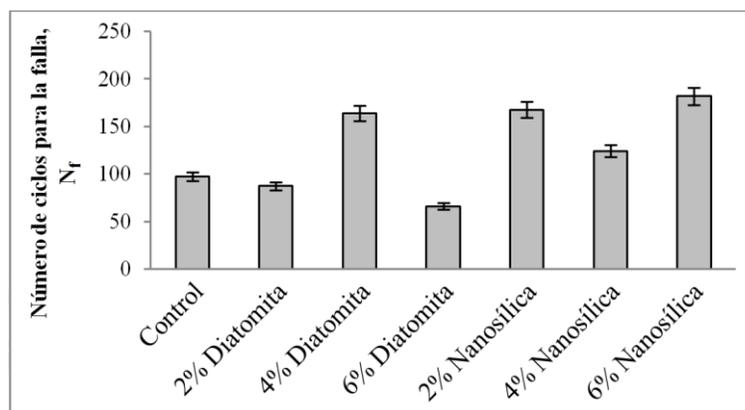
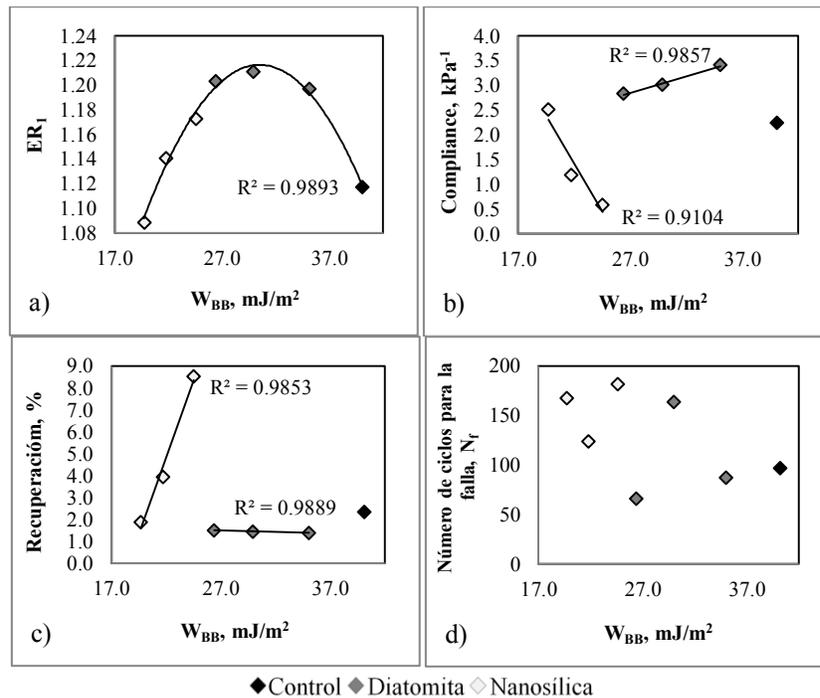


Figura 18. Número de ciclos para la falla por fatiga del asfalto

### 3.3.4. Relación entre la cohesión del asfalto y su desempeño

La cohesión resultante del asfalto luego de la modificación con diatomita y nanosílica repercute en el desempeño del mismo en términos de resistencia a la humedad, a la deformación y a la fatiga. Para ilustrar esto, los parámetros  $ER_1$ , deformación (compliance), recuperación elástica y número de ciclos para la falla se graficaron en función de la cohesión del asfalto (Figura 19).

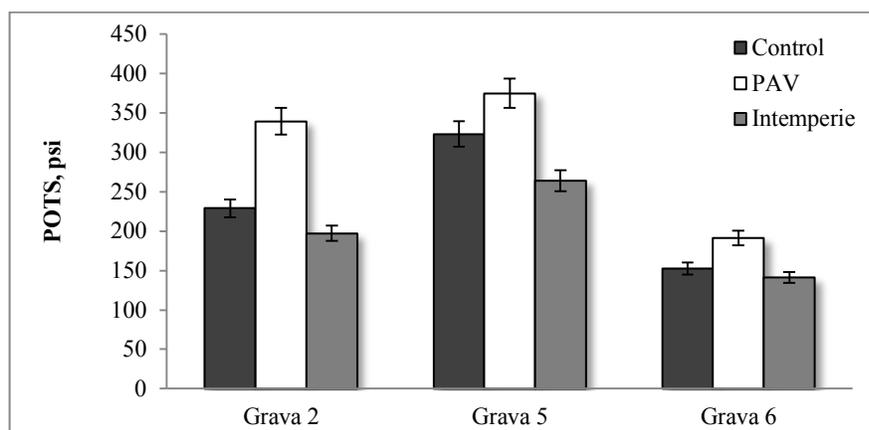


**Figura 19.** Relación entre la cohesión del asfalto y a)  $ER_1$ ; b) deformación (compliance); c) recuperación elástica y d) fatiga

