



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

REPORTE: LM-PI-UMP-038-R4

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

Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Diciembre, 2018

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

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




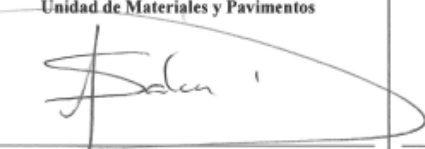
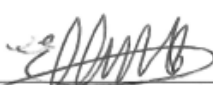

1. Informe LM-PI-UMP-038-R4		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE ADHESIÓN ASFALTO - AGREGADO EN COSTA RICA		4. Fecha del Informe Diciembre, 2018
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. 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 del pavimento, 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. De manera adicional, 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.		
7. Palabras clave Adhesión, Cohesión, Energía Superficial, Desempeño	8. Nivel de seguridad: Ninguno	9. Núm. de páginas 39
10. Preparado por:		
Quim. Alejandra Baldi Sevilla Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 10 / 12 / 18	Quim. Jorge Salazar Delgado Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 10 / 12 / 18	Ing. Ellen Rodríguez Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 10 / 12 / 18
11. Revisado por:	12. Aprobado por:	
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 10 / 12 / 18	Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 10 / 12 / 18	



TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
1. RESUMEN EJECUTIVO.....	8
2. ENSAYOS MECÁNICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	9
2.1. INTRODUCCIÓN.....	9
2.2. METODOLOGÍA	9
2.2.1. MATERIALES Y DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	9
2.2.2. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO.....	10
2.3. RESULTADOS.....	11
2.4. CONCLUSIONES.....	12
3. ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTOS Y AGREGADOS.....	13
3.1. INTRODUCCIÓN.....	13
3.2. METODOLOGÍA	14
3.3. RESULTADOS.....	15
4. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA SUPERFICIAL Y EL DESEMPEÑO	23
4.1. INTRODUCCIÓN.....	23
4.2. METODOLOGÍA	23
4.3. RESULTADOS.....	23
4.4. CONCLUSIONES.....	27
5. EFECTO DE LA OXIDACIÓN SOBRE LA RESISTENCIA A LA HUMEDAD DE INTERFACES ASFALTO-AGREGADO	28
5.1. INTRODUCCIÓN.....	28
5.2. METODOLOGÍA	28
5.2.1. CARACTERIZACIÓN DE ADITIVOS	28
5.3. RESULTADOS.....	30
5.3.1. EFECTO DE LA MODIFICACIÓN Y ENVEJECIMIENTO EN LOS VALORES DE ENERGÍA SUPERFICIAL	31
5.3.2. EFECTO DE LA ENERGÍA DE SUPERFICIE DE LOS COMPONENTES EN POTENCIAL DE DESNUDAMIENTO.....	33



5.4. CONCLUSIONES	36
6. CONCLUSIONES GENERALES	37
7. PRODUCTOS GENERADOS	38
7.1. PUBLICACIONES	38
7.2. GENERACIÓN DE ESPECIFICACIÓN	38
8. REFERENCIAS	39
ANEXO A	43
ANEXO B	47
ANEXO C	52
ANEXO D	58



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2. 1. E*R DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS CON A) GRAVA 1 Y B) GRAVA 2.....	11
FIGURA 3. 1. A) IMPLEMENTACIÓN DEL GONIÓMETRO; B) ÁNGULO DE CONTACTO	15
FIGURA 3. 2. 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).....	17
FIGURA 3. 3. 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.....	18
FIGURA 3. 4. TRABAJO DE DESPLAZAMIENTO PARA LAS COMBINACIONES DE AGREGADO Y ASFALTO MODIFICADO CON A) DIATOMITA Y B) DIATOMITA HIDRÓFOBA	19
FIGURA 3. 5. 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	19
FIGURA 3. 6. RAZÓN DE ENERGÍA (ER_i) DE LOS PARES DE AGREGADO Y LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON A) DIATOMITA Y B) DIATOMITA HIDRÓFOBA	20
FIGURA 3. 7. EFECTO DE LA BASICIDAD DEL AGREGADO SOBRE A) W_{AB} Y B) W_{WET}	21
FIGURA 3. 8. 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	21
FIGURA 4. 1. CORRELACIÓN ENTRE LOS INDICADORES MECÁNICOS Y FISCOQUÍMICOS DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.	25
FIGURA 4. 2. CORRELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO MECÁNICO DE DAÑOS POR HUMEDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y LA COMPATIBILIDAD DEL ASFALTO CON EL AGUA.	26
FIGURA 5. 1. TERMOGRAMAS DE DIATOMITAS (LÍNEA GRIS); NANOSÍLICA (LÍNEA NEGRA) Y DIATOMITAS HIDROFÓBICAS (LÍNEA VERDE).....	29



FIGURA 5. 2. CAMBIOS SEGÚN EL CONTENIDO DE ADITIVO EN A) ENERGÍA TOTAL DE SUPERFICIE B) COMPONENTE DISPERSO C) COMPONENTE ÁCIDO Y D) COMPONENTE BÁSICO 31

FIGURA 5. 3. RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA TOTAL DE SUPERFICIE Y LA ENERGÍA DE SUPERFICIE DE LOS COMPONENTES A) DISPERSIVO B) ÁCIDO Y C) BÁSICO..... 32

FIGURA 5. 4. CAMBIOS EN LA ENERGÍA SUPERFICIAL TOTAL CON ENVEJECIMIENTO (ORIGINAL: GRIS, ENVEJECIDO CON PAV: GRIS CLARO) 33

FIGURA 5. 5. A) TRABAJO DE ADHESIÓN B) TRABAJO DE DESPLAZAMIENTO Y C) RAZÓN DE ENERGÍA PARA LAS COMBINACIONES PRODUCIDAS CON LIGANTES Y CALIZA 1 (CUADRADOS), CALIZA 2 (TRIÁNGULOS), GRAVA 1 (DIAMANTES) Y GRAVA 2 (CÍRCULOS) 34

FIGURA 5. 6. TRABAJO DE ADHESIÓN (A,B), TRABAJO DE DESENLACE (C,D) AND RAZÓN DE ENERGÍA (E,F) PARA LAS COMBINACIONES PRODUCIDAS CON CALIZA 1 (A,C,E) Y GRAVA 2 (B,D,F) 35



ÍNDICE DE TABLAS

	Página
TABLA 2. 1. ASFALTOS MODIFICADOS	9
TABLA 2. 2. GRANULOMETRÍA DE LAS MEZCLAS	10
TABLA 2. 3. PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS	10
TABLA 3. 1. VALORES DE ENERGÍA SUPERFICIAL OBTENIDOS PARA LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL PROYECTO	16
TABLA 4. 1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS COMBINACIONES AGREGADO-ASFALTO.....	23
TABLA 4. 2. INDICADORES DE COMPATIBILIDAD, W_{AW} Y W_{BW}.....	24
TABLA 5. 1. VALORES DE ENERGÍA DE SUPERFICIE DE LIGANTES ASFÁLTICOS	30



1. Resumen ejecutivo

El daño por humedad es un proceso indeseable que resulta en la pérdida de propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica. Por lo tanto, la aproximación de la resistencia a la humedad de los materiales del pavimento se ha convertido en un tema de investigación importante (Taylor y Khosla, 1983; Kiggundu y Roberts, 1988; Terrel y Shute, 1989; Little y Jones, 2002). Como consecuencia, se han desarrollado una gran cantidad de pruebas para evaluar el comportamiento de daño por humedad de una mezcla de asfalto. Desafortunadamente, la mayoría de las pruebas de laboratorio no muestran una buena correlación con el rendimiento en el campo de las mezclas de asfalto. Grenfell (2014) atribuyó estas inconsistencias al hecho de que las pruebas relacionan el daño por humedad a las propiedades mecánicas del asfalto, ignorando la contribución de las propiedades fisicoquímicas de los materiales individuales a la durabilidad de la mezcla. Con base en esta afirmación, se destaca la necesidad de tener una perspectiva integral del daño por humedad para evaluar la susceptibilidad de los pavimentos a ser deteriorados por el agua.

En este sentido, es necesario considerar que hay muchos factores involucrados en la falla de una mezcla asfáltica expuesta a la humedad, como las propiedades físicas y químicas de los materiales (Majidzadeh y Bemolold, 1968), las condiciones ambientales, las características del pavimento como el contenido de vacíos (Terrel y Shute, 1989; Masad, Arambula, Ketcham, Abbas y Martin, 2007) contenido de asfalto (Hicks, 1991), contenido agregado fino (Cheng, Little, Lytton y Horst, 2003), carga de tráfico, permeabilidad (Choubane, Page y Musselman, 1998), entre otros. Dada la complejidad del daño por humedad, Kakar y sus colaboradores (Kakar, Hamzah y Valentin, 2015) reflexionaron sobre la inconveniencia de desarrollar una prueba de laboratorio que considere todos los factores involucrados en dicho proceso, sin embargo, al aplicar medidas y parámetros más precisos es posible para mejorar la correlación entre los resultados de las pruebas de laboratorio y el comportamiento en el campo de las mezclas expuestas al agua.

En este estudio, las propiedades químicas de los materiales se consideran clave para describir la susceptibilidad del pavimento ante el daño por humedad. Específicamente, se ha elegido la energía superficial para evaluar la resistencia a la humedad de los aglutinantes y agregados mediante parámetros físico-químicos tales como adherencia (W_{AB}), el potencial de desnudamiento (W_{wet}) y relación de energía (ER) (Little y Bhasin, 2006).

Con base en esto, se ha reconocido la necesidad de un parámetro más integral que describa las interacciones entre el agua y los materiales del pavimento que puedan servir para predecir su susceptibilidad al daño por la humedad. Por lo tanto, en el presente informe se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización fisicoquímica de los materiales para pavimentos y su relación con el desempeño mecánico que exhiben. Los hallazgos permiten explicar desde una perspectiva más integral la sensibilidad de los materiales a ser dañados por el agua, por lo que se muestran como una mejora al criterio de selección de materiales de forma que se elijan aquellos que sean superiores y que tengan más probabilidad de tener una mayor vida útil.



2. Ensayos mecánicos de mezclas asfálticas

2.1. Introducción

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 sección busca abordar analizar la susceptibilidad al daño por humedad de distintas mezclas asfálticas, con el objetivo de diferenciar entre las mezclas con mejor resistencia a ser dañadas por el agua.

2.2. Metodología

2.2.1. Materiales y Diseño de mezclas asfálticas

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 2.1. El asfalto 1 sin modificar se mantuvo como control. Cada grupo de muestras se diseñó con dos granulometrías diferentes: 9.5 y 12.5 NMAS (del inglés Nominal Maximum Aggregate Size). Las granulometrías, así como las propiedades volumétricas de las mezclas resultantes se enlistan en las Tablas 2.2 y 2.3, respectivamente.

Tabla 2. 1. Asfaltos modificados

Asfalto	Aditivo	Porcentaje, %	Temperatura de incorporación, °C	Tiempo de incorporación, h
Muestra 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



Tabla 2. 2. 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 2. 3. Propiedades volumétricas de las mezclas

Agregado	Mezcla	% Asfalto	%VMA	% Vacíos	% VFA	Razón polvo/asfalto
1 (9.5NMAS)	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 (12.5NMAS)	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 (9.5NMAS)	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 (12.5NMAS)	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

*en algunos casos se utilizarán los términos Cal y Lime indistintamente

2.2.2. Ensayo de 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 hielo/deshielo. Cada ciclo consistió en mantener los especímenes saturados al vacío 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 2.1.

$$E^*R = E^*(\text{acondicionado}) / E^*(\text{seco}) \quad (2.1)$$



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.

2.3. Resultados

La razón de módulo dinámico (E*R) obtenida para las mezclas asfálticas propuestas y los distintos ciclos de acondicionamiento se ilustra en la Figura 2.1

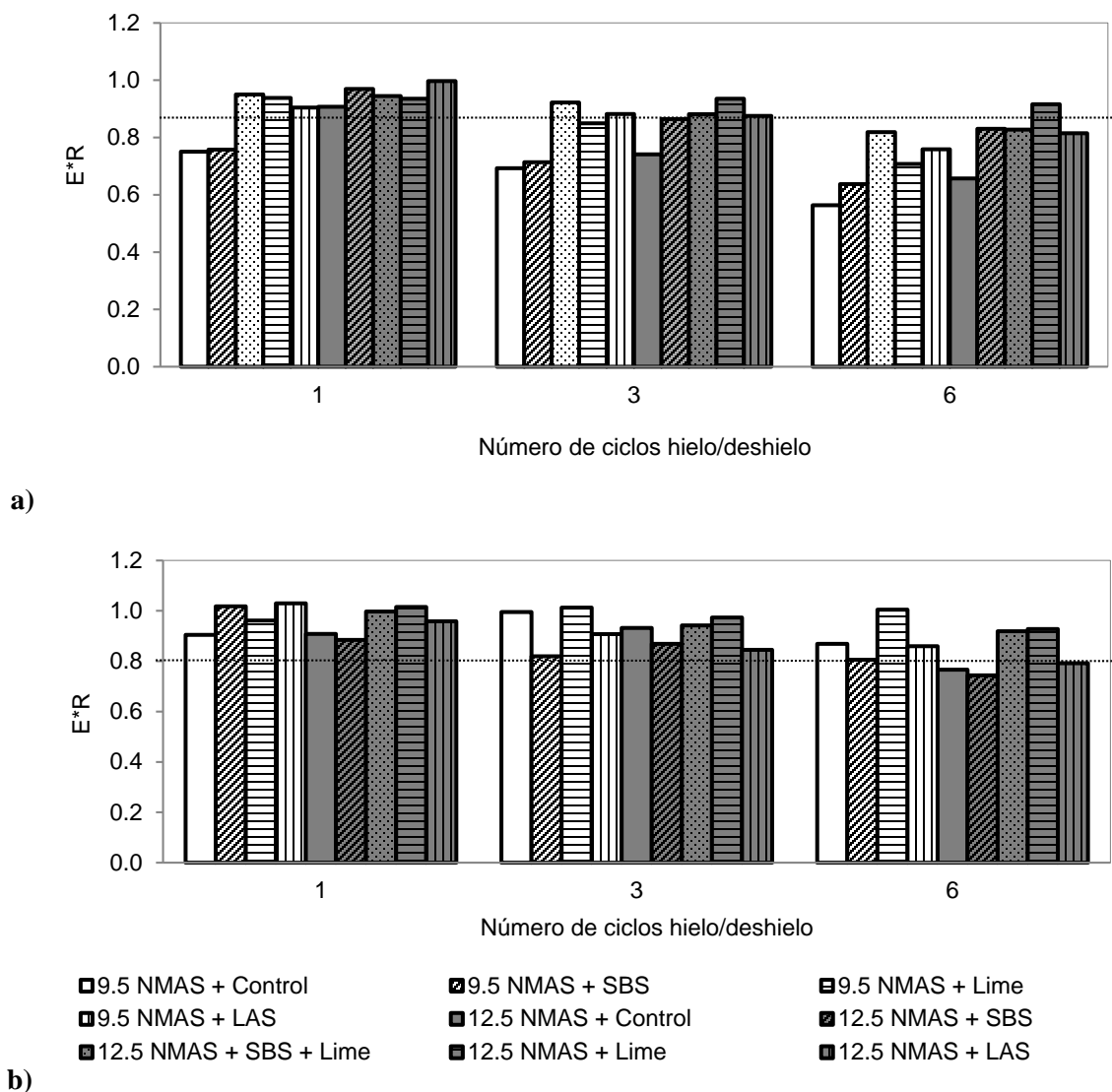


Figura 2. 1. E*R de mezclas asfálticas producidas con a) Grava 1 y b) Grava 2



Los datos de E^*R fueron calculados a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Es importante resaltar que una mezcla asfáltica debe tener un valor de E^*R mínimo de 0.8 para que su resistencia ante el daño por humedad se considere adecuada. 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. Por otro lado, de las mezclas producidas con la Grava 1, las combinaciones que involucran al asfalto control y al modificado con SBS (9.5NMA5) presentan E^*R por debajo de lo requerido.

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 adecuadas y resistentes 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 antidesnudantes), 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 2.1 que la Grava 2 produce mezclas más resistentes que la Grava 1, para las cuales hay una mayor pérdida de módulo para la granulometría 9.5NMA5. 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.

2.4. Conclusiones

La resistencia a la humedad de las combinaciones evaluadas varía de acuerdo al diseño de la misma. Adicionalmente, se encontró que realizar un solo ciclo de acondicionamiento no es suficiente para inducir un daño significativo a las muestras. De forma que pueda evaluarse si existe un efecto por parte de la naturaleza química de los materiales componentes, se planteó realizar la caracterización de la resistencia termodinámica de las interfaces asfalto-agregado, así como de determinar la susceptibilidad de las mismas ante la presencia de la humedad. Esto se detallará en las secciones siguientes.



3. Energía superficial de asfaltos y agregados

3.1. Introducción

La energía superficial (ES) es una propiedad esencial en todo material y es determinada por las interacciones fisicoquímicas que ocurren en su superficie. La ES se divide en dos componentes, según el tipo de interacción que se dé en el material. El componente dispersivo γ^{LW} , correspondiente a las interacciones de Lifshitz-van der Waals, y el componente polar γ^{AB} , que incluye las interacciones en las que hay flujo de electrones e iones hidronio (van Oss, Chaudhury, & Good, 1988). El componente polar se subdivide a su vez en los componentes ácido de Lewis, γ^+ , y básico de Lewis, γ^- (Good, y van Oss, 1991).

La ES, así como sus componentes, pueden estimarse a partir de la medición del ángulo de contacto formado entre un líquido de prueba y la superficie de interés. Los ángulos de contacto obtenidos se relacionan con la ES del material a partir de la Ec. 2 (Hefer, Bhasin, y Little, 2006). La relación matemática entre el ángulo de contacto y energía superficial está dada por la ecuación de Young-Dupré (Ecuación 3.1).

$$\gamma_l^T (1 + \cos\theta_{sl}) = 2\sqrt{\gamma_l^{LW}\gamma_s^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_l^+\gamma_s^-} + 2\sqrt{\gamma_l^-\gamma_s^+} \quad (3.1)$$

Donde los subíndices l y s se refieren al líquido y al sólido, θ_{sl} es el ángulo de contacto formado entre el sólido y la gota del líquido, γ_l^T es la energía superficial total del disolvente empleado, γ^{LW} , γ^+ y γ^- son los componentes dispersivo, ácido y básico de la energía superficial, respectivamente. Dado que la Ecuación 3.1 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 Hamed, 2011; Wei y Zhang, 2012; Nejad, Hamed 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 3.2.

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_B^+} \quad (3.2)$$

De manera similar, las interacciones agregado-agua (W_{AW}) y asfalto-agua (W_{BW}) se obtienen a partir de la Ecuación 3.3 y 3.4, respectivamente.

$$W_{AW} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_A^-\gamma_W^+} \quad (3.3)$$

$$W_{BW} = 2\sqrt{\gamma_B^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_B^+\gamma_W^-} + 2\sqrt{\gamma_B^-\gamma_W^+} \quad (3.4)$$



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 3.5).

$$W_{wet} = \gamma^A + \gamma^B - \gamma^{AB} \quad (3.5)$$

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

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 3.6).

$$ER_1 = W_{AB}/W_{wet} \quad (3.6)$$

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 ER_1 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, 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 3.6 surge otro parámetro (Ecuación 3.7) que toma en cuenta la capacidad del mismo para difundirse y recubrir correctamente la superficie del agregado.

$$ER_2 = |W_{AB} - W_{BB} / W_{wet}| \quad (3.7)$$

Donde W_{BB} está dado por

$$W_{BB} = 2\gamma^B \quad (3.8)$$

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

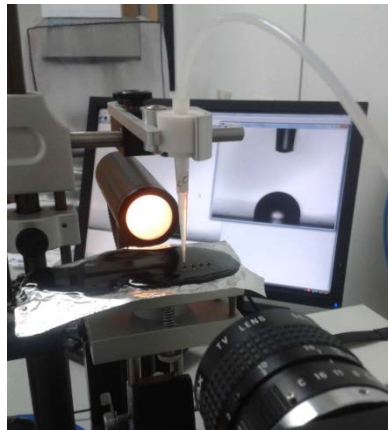
Se considera que estos indicadores pueden ser utilizados en la determinación de la susceptibilidad a la humedad de la interfaz asfalto-agregado. Por lo tanto, el objetivo de la presente sección es evaluar la resistencia al daño por humedad de distintas combinaciones asfalto-agregado, a partir de la estimación de la energía superficial de ambos materiales.

3.2. Metodología

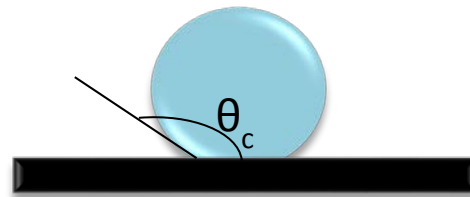
La medición de la energía superficial de los asfaltos y agregados empleados en este estudio se obtuvo mediante la utilización de un goniómetro (Figura 3.1). Las muestras de asfalto se prepararon calentando el material hasta que su fluidez, luego de lo cual se vertió una cantidad específica sobre un portaobjetos. 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.



a)



b)

Figura 3. 1. a) Implementación del goniómetro; b) Ángulo de contacto

La medición del ángulo de contacto consiste en colocar una gota de disolvente sobre la superficie sólida de interés. El ángulo de contacto formado entre el sólido y el disolvente está relacionado con la energía de la superficie mediante la ecuación 3.1 (Little y Bhasin 2006; Aguiar-Moya, Salazar-Delgado, Baldi-Sevilla, Leiva-Villacorta y Loria-Salazar, 2015).