La tendencia observada para el parámetro  $ER_1$  (Figura 19.a) indica que debe haber un valor óptimo de cohesión en el asfalto tal que la interfaz producida al combinarse con el agregado tenga la máxima resistencia al desnudamiento. Esto está relacionado con el balance que debe lograrse entre los componentes dispersivo y polar del asfalto, discutido en la sección anterior, para lograr una interfaz con el máximo valor de  $ER_1$ . Con respecto a los valores de compliance y recuperación elástica (Figura 19.b), se observa que los asfaltos de menor cohesión tienen una menor deformación y una mayor deformación, lo cual explica que el asfalto modificado con nanosilica tenga un mejor desempeño, puesto que son los asfaltos menos cohesivos. En este sentido, una cohesión menor implica que las interacciones que tienen lugar en el asfalto son más débiles (o se dan en menor cantidad). Por lo tanto, se espera que las moléculas de asfalto que no estén enlazadas tan fuertemente logren acomodarse más fácilmente y recobrar su estado inicial después de que se les aplique una carga. Además, se observó que los asfaltos con menor cohesión son más eficientes en soportar los ciclos de carga hasta la fatiga (Figura 19.c) y viceversa, lo cual se debe a que la movilidad reducida de las moléculas en un asfalto muy cohesivo ocasiona que sean menos eficientes en soportar los esfuerzos.

### 3.4. Efecto de la oxidación a la intemperie sobre las propiedades adhesivas del asfalto

La adhesión entre el asfalto y el agregado va más allá de las propiedades fisicoquímicas de cada uno. En el proceso se ven involucrados aspectos químicos, físicos y termodinámicos, tales como la rugosidad, angularidad y porosidad de la superficie del agregado, la viscosidad y humectabilidad del asfalto, impurezas en las superficies, entre otros. Sumado a la complejidad del proceso de adhesión, la oxidación transforma fisicoquímicamente al asfalto, como se discutió en secciones previas, por lo que resulta necesario evaluar mecánicamente la calidad de la interfaz agregado-asfalto formada y cómo se ve afectada por el envejecimiento de los materiales. Para ello, el ensayo BBS (del inglés Bitumen Bond Strength) se empleó en esta etapa del análisis. Los resultados obtenidos expresados como valores de POTS seco (del inglés Pull Off Tensile Strength) se ilustran en la Figura 20. Los valores de POTS reflejan la fuerza requerida para separar al asfalto de la superficie del agregado, por lo que se espera que las combinaciones que exhiban POTS más altos estén más fuertemente adheridas. Los materiales utilizados en esta etapa fueron las Gravas 2; 5 y 6 y el asfalto 1 envejecido en PAV y a la intemperie, además, se mantuvo asfalto sin envejecer a manera de control.

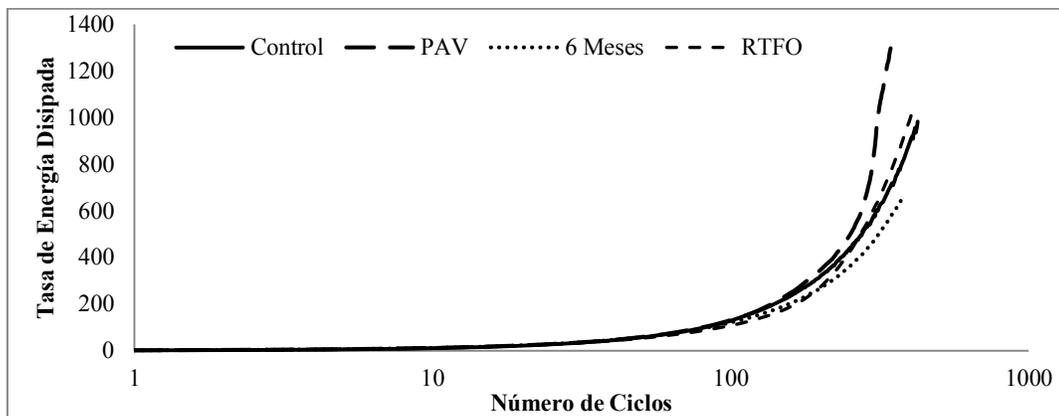


**Figura 20.** Valores de POTS para las combinaciones asfalto-agregado

Los tipos de falla que le ocurren a la interfaz agregado-asfalto tras el ensayo BBS pueden ser adhesivos o cohesivos. Cuando la fuerza de adhesión agregado-asfalto supera la fuerza de cohesión (interacciones asfalto-asfalto) la falla observada es cohesiva, de lo contrario, la falla es adhesiva. Las combinaciones analizadas presentaron en su mayoría fallas cohesivas, lo cual indica que, en estos casos particulares, sería más probable que se diera una falla tipo desmoronamiento (donde la cohesión se ve comprometida) en vez del desnudamiento del asfalto.

Los datos obtenidos en  $W_{AB}$  y AFM sugieren que, desde el punto de vista termodinámico y micromecánico, la oxidación mejora la compatibilidad del asfalto con materiales silíceos, como las

gravas (Aguiar et al., 2016b). Por lo tanto, se espera que los asfaltos oxidados tanto térmicamente como a la intemperie generen mayores POTS en la prueba BBS, comparados con el asfalto control. Lo anterior es especialmente cierto para el asfalto envejecido en PAV. Sin embargo, el asfalto oxidado a la intemperie muestra valores de POTS inferiores al control, contrario a lo esperado. Esto sugiere que la calidad de la interfaz conformada con el asfalto envejecido a la intemperie está determinada por otros factores, tales como la manera en la que el material disipa la energía al ser sometido a la tensión en el ensayo BBS. Para ilustrar esto, la Figura 21 muestra la energía disipada de los asfaltos a diferentes niveles de oxidación.



**Figura 21.** Curvas de disipación de energía de asfalto en diferentes condiciones de oxidación

De acuerdo a la Figura 21 entre mayor es el grado de oxidación del asfalto se observa una mayor tasa de disipación de energía con la aplicación de carga, lo cual implica para el asfalto una mayor tendencia a agrietarse. Sin embargo, se observa que el asfalto oxidado a la intemperie es el que disipa menos energía, lo cual sugiere que tiene una mayor tendencia a fluir durante la aplicación de la carga, en comparación con los asfaltos restantes. Lo anterior explicaría el menor valor de POTS observado para este ligante asfáltico.

Por otro lado, al calcular los valores de  $W_{AB}$  y  $ER_2$  para las combinaciones propuestas en la Figura 20 y relacionarlos con los valores correspondientes de POTS se observa que los valores de trabajo de adhesión son muy similares para las tres gravas (Figura 22a), por lo que no es posible establecer una relación clara entre ambos parámetros. Sin embargo, al relacionar POTS y  $ER_2$  (Figura 22b) es posible observar que las combinaciones que poseen un mayor valor de  $ER_2$  son aquellas que exhibieron mayores valores de POTS.