Como se mencionó anteriormente, la estimación de los componentes de energía de superficie de asfaltos y agregados requiere un mínimo de tres líquidos de sonda para calcular un conjunto de ecuaciones lineales (Hefer, Bhasin y Little, 2006). Es importante resaltar que los componentes de energía superficial de los líquidos de la sonda se administran a 20°C (Della Volpe y Siboni, 1997), por lo tanto, las mediciones se deben realizar a esta temperatura para evitar la obtención de datos erróneos.

3.3. Resultados

Los valores obtenidos de energía superficial para los materiales utilizados durante la realización de este proyecto, así como los líquidos de prueba empleados en la medición de la energía superficial se enlistan en la Tabla 3.1.



Tabla 3. 1. Valores de energía superficial obtenidos para los materiales utilizados en el proyecto

Material	Designación	γ^T (mJ/m ²)	γ^{LW} (mJ/m ²)	γ^+ (mJ/m ²)	γ^- (mJ/m ²)
Asfalto	Asfalto 1	23.34	23.30	1.24	2.88
	Asfalto 1 + 2% SBS+ 0.5% LAS	13.23	7.28	3.38	1.26
	Asfalto 1 + 2% SBS	15.23	12.69	2.40	0.39
	Asfalto 1 + 0.5% LAS	15.51	11.09	3.17	0.30
	Asfalto 1 + 1% Cal	16.45	13.18	2.92	0.09
	Asfalto 1 + 2% SBS + 1% Cal	15.69	13.42	2.09	0.02
	Asfalto 2	12.13	5.29	4.05	0.68
	Asfalto 2 + 2% diatomita	13.46	9.95	2.45	0.89
	Asfalto 2 + 4% diatomita	15.84	14.10	1.93	0.16
	Asfalto 2 + 6% diatomita	17.54	16.23	1.43	0.03
	Asfalto 2 + 10% diatomita	19.56	18.99	0.93	1.33
	Asfalto 2 + 2% nanosilica	20.10	19.89	0.67	0.15
	Asfalto 2 + 4% nanosilica	15.67	13.85	1.23	0.68
	Asfalto 2 + 6% nanosilica	14.65	12.25	1.62	1.69
	Asfalto 2 + 2% HD	19.82	19.00	1.03	0.26
	Asfalto 2 + 4% HD	21.62	21.34	0.78	3.12
	Asfalto 2 + 6% HD	20.37	19.54	1.33	0.17
	Asfalto 2 + 10% HD	21.31	20.68	0.64	0.00
	Asfalto 2 + 2 % SBS	17.04	14.88	1.71	2.62
	Asfalto 2 + 1 % cal	15.28	11.35	2.29	0.67
	Asfalto 2 + 0.5 % LAS	17.06	15.71	1.73	1.54
	Asfalto 2 + 2% SBS + 1 % cal	14.89	10.32	1.67	0.91
	Asfalto 2 + 2 % SBS +0.5 % LAS	16.07	14.78	2.48	0.62
	Asfalto 3	16.90	15.44	2.08	0.26
	Asfalto 3 + 2% SBS+ 0.5% LAS	16.38	14.13	2.28	0.55
	Asfalto 3 + 2% SBS	14.39	10.81	2.34	1.37
	Asfalto 3 + 0.5% LAS	15.51	11.09	3.17	1.54
	Asfalto 3 + 1% Cal	18.72	18.36	1.10	0.03
	Asfalto 3 + 2% SBS + 1% Cal	19.22	18.89	1.22	0.02
	Agregados	Grava 1 (689)	14.91	6.37	7.26
Grava 2 (899)		27.91	15.05	6.91	5.99
Grava 3 (1152)		53.77	45.85	12.70	1.24
Grava 4 (1153)		58.40	1.11	32.46	25.3
Caliza 1 (1136)		37.48	32.80	3.90	1.41
Caliza 2 (1212)		49.23	42.65	12.35	0.88
Líquidos 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



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. Las fuentes de agregado utilizadas fueron las Gravas 3 y 4 y las Calizas 1 y 2. Por favor, encontrar los valores de ES en la Tabla 3.1. Tales valores 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} , calculados a partir de las Ecuaciones 3.2 y 3.5, respectivamente. En el caso del W_{AB} , los resultados se ilustran en la Figura 3.2.

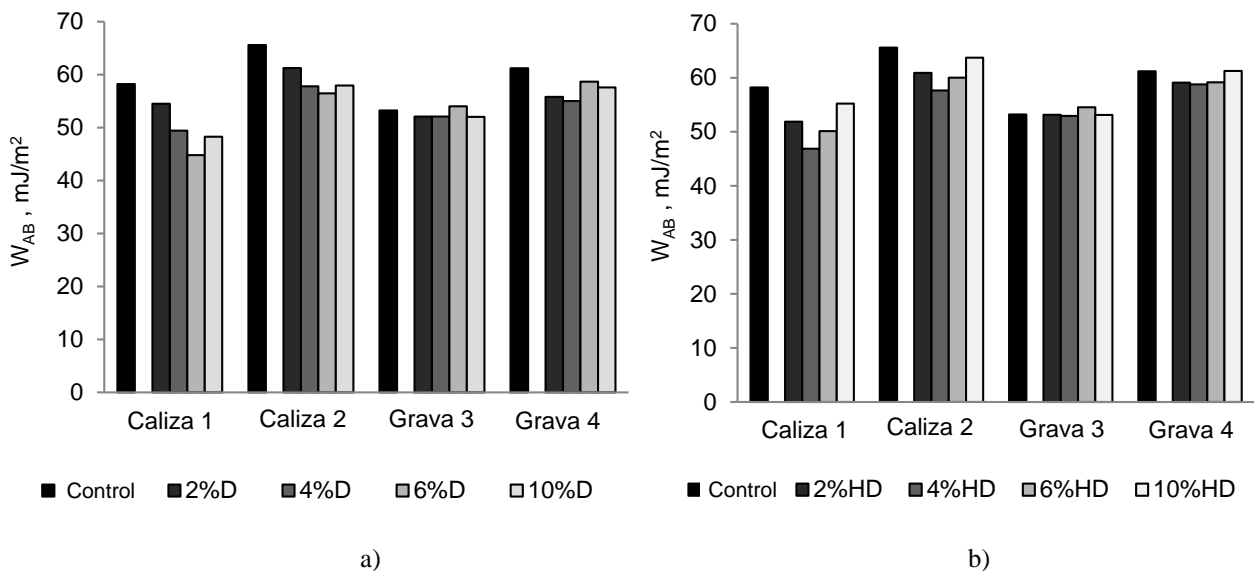


Figura 3. 2. Trabajo de adhesión (W_{AB}) para las combinaciones de las fuentes de agregado y asfalto modificado con a) diatomita (D) y b) diatomita hidrófoba (HD) (la columna que representa el asfalto control está separada para facilitar su identificación)

De acuerdo a la Figura 3.2, 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 3.4, 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 (Apegyei, Grenfell, y Airey, 2014), lo cual es consistente con los datos mostrados en la Figura 3.3.

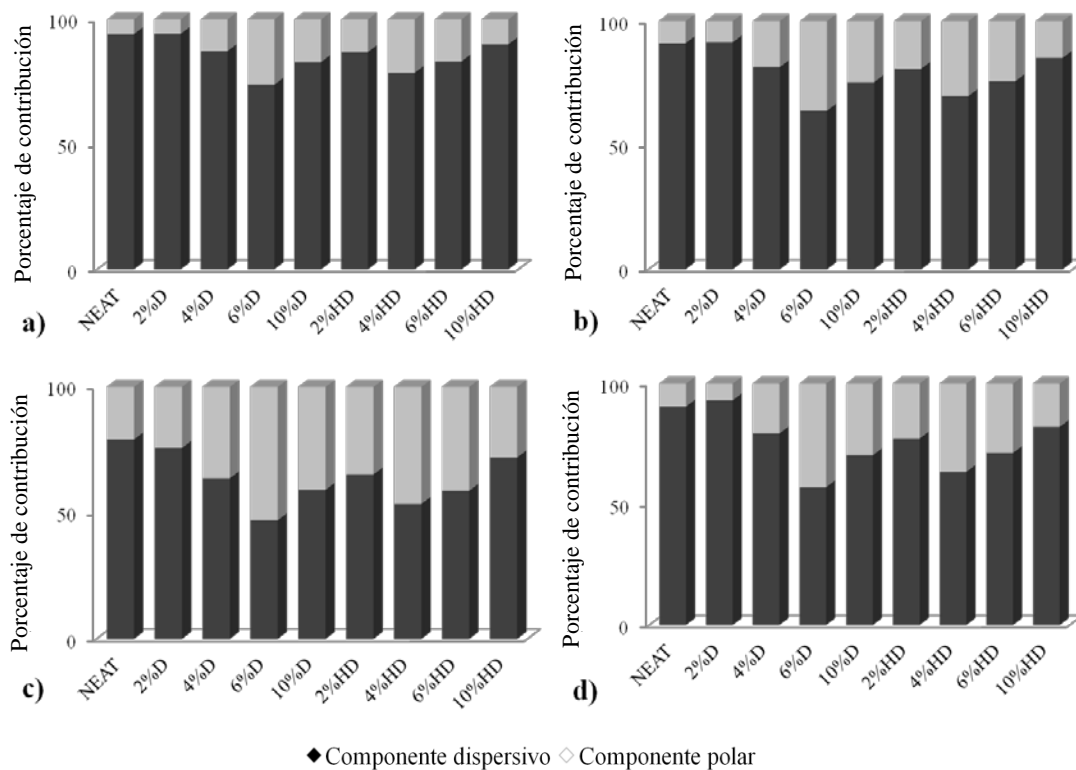


Figura 3.3. Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de adhesión para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4

La Figura 3.4 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 3.5, en 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.

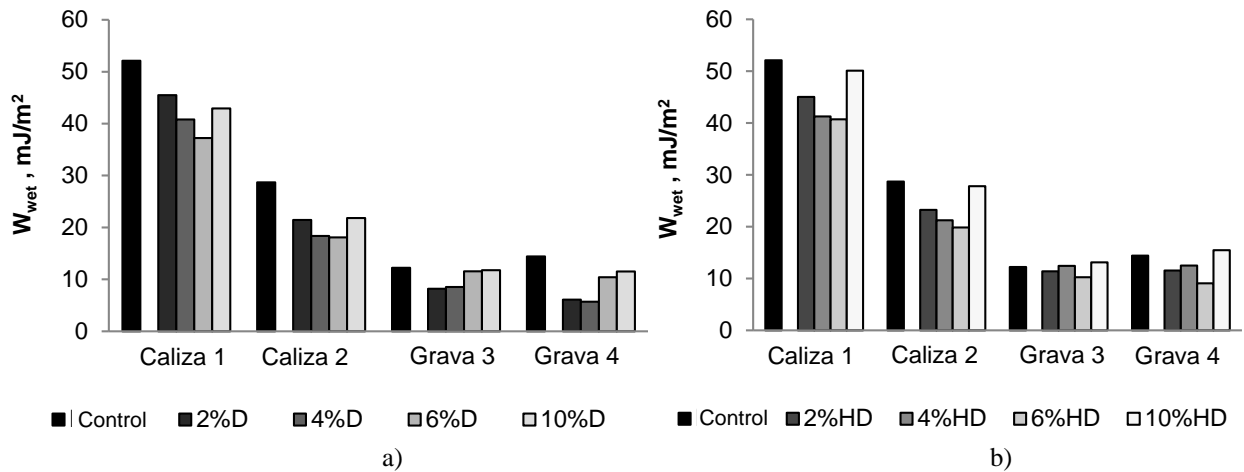


Figura 3. 4. Trabajo de desplazamiento para las combinaciones de agregado y asfalto modificado con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba

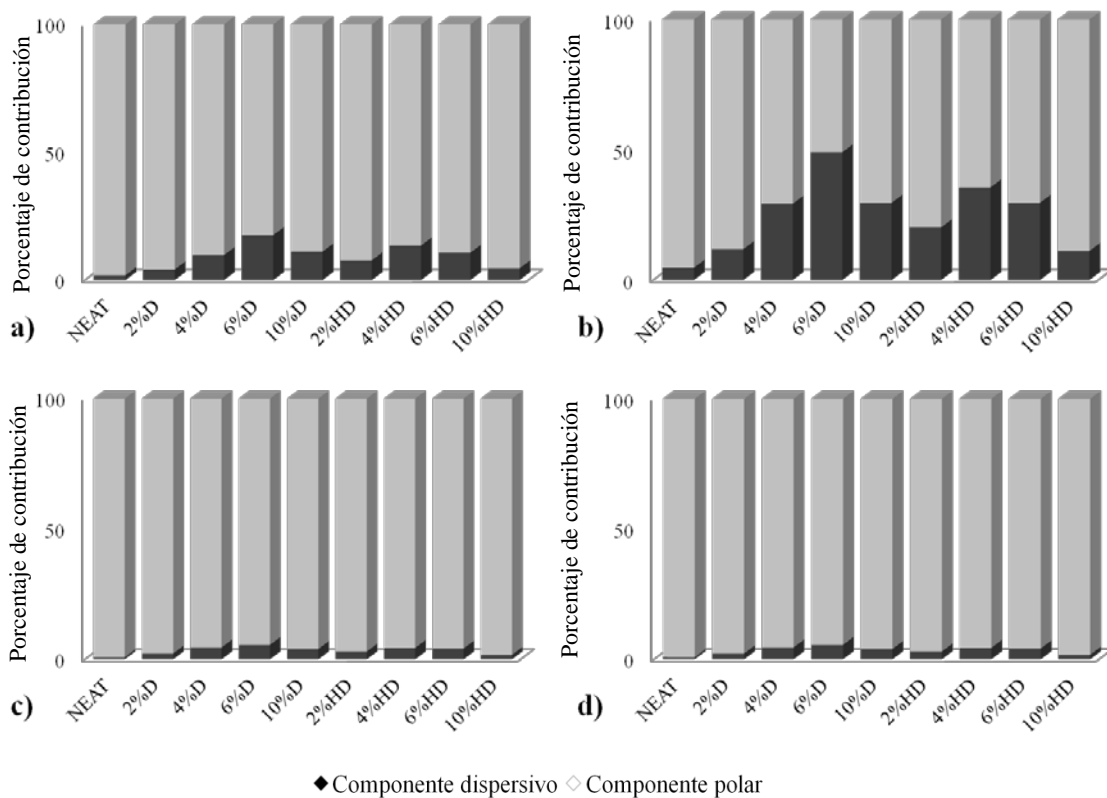


Figura 3. 5. Contribución porcentual de los componentes dispersivo y polar de los asfaltos al trabajo de desplazamiento para las combinaciones con a) Caliza 1; b) Caliza 2; c) Grava 3 y d) Grava 4

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 3.6.

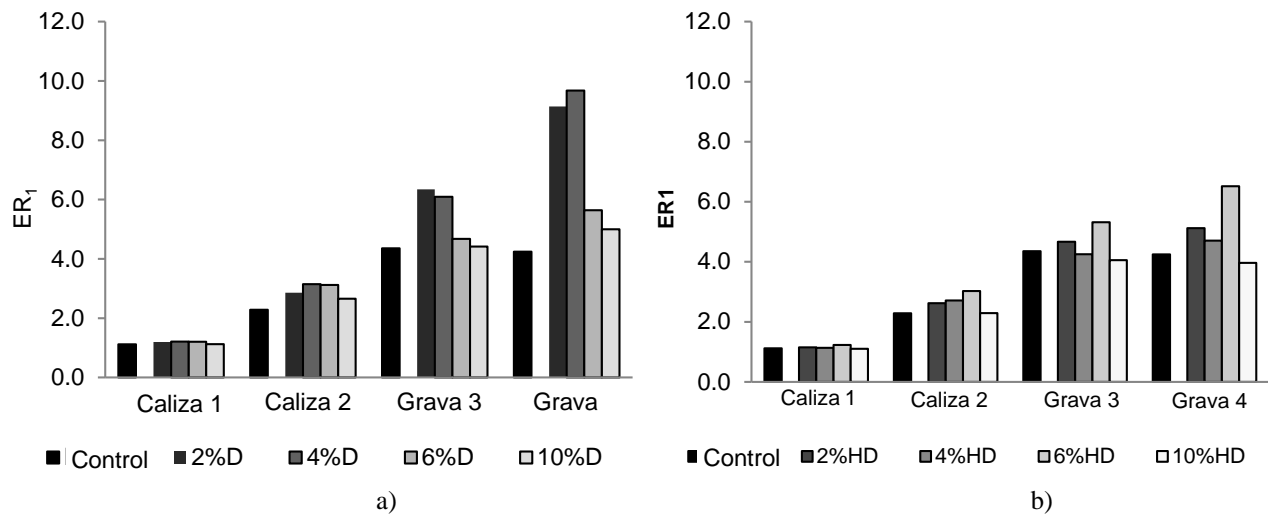


Figura 3. 6. Razón de Energía (ER_1) de los pares de agregado y los asfaltos modificados con a) diatomita y b) diatomita hidrófoba

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 3.6, 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 3.6 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 3.7.

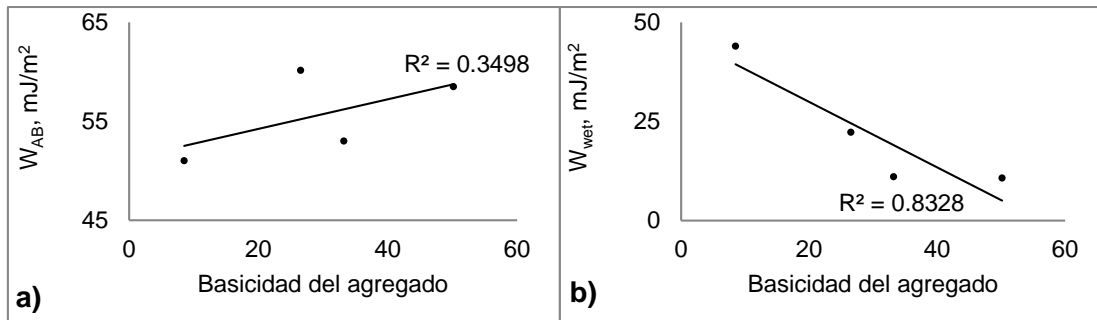


Figura 3. 7. Efecto de la basicidad del agregado sobre a) W_{AB} y b) W_{wet}

Las tendencias mostradas en la Figura 3.7 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 3.8).

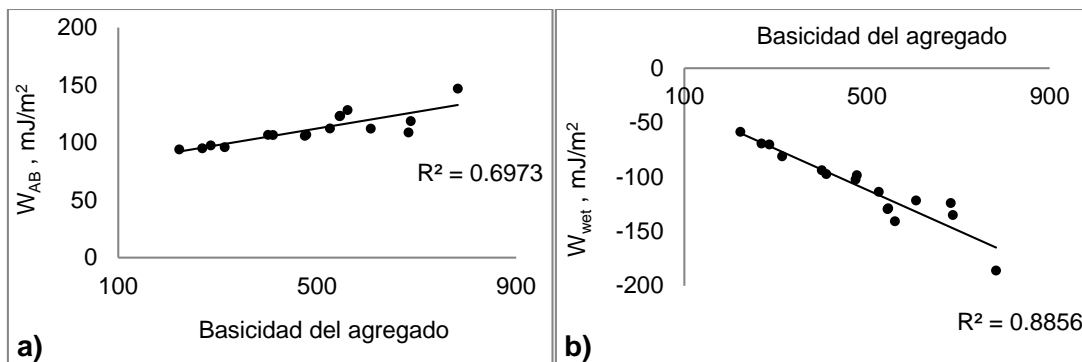


Figura 3. 8. Efecto de la basicidad de los agregados de la base de datos sobre a) W_{AB} y b) W_{wet} . Los valores fueron calculados usando los asfaltos modificados con diatomita y diatomita hidrófoba

Las tendencias de la Figura 3.8 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 4 y 5 producen las combinaciones de mayor durabilidad (Figura 3.6), 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.



3.4. 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.



4. Relación entre la energía superficial y el desempeño

4.1. Introducción

El daño por humedad es un modo de falla que afecta a los pavimentos en todo el mundo. El proceso comienza en la parte inferior de la capa de asfalto, al debilitar la unión adhesiva entre el asfalto y el agregado, y la unión cohesiva del mastic asfáltico (Das et al., 2015). La progresión del daño por humedad en un pavimento ve reflejado en el desnudamiento del asfalto, el desmoronamiento de agregados, la propensión a la deformación y el agrietamiento, entre otros (Hicks, Santucci y Aschenbrener, 2003; Caro et al., 2008; Canestrari et al., 2010; Cho y Kim, 2010; Meor Muhammad-Rafiq, y Mohd-Rosli, 2015). Por lo tanto, las consecuencias del daño por humedad podrían ser tan graves como la pérdida total de la mezcla asfáltica (Airey y Choi, 2002). Desde una perspectiva más amplia, el daño por la humedad puede considerarse como una problemática que afecta a la sociedad de muchas maneras. En consecuencia, es imperativo caracterizar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas, así como predecir la sensibilidad de una mezcla particular para deteriorarse en presencia de agua. Por lo tanto, el objetivo de esta sección es estimar la compatibilidad entre el asfalto y el agregado de mezcla en caliente mediante mediciones físicoquímicas y relacionar los resultados con los cambios mecánicos en la mezcla asociados con el daño inducido por la humedad.

4.2. Metodología

Los materiales utilizados en esta sección corresponden a las mezclas asfálticas detalladas en la Sección 2. Por tanto, los datos de energía superficial son los correspondientes a estos materiales. La preparación de las mezclas, así como la medición de energía superficial se realizó de acuerdo a los procedimientos detallados en las secciones 2.2 y 3.2, respectivamente. Por otro lado, a partir de los valores de energía superficial es posible calcular parámetros físicoquímicos (descritos por las Ecuaciones 3.2; 3.5 y 3.7), cuyos resultados se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1. Parámetros físicoquímicos de las combinaciones agregado-asfalto

Asfalto	W _{BB} (mJ/m ²)	Grava 1			Grava 2		
		W _{AB} (mJ/m ²)	W _{wet} (mJ/m ²)	ER ₂	W _{AB} (mJ/m ²)	W _{wet} (mJ/m ²)	ER ₂
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

4.3. Resultados

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. Tras la prueba mecánica, se observó 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 % (ver resultados de las pruebas mecánicas en la Sección 2). 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 4.1 muestran lo contrario. Los resultados opuestos indican que el desnudamiento (descrito por los parámetros de la Tabla 4.1) 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. 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. Para ello, se cuantificó W_{AW} y W_{BW} de los materiales en cuestión, los resultados se enlistan en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Indicadores de compatibilidad, W_{AW} y W_{BW}

Material	W_{BW} (erg/cm ²)	W_{AW} (erg/cm ²)
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 4.2 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).

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 4.2, 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.

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_2 superiores a 0.8. Los resultados en la Tabla 4.1 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_2 , se observa que la mayoría de las combinaciones hechas con asfaltos modificados muestran valores de ER_2 superiores a aquellas hechas con asfalto control. Particularmente, las combinaciones que involucran asfalto modificado con LAS muestran los valores de ER_2 más altos: se observa que el ER_2 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_2 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 4.1 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 tanto, es necesario analizar otro tipo de parámetro fisicoquímico (o combinación de ellos) para describir adecuadamente el proceso de deterioro. Por ejemplo, la Figura 4.1 muestra que no existe ningún tipo de tendencia al relacionar los parámetros de módulo (E^*R) y el valor de ER_2 (indicado como ER en la Figura 4.1), el cual es un indicador de la fuerza del enlace asfalto-agregado, aún en presencia de agua.

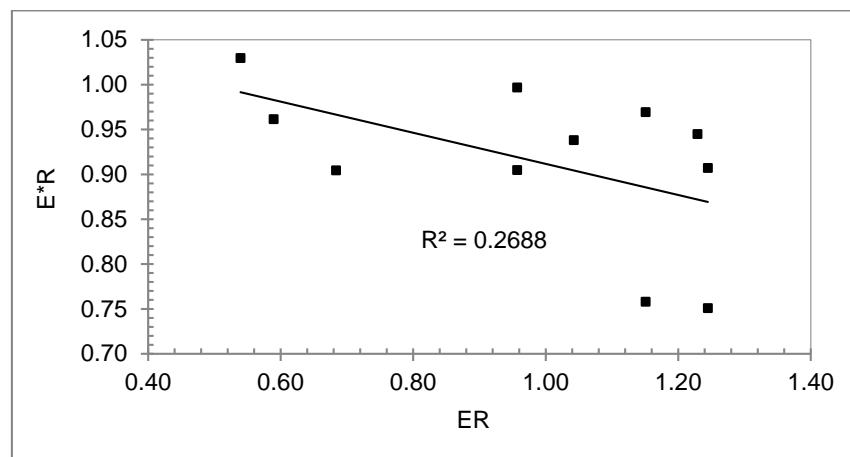


Figura 4. 1. Correlación entre los indicadores mecánicos y fisicoquímicos de la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas.

Además, se observa que el E^*R y ER siguen una tendencia opuesta: las mezclas que exhiben mayor E^*R son aquellas que exhibieron menor ER. Este hallazgo contradice lo que típicamente se espera y puede



explicarse por el hecho de que, en estas muestras, los procesos de desnudamiento no están gobernando la mecánica comportamiento de las mezclas. En este sentido, vale la pena reiterar que el parámetro ER estima la viabilidad con la que la interfaz asfalto-agregado colapsa en presencia de agua. Por lo tanto, ER es un parámetro valioso que sirve como referencia para seleccionar los materiales con menor tendencia a desarrollar desnudamiento. Sin embargo, la pérdida de módulo observada en las mezclas sometidas a condiciones de humedad severas podría estar relacionada con procesos que van más allá del desnudamiento. En otras palabras, el deterioro de la interfaz asfalto-agregado es la etapa final del daño inducido por la humedad, ya que el agua debe difundirse en el mástic para llegar a la interfaz. Durante este proceso, el mástic se hidrata y sus propiedades mecánicas se deterioran. Desde esta perspectiva y en base a la tendencia observada en la Figura 4.1, se resalta la necesidad de un nuevo parámetro para correlacionar el rendimiento de campo de las mezclas con sus propiedades de superficie. Se espera que los materiales con mayor afinidad al agua tiendan a ser más susceptibles al daño por humedad. Por lo tanto, a través de la cuantificación de la compatibilidad del agua con el asfalto y el agregado (Tabla 4.2) es posible predecir el rendimiento de daño por humedad de las mezclas asfálticas. Para ilustrar esto, se presenta la Figura 4.2.

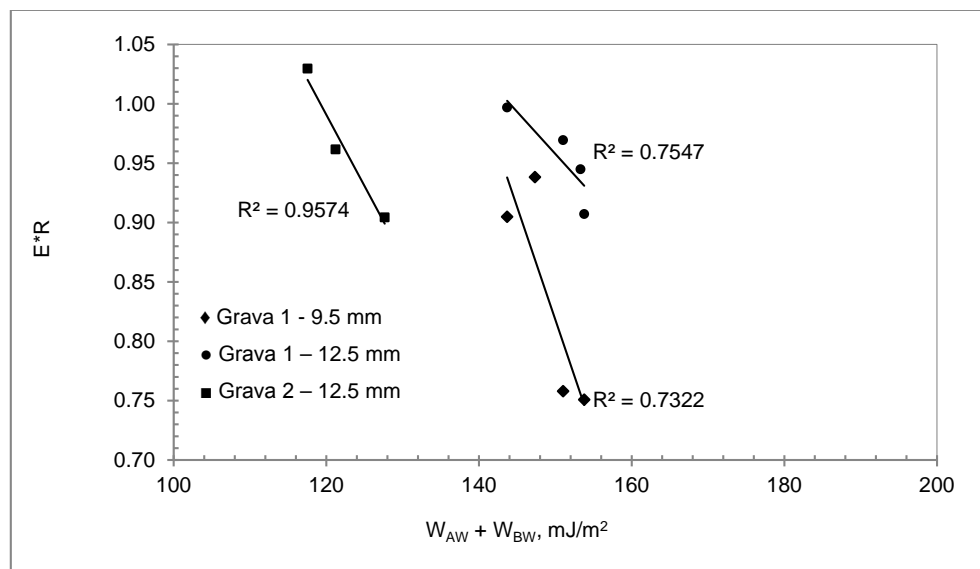


Figura 4. 2. Correlación entre el rendimiento mecánico de daños por humedad de las mezclas asfálticas y la compatibilidad del asfalto con el agua.

En la Figura 4.2, el conjunto de mezclas se analiza por separado ya que los valores de W_{AW} y W_{BW} varían según los materiales que conforman cada mezcla. Se observa que las mezclas que son más compatibles con el agua (mayor $W_{AW} + W_{BW}$) tienden a exhibir un peor daño por humedad, señalado por un deterioro más severo de las mezclas (menor E*R) después del acondicionamiento. Esta observación sugiere que los asfaltos y agregados que poseen mayor afinidad al agua exhiben interacciones más favorables con la



humedad y, como consecuencia, el agua se introduce más fácilmente en la mezcla lo cual altera sus propiedades mecánicas.

4.4. Conclusiones

Los mecanismos que experimenta una mezcla de asfalto sometida a los daños producidos por la humedad no pueden describirse o predecirse basándose únicamente en el desnudamiento (stripping, según su denominación en inglés). Como consecuencia, la relación de energía (ER) calculada mediante mediciones fisicoquímicas parece ser un parámetro limitado, ya que solo se aproxima a la factibilidad con la que el asfalto se desprende de la superficie del agregado en condiciones húmedas. Por lo tanto, el parámetro ER se considera como una herramienta útil para clasificar los materiales de acuerdo con su predisposición a desarrollar desnudamiento.

Además, la cuantificación de la compatibilidad del agua con el asfalto y el agregado permite obtener una perspectiva integral del daño por humedad, ya que la capacidad del agua para interactuar con el asfalto y el agregado describe adecuadamente la respuesta mecánica de la mezcla después de ser sometida a humedad. Se observó que el parámetro propuesto ($W_{AW} + W_{BW}$), considerado como la magnitud de la compatibilidad de la mezcla de asfalto con el agua, refleja el rendimiento del asfalto de mezcla caliente en presencia de agua. En otras palabras, se espera que las mezclas con valores más altos de $W_{AW} + W_{BW}$ exhiban un peor rendimiento con respecto al daño inducido por la humedad. Por tal razón, la compatibilidad del agua con los asfaltos y los agregados fue propuesta como un criterio importante para seleccionar y diseñar materiales para construir mezclas resistentes al agua.



5. Efecto de la oxidación sobre la resistencia a la humedad de interfaces asfalto-agregado

5.1. Introducción

Los aspectos químicos, físicos y mecánicos determinan la interacción entre un adhesivo y un sustrato. En el caso de los materiales para pavimentos, donde el ligante actúa como adhesivo y el agregado como sustrato, la buena interacción dependerá en gran medida de su composición química. Por tal motivo, se reconoce la importancia de las interacciones moleculares que tienen lugar en la superficie de los materiales, ya que definen la calidad de una interfaz. Para analizar más a fondo este tema, este estudio explora el efecto de manipular la polaridad de los ligantes en sus características de adhesión. Además, el potencial de desnudamiento (considerado aquí como una combinación de adhesión y desprendimiento en presencia de agua) se estimó por medio de mediciones de energía superficial.

Basado en estas ideas, es de suma importancia reconocer la necesidad de producir pavimentos asfálticos con mejores características de adhesión y resistencia a la humedad. Por lo tanto, el objetivo de la presente sección es analizar el efecto de la naturaleza química sobre las propiedades adhesivas de los sistemas asfalto-agregado, que a su vez están relacionados con su potencial de desnudamiento en condiciones húmedas. Para lograr el objetivo, la naturaleza química de los ligantes asfálticos se manipuló mediante modificación convencional con diatomita, nanosílica y diatomita hidrofóbica. Se determinó el potencial de desnudamiento de un conjunto de combinaciones de asfaltos y agregados para diferenciar aquellas combinaciones con un rendimiento mejorado y con ello analizar la razón de tal comportamiento.

5.2. Metodología

Se produjo un conjunto de asfaltos con diferentes polaridades, mediante la modificación con diferentes porcentajes (en peso) de compuestos inorgánicos, tales como diatomita, nanosílica y diatomita hidrofóbica, por separado.

5.2.1. Caracterización de aditivos

Preparación de las diatomitas hidrofóbicas

El objetivo de preparar diatomitas hidrófobas es lograr un material con una superficie funcional que tuviera tanto carácter polar como no polar. Esto se realizó con la intención de producir interfaces con una adhesión mejorada: se cree que las funcionalidades polares de los agregados podrían interactuar fuertemente con las especies polares libres en la superficie de la diatomita. Por otro lado, las cadenas hidrófobas ubicadas después de la funcionalización podrían mostrar una interacción más favorable con el asfalto, que es más dispersivo (menos polar). La funcionalización se llevó a cabo según el procedimiento descrito por Fatoni y colaboradores (2010).

Análisis Termogravimétrico

El análisis térmico permite verificar el comportamiento de los aditivos a diferentes temperaturas y, por lo tanto, hace posible evaluar su estabilidad durante el proceso de mezcla. Se desea que los aditivos sean



estables (para que no presenten descomposición química) a temperaturas por debajo de 160 °C, la cual corresponde a la temperatura de mezclado.

En esta investigación, una muestra de diatomita, nanosílica y diatomita hidrofóba; se colocó en bandejas de platino, por separado, y se probó utilizando un TGA Q500 de TA Instruments. Las muestras se sometieron a una rampa de temperatura de 40 a 1000 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. La figura 5.1 muestra los termogramas resultantes.

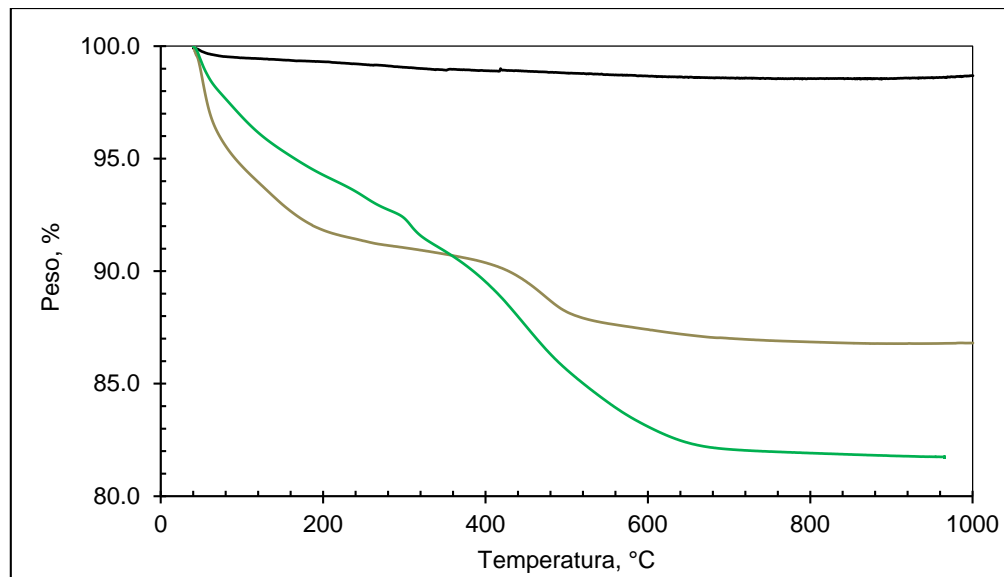


Figura 5. 1. Termogramas de diatomitas (línea gris); nanosílica (línea negra) y diatomitas hidrofóbicas (línea verde)

De acuerdo con la Figura 5.1, se observa una pérdida de agua que ocurre por debajo de 100 °C, esto es esperado, ya que los materiales se mantuvieron en recipientes cerrados fuera del desecador. En el caso de la diatomita y diatomita hidrofóbica, hay cambios de peso adicionales en el intervalo de temperatura de 200-600°C, que corresponden a una degradación de la materia orgánica contenida en este tipo de muestras. Sin embargo, la pérdida de peso a tales temperaturas es un poco mayor para las diatomitas hidrofobas debido al contenido adicional de materia orgánica introducida después de la funcionalización de la superficie. Por otro lado, nanosílica mostró la mayor estabilidad térmica, ya que no mostró ninguna pérdida de peso a lo largo de la prueba. Los resultados están de acuerdo con investigaciones anteriores (Jiang y colaboradores, 2014) y confirman la viabilidad de utilizar materiales como modificadores de asfalto.

Modificación del ligante y envejecimiento

De acuerdo con los resultados de la sección anterior, la diatomita, la diatomita hidrofóbica y la nanosílica (indicadas aquí como D, HD y NS, respectivamente) se utilizaron como aditivos aglutinantes. La fuente de aglomerante se modificó con un 2%, 4% y 6% de aditivo en peso de ligante asfáltico. Los aditivos se



incorporaron por separado a 175°C con un agitador de cizallamiento durante 1.5 horas o hasta que fuesen homogéneos.

Además, las muestras de asfalto se sometieron a un envejecimiento a corto plazo en un horno de película delgada rodante (RTFO), después de lo cual se sometieron a un envejecimiento a largo plazo en el recipiente de envejecimiento por presión (PAV). Ambos procedimientos de envejecimiento son bien conocidos por lograr la formación de especies oxigenadas como carbonilo y sulfóxidos, así como por causar un pequeño incremento en los dobles enlaces carbono-carbono (Liu, 1998; Petersen & Glaser, 2011).

Medición de Energía de Superficie

Las mediciones de ES se hicieron a las muestras de asfalto en condición original (no envejecido) y envejecido de acuerdo al procedimiento descrito en la Sección 3. Los resultados se presentan en la Tabla 5.1 (nótese que los valores de los asfaltos originales corresponden a los de la Tabla 3.1, se repiten en la Tabla 5.1 por facilidad de comparación con los asfaltos oxidados).

Tabla 5.1. Valores de energía de superficie de ligantes asfálticos

Material	Energía total de superficie γ^{total} , mJ/cm ²	Componente dispersivo γ^{LW} , mJ/cm ²	Componente ácido γ^+ , mJ/cm ²	Componente básico γ^- , mJ/cm ²
Ligante original	19.35	18.18	0.88	0.38
Oxidado	15.12	12.44	1.41	1.28
2D	13.46	9.95	2.45	1.26
2D Oxidado en PAV	14.43	11.43	2.04	1.10
4D	15.84	14.10	1.93	0.39
4D Oxidado en PAV	15.77	14.15	1.61	0.41
6D	17.54	16.23	1.43	0.30
6D Oxidado en PAV	19.27	18.48	1.20	0.13
2N	20.10	19.89	0.67	0.02
2N Oxidado en PAV	17.86	16.84	1.41	0.19
4N	15.67	13.85	1.23	0.68
4N Oxidado en PAV	18.65	17.85	1.37	0.12
6N	14.65	12.25	1.62	0.89
6N Oxidado en PAV	16.25	14.49	1.37	0.12
2HD	19.82	19.00	1.03	0.16
2HD Oxidado en PAV	17.20	13.37	2.36	1.56
4HD	21.62	21.34	0.78	0.03
4HD Oxidado en PAV	14.53	11.13	1.53	1.89
6HD	20.37	19.54	1.33	0.13
6HD Oxidado en PAV	28.41	28.38	0.30	0.00

5.3. Resultados

La modificación del asfalto se llevó a cabo para generar muestras con diferentes valores de energía superficial. En este sentido, se pretende capturar el efecto de los componentes dispersivos, ácidos y básicos sobre las propiedades adhesivas del sistema de agregado-asfalto en condiciones original y



oxidadas. Por lo tanto, la discusión de los resultados se presenta en las siguientes secciones, en las que analiza el efecto de los aditivos en la energía de la superficie del asfalto, y en general, el efecto de la energía de la superficie en los parámetros termodinámicos que describen el potencial de deterioro de las interfaces asfalto-agregadas, tales como adherencia (W_{AB}), desplazamiento (W_{wet}) y razón de energía (ER).

5.3.1. Efecto de la modificación y envejecimiento en los valores de energía superficial

En general, la modificación con diatomita y nanosílica provoca una disminución en la energía de superficie total del asfalto (Figura 5.2a). Esto responde al hecho de que el uso de diatomitas y nanosílica causa una reducción en el componente dispersivo (Figura 5.2b) del asfalto, dado que la naturaleza química de estos aditivos es principalmente polar y ácida. De hecho, generalmente se observa que ambos aditivos aumentan significativamente la acidez del asfalto puro (control) (Figura 5.2c). Por el contrario, las diatomitas hidrófobas presentan una reducción en su comportamiento polar en comparación con la diatomita convencional, como consecuencia de la modificación de la superficie. Esto representa un aumento en la naturaleza no polar de su superficie, que a su vez se refleja en el aumento del componente dispersivo y el ES total cuando se agregan al aglutinante asfáltico (Figura 5.2d).

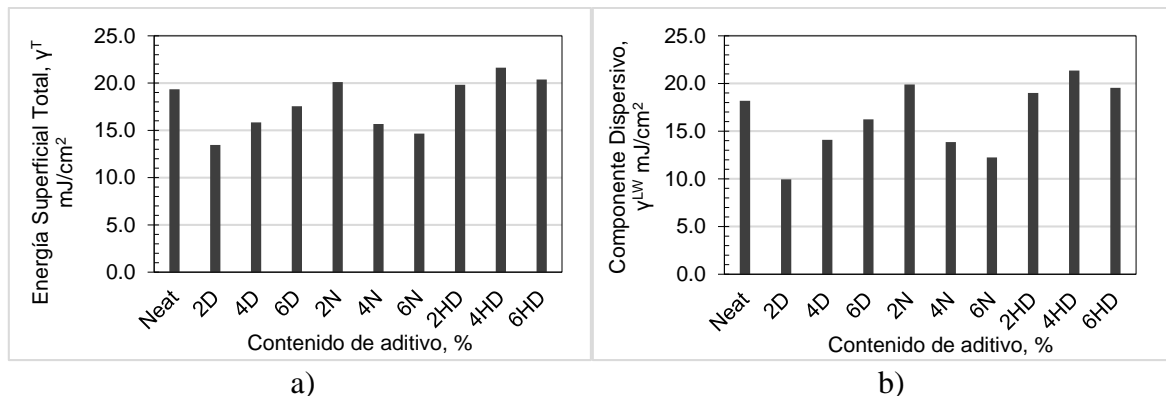


Figura 5. 2. Cambios según el contenido de aditivo en a) energía total de superficie b) componente disperso c) componente ácido y d) componente básico

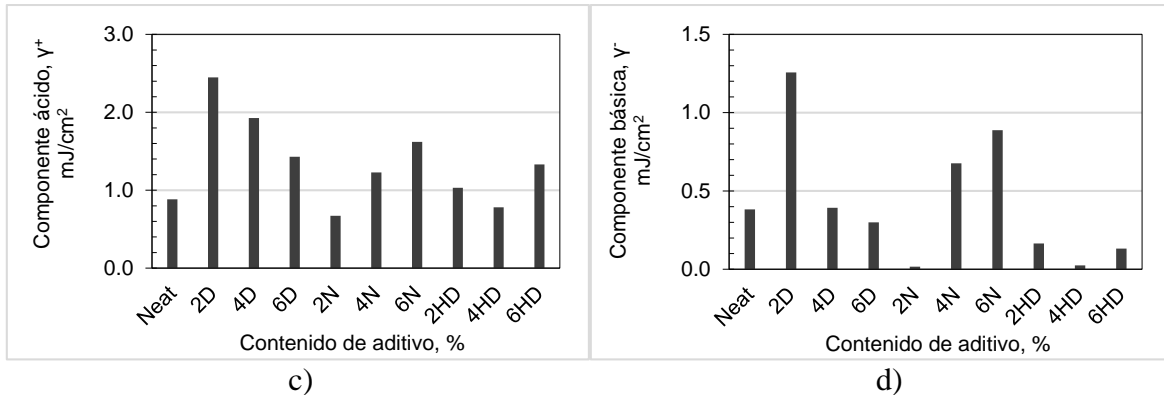


Figura 5. 2. Cont.

Según la Figura 5.2, la modificación tiene una influencia importante en los valores de los tres componentes de energía superficial. Sin embargo, los cambios que se perciben en los componentes ácidos y básicos (aumento de hasta un 300% en algunos casos) no modifican en gran medida el valor de la energía superficial total del material. Esto es evidente cuando se analiza la relación entre la energía superficial total y los componentes individuales (Figura 5.3). Se puede observar que el componente dispersivo y la ES total siguen una tendencia lineal. Este no es el caso de los componentes ácidos y básicos, para los cuales la tendencia es inversamente proporcional. Se espera tal comportamiento, ya que el asfalto es un material compuesto de hidrocarburos, principalmente. Por lo tanto, se anticipa que el componente dispersivo regirá sus características de superficie, y no tanto los componentes ácidos ni los componentes básicos.

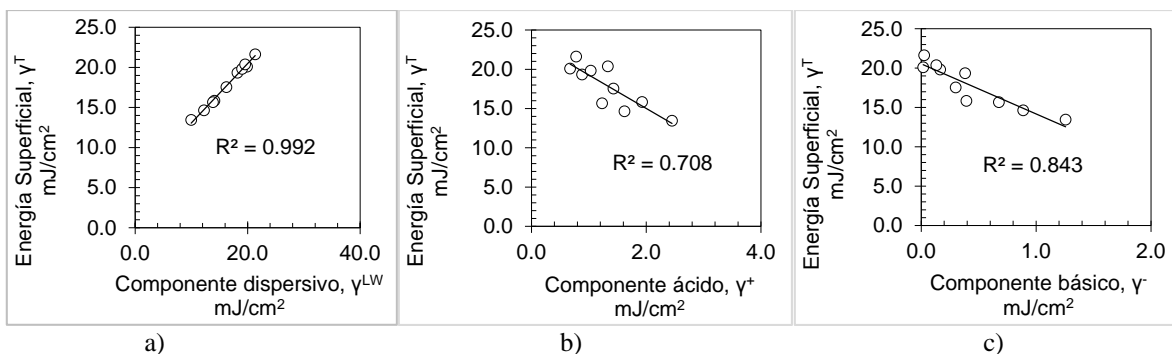


Figura 5. 3. Relación entre la energía total de superficie y la energía de superficie de los componentes a) dispersivo b) ácido y c) básico

Por otro lado, se espera que los valores de energía de la superficie cambien después de la oxidación de PAV, principalmente debido a la presencia de carbonilo y sulfóxidos. Sin embargo, este no fue el caso para la mayoría de los ligantes modificados (Figura 5.4), en los que se observó que la oxidación no afectó en gran medida las interacciones químicas que tienen lugar en la superficie. Por lo tanto, la ES de los asfaltos oxidados se ha utilizado como dato adicional para analizar el efecto de la naturaleza química en los procesos adhesivos de los materiales (ver secciones siguientes).

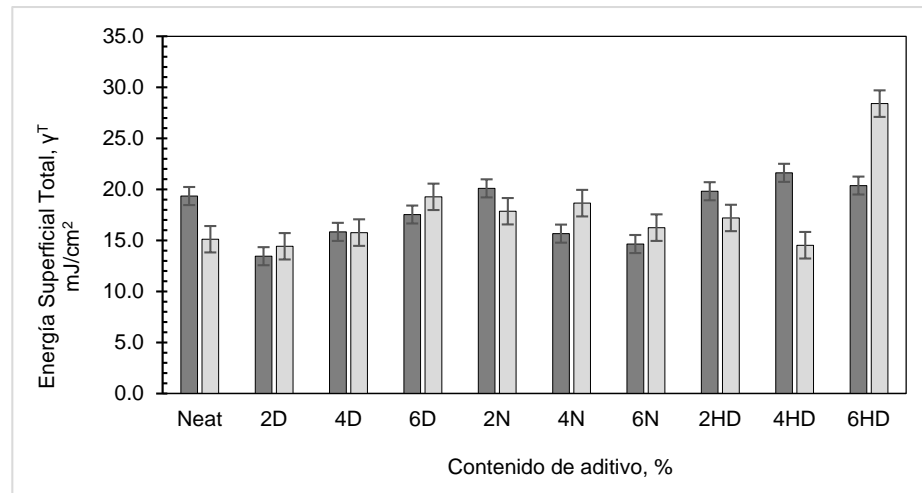


Figura 5. 4. Cambios en la Energía Superficial Total con envejecimiento (original: gris, envejecido con PAV: gris claro)

5.3.2. Efecto de la energía de superficie de los componentes en potencial de desnudamiento

Este estudio considera el potencial de desnudamiento como la suma de dos factores: la interacción entre el asfalto y el agregado (adhesión) y la viabilidad con que el agua se interpone en la interfaz asfalto-agregado (desplazamiento). Para considerarse resistente al desnudamiento, la combinación de asfalto y agregado debe exhibir un valor alto de adherencia (W_{AB}) y un bajo valor de desplazamiento por efecto del agua (W_{wet}). Esto significaría que la superficie de contacto (interfaz) entre los materiales es lo suficientemente fuerte como para que el agua no pueda dañarla.

Los resultados de los parámetros del potencial de desmonte de las combinaciones analizadas (Figura 5.5) muestran que existe una diferencia entre los pares producidos con cada una de las muestras de agregado. Además, es posible notar que las combinaciones que involucran a las Calizas 1 y 2 y la Grava 1 se comportan de manera similar. Por tal razón, las combinaciones producidas con la Caliza 1 se utilizarán como muestra para analizar el efecto de los valores de energía superficial sobre el potencial de desnudamiento de los pares asfalto-agregados. Por el contrario, como las combinaciones producidas con la Grava 2 exhibieron valores opuestos, se analizarán por separado (Figura 5.6).

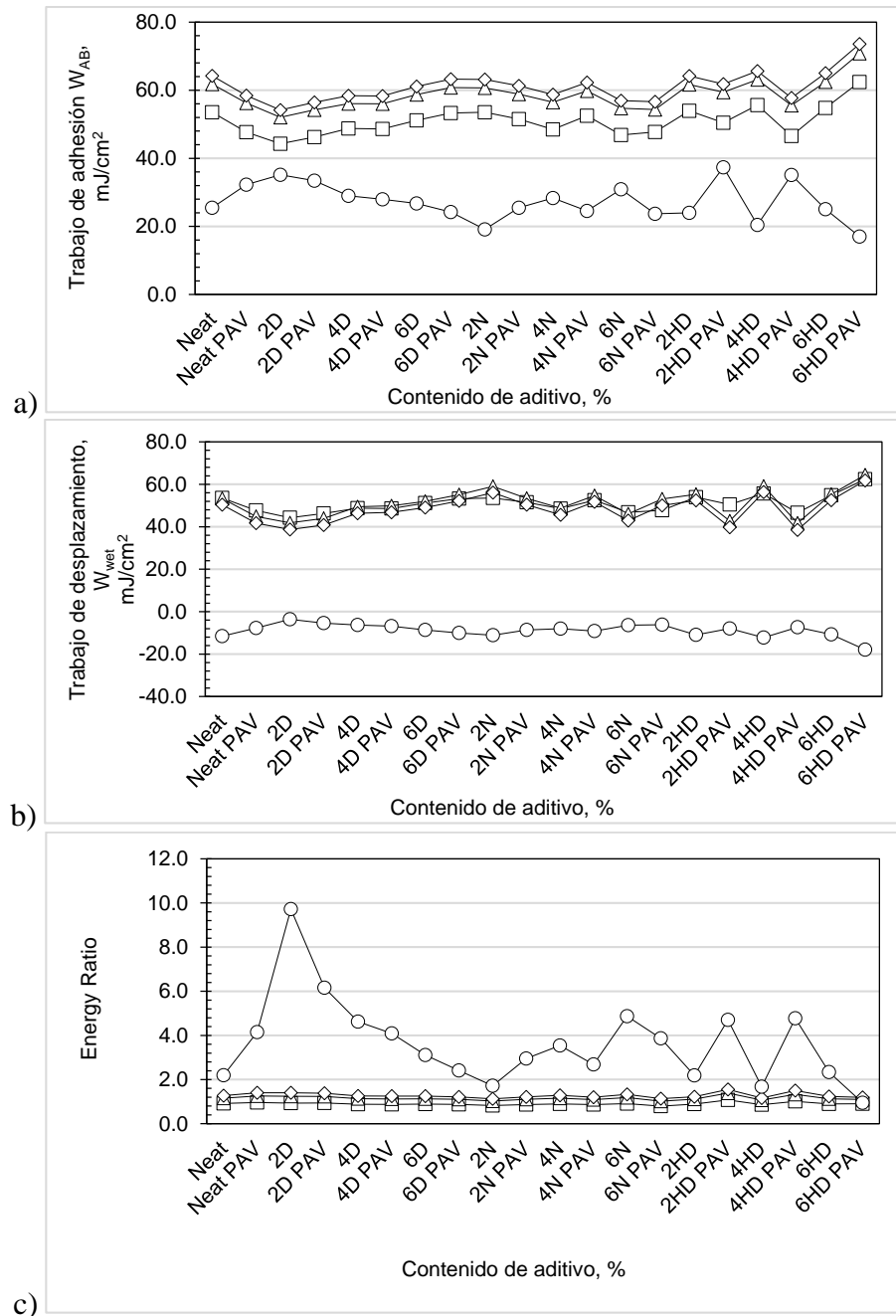


Figura 5. 5. a) Trabajo de adhesión b) trabajo de desplazamiento y c) Razón de energía para las combinaciones producidas con ligantes y Caliza 1 (cuadrados), Caliza 2 (triángulos), Grava 1 (diamantes) y Grava 2 (círculos)

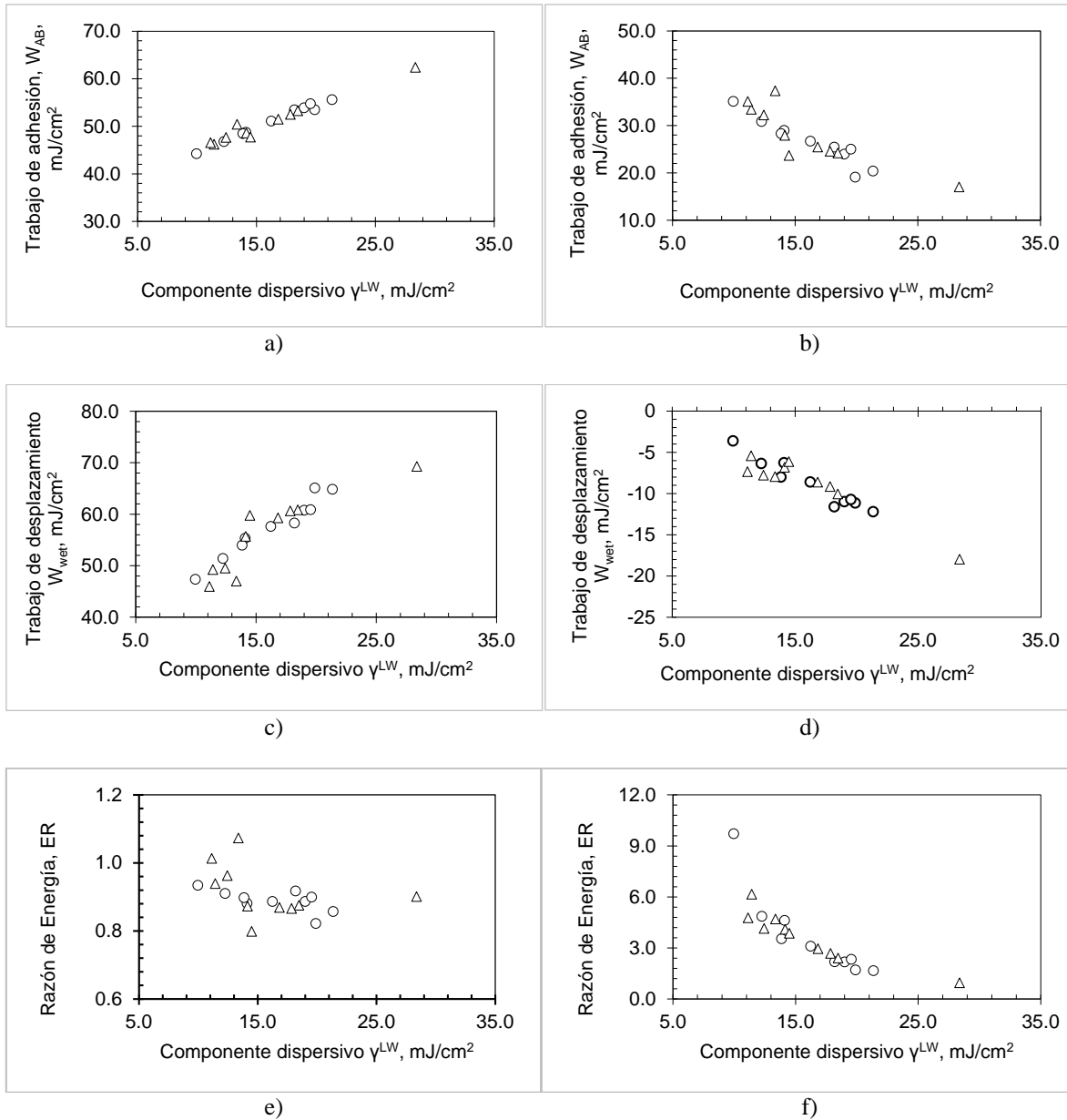


Figura 5. 6. Trabajo de adhesión (a,b), trabajo de desenlace (c,d) and razón de energía (e,f) para las combinaciones producidas con Caliza 1 (a,c,e) y Grava 2 (b,d,f)

De acuerdo a la Figura 5.6, es posible notar que el componente dispersivo del asfalto muestra una relación lineal con los parámetros de adhesión, desplazamiento y ER. Por el contrario, los componentes polares no mostraron ninguna tendencia, por lo que no se muestran en la Figura 5.6.



Es importante resaltar que los valores para el trabajo de adhesión (W_{AB}) son más altos para las combinaciones que involucran a la Caliza 1, en comparación con los de la Grava 2. Por el contrario, los valores de trabajo de desplazamiento (W_{wet}) son más bajos para las combinaciones de Grava 2. Ambos escenarios (mayor adhesión y menor desplazamiento) son deseables, pero, según la Figura 5.5, no se pueden obtener con el mismo agregado. Una posible explicación del hecho de que estos dos materiales mostraron una tendencia contraria está dada por sus valores de energía de superficie. Se encontró que la Caliza 1 (que es representativa de los dos agregados restantes) y la Grava 2 tienen valores opuestos de componentes dispersivos y polares (ver Tabla 3.1), lo que sugiere que sus características de interfaz se comportarán como una función de su naturaleza química, como se esperaba. En general, el componente dispersivo desempeña un papel crucial, no solo para determinar la naturaleza química de la superficie del aglomerante (Figura 5.2), sino durante la formación de una nueva interfaz, cuya resistencia (interacción favorable) depende de la energía superficial del agregado (Figura 5.6). Lo anterior destaca la importancia de la contribución del agregado en la producción de interfaces de alta calidad: los cambios importantes en los componentes dispersivos o polares en los agregados pueden dar como resultado pares de asfalto-agregado con diferente (o incluso opuesta) resistencia al desnudamiento.

Con respecto a la modificación con diatomita hidrófoba, se observa en la Figura 5.5 que las combinaciones producidas con tal asfalto modificado mostraron una adhesión mejorada, en comparación con los otros ligantes. Estos resultados no solo son esperados, sino que fueron diseñados. La incorporación de la HD estaba destinada a mejorar las características de adhesión mediante una interacción diferenciada entre las funcionalidades polares y no polares de agregados y asfaltos. Esta observación es clave, ya que ayuda a avanzar en el diseño de interfaces con características mejoradas de adhesión y resistencia al agua, no solo por medio de un aditivo diseñado, sino también por medio de la modificación convencional del asfalto.

5.4. Conclusiones

Se encontró que aquellas combinaciones que presentaban valores más altos de componente dispersivo exhibían valores más altos de adhesión. Por el contrario, aquellos que mostraron altos valores de acidez o basicidad mostraron una pobre adhesión. Lo anterior implica que es necesario lograr un equilibrio entre la polaridad y el carácter no polar de los asfaltos mediante modificación. Esto permitirá lograr valores más convenientes de adhesión y separación, que aseguren una mejor interacción entre el asfalto y el agregado. Además de lo anterior, la resistencia a la humedad por el efecto del agua responde a la naturaleza química del agregado, específicamente, a sus valores de componentes dispersivo, ácido y básico. Por lo tanto, se espera que los resultados obtenidos en este estudio sirvan como punto de partida para tener en cuenta el diseño de interfaces asfalto-agregado más resistentes, a partir de la manipulación de los valores de energía superficial del asfalto, que se logra mediante la modificación con aditivos de diferente naturaleza química, así como a través de la selección de fuentes de agregados que permiten una mejor interacción con el ligante asfáltico.



6. Conclusiones generales

Las conclusiones más relevantes de esta 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.



7. Productos generados

7.1. Publicaciones

1. Aguiar, J., Salazar, J., Baldi, A., Leiva, F., Loria, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Transportation Research Record*, 2505, 57-65.
2. Aguiar, J. P., Baldi, A., Salazar, J., Loría, L., Pacheco, J., Reyes, F., Leal, N. (2016). Adhesive Properties of Asphalts and Aggregates in Tropical Climates. *International Journal of Pavement Engineering*. 738-747. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199884
3. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2016). Influence of nanosilica and diatomite on the physicochemical and mechanical properties of binder at unaged and oxidized conditions. *Construction and Building Materials*, 127, 176-182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.140
4. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L., Bhasin, A. (2017). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. *Road Materials and Pavement Design*. 18(sup 2), 304-317. doi: 10.1080/14680629.2017.1304265.
5. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Loría-Salazar, L. (2017). Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 18(sup 2), 318-328. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304248.
6. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2018). Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto-agregado. *Infraestructura Vial*, 21(24), 5-9.
7. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2018). Effect of chemical nature on stripping potential of binder-aggregate interfaces. *Energy & Fuels*. En revision.

7.2. Generación de especificación

El conocimiento desarrollado en temas de energía superficial por profesionales la Unidad de Materiales y Pavimentos del LanammeUCR, ha permitido la generación de varias publicaciones científicas en revistas de alto nivel, las cuales se enlistan en la Sección 7.1. Asimismo, los resultados obtenidos han quedado plasmados en los Informes LM-PI-UMP-038-R1, LM-PI-UMP-038-R2 y LM-PI-UMP-038-R3 y el presente informe final LM-PI-UMP-038-R4, presentados ante Vicerrectoría de Investigación. Por lo tanto, como