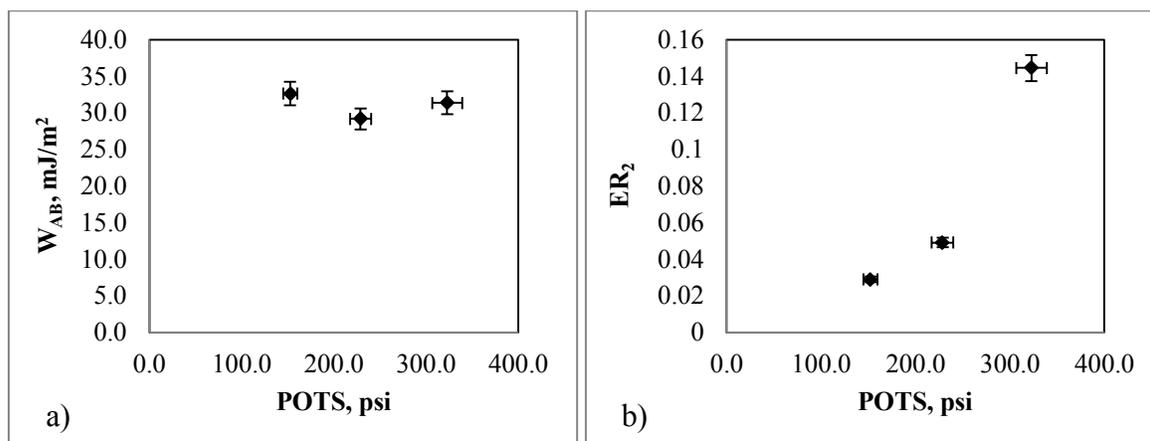


Figura 22. Correlación entre los valores de POTS y a)  $W_{AB}$  y b)  $ER_2$

Partiendo de que el ensayo BBS busca cuantificar la resistencia mecánica de la interfaz agregado-asfalto y de que el parámetro  $ER_2$  es un indicador de la resistencia fisicoquímica de tal interfaz, los datos de la Figura 22 sugieren que los resultados obtenidos con el ensayo BBS ofrecen información consistente con la aproximación fisicoquímica ( $ER_2$ ) y viceversa. Lo anterior indica que a partir de ambas metodologías es posible caracterizar la resistencia de la interfaz agregado-asfalto. Se recomienda continuar investigando el comportamiento de otras combinaciones, construidas a partir de diversas fuentes de agregados y varios asfaltos.

#### 4. Conclusiones

La exposición de una mezcla asfáltica a la humedad desata una serie de mecanismos de deterioro que ocurren simultáneamente, mediante una compleja combinación de procesos físicos y químicos. En consecuencia, el daño por humedad no puede asociarse a un proceso individual, tal como desnudamiento o desmoronamiento. Se encontró que el comportamiento de una mezcla asfáltica es específico de los materiales que la constituyen, es decir, de la combinación agregado-asfalto elegida. Por lo tanto, a partir de la selección de los materiales adecuados es posible diseñar pavimentos de resistencia superior ante la humedad, la deformación, el agrietamiento y la oxidación. Las conclusiones más relevantes de esta etapa de la investigación se resumen a continuación.

1. Dado que el daño por humedad que experimenta una mezcla asfáltica va más allá del desnudamiento, se propusieron dos parámetros fisicoquímicos que describen la compatibilidad de los materiales (asfalto y agregado) con el agua. Se encontró que los parámetros propuestos resultan efectivos en la descripción del comportamiento mecánico (pérdida de módulo) de las

- mezclas asfálticas analizadas. Además, se observó que el agregado tiene un rol de mayor peso en definir el desempeño de las mezclas, lo cual es consistente con investigaciones previas.
2. La polaridad del ligante asfáltico es de suma importancia en la determinación de la calidad de la interfaz agregado-asfalto, se debe alcanzar un balance entre las fuerzas dispersivas y polares que tienen lugar en el ligante, de modo que el proceso de adhesión sea favorecido y el de desplazamiento, desfavorecido. De esta forma, se alcanzará un valor de cohesión óptimo, el cual a su vez está relacionado con un correcto desempeño del asfalto en términos de resistencia a la humedad, a la deformación y a la fatiga.
  3. La basicidad del agregado es un factor importante en la determinación de las propiedades adhesivas de la interfaz agregado-asfalto. Los agregados de mayor basicidad resultan en combinaciones de mayor durabilidad.
  4. La escogencia de los materiales para pavimentos debe realizarse tomando en cuenta la polaridad tanto de asfaltos como de agregados.
  5. Las transformaciones fisicoquímicas que le ocurren al asfalto durante el envejecimiento (oxidación) influyen en su desempeño final. Dado que el proceso de oxidación es inevitable, es recomendable tomar en cuenta tales transformaciones al seleccionar aditivos para la modificación del asfalto, de modo que las propiedades esenciales requeridas para su buen comportamiento no se vean deterioradas significativamente con el paso del tiempo.

## 5. Acciones a corto plazo

Se pretende ampliar la presente investigación mediante la inclusión de mezcla asfáltica fina (FAM, por sus siglas en inglés): investigar el efecto de la presencia de los finos del agregado sobre la susceptibilidad a la humedad del asfalto, así como sobre sus propiedades mecánicas.

## 6. Referencias

- Aguiar-Moya, J. P., Leiva-Villacorta, F., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Rodríguez-Castro, E., & Loria-Salazar, L. G. (2014). *Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Costa Rica LM-PI-UMP-038-R2*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., & Loria-Salazar, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2505, 57-65. DOI: 10.3141/2505-08
- Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J. F., Loria-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F. & Cely-Leal, N. (2016a). Adhesive properties of asphalts and aggregates in

- tropical climates. *International Journal of Pavement Engineering*. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199884
- Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., García, A., Baldi-Sevilla, A., Bonilla-Mora, V., & Loría-Salazar, L. G. (2016b). Effect of aging on micromechanical properties of bitumen by means of atomic force microscopy. Aceptado para publicación en *Road Materials and Pavement Design*.
- Airey, G.D., Collop, A.C., Zoorob, S.E., & Elliott, R.C. (2008). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*, 22, 2015–2024. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.009
- Airey, G. D., & Choi Y. (2015). State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372. DOI:10.1080/14680629.2002.9689930
- Apeageyi, A. K., Grenfell, J. R. A., & Airey, G. D. (2014). Moisture-induced strength degradation of aggregate–asphalt mastic bonds. *Road Materials and Pavement Design*, 15(S1), 239-262. DOI: 10.1080/14680629.2014.927951
- Arabani, M., & Hamed, Gh. H. (2011). Using the surface free energy method to evaluate the effect of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 802–811, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000228
- AASHTO TP 79 (2012). *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 283 (2014). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM Standard D 2872-12 (2012). Test Method for Effect of Heat and Air on Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-film Oven Test), ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D2872-12E01.
- ASTM Standard D 6521-04 (2013). Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), ASTM International, West Conshohocken, PA. DOI: 10.1520/D6521-04.
- Baldi-Sevilla, A. (2015). Evaluación de la resistencia al daño por humedad y desempeño de asfalto modificado con nanosilica, diatomita y diatomita hidrófoba. Thesis dissertation. University of Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. & Bhasin, A. (2016a). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. Aceptado para publicación en *Road Materials and Pavement Design*.
- Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Loría-Salazar, L. (2016b). Effect of aggregate-bitumen compatibility on asphalt moisture susceptibility. Aceptado para publicación en *Road Materials and Pavement Design*.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A. & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81-98. DOI: 10.1080/10298430701792128

- D'Angelo, J. A. (2009). The Relationship of the MSCR Test to Rutting, *Road Materials and Pavement Design*, 10(1), 61-80. DOI:10.1080/14680629.2009.9690236
- Della Volpe, C., & Siboni, S. (1997). Some Reflections on Acid – Base Solid Surface Free Energy Theories. *Journal of Colloid and Interfacial Science*, 195, 121-136. DOI: 10.1006/jcis.1997.5124
- Hefer, A., Bhasin, A., & Little, D. (2006). Bitumen Surface Characterization Using a Contact Angle Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18, 759-767. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(759)
- Hicks, G., Santucci, L., & Aschenbrenner, T. (2003). *Introduction and seminar objectives. Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar, San Diego, California*. Washington DC: Transportation Research Board.
- Little, D. N., & Jones, D. R. (2003). Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. In *National seminar on moisture sensitivity of asphalt pavements* (pp. 37-70).
- 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.
- Lytton, R.L., E. Masad, C. Zollinger, R. Bulut, & D. Little. (2005). Measurements of Surface Energy and Its Relationship to Moisture Damage, TxDOT Report Number 0-4524-2, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Nejad, M., Hamed, Gh. H., & Azarhoosh, A. R. (2013). Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 1119–1126, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000650
- Stuart, K.D. (1990). *Moisture Damage in Asphalt Mixtures. A State-of-the-Art Report. Publication No. FHWA-RD-90-019*. VA, Virginia: Federal Highway Administration.
- Vargas-Nordbeck, A.; Aguiar-Moya, J. P. & Loría-Salazar, L. G. (2015). *Daño por humedad en mezclas asfálticas LM-PI-UMP-044-R2*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Wei, J. & Zhang, Y. (2012). Application of sessile drop method to determine surface free energy of asphalt and aggregate, *Journal of Testing and Evaluation*, 40(5) 1–7, DOI: 10.1520/JTE20120060
- Xu, G., Wang, H. (2016). Study of cohesion and adhesion properties of asphalt concrete with molecular dynamics simulation. *Computational Materials Science*, 112, 161-169. DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.10.024
- Zhang, J., Apeagyei, A. K., Airey, G. D., Grenfell, J. R. A. (2015). Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 62, 45-54. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2015.06.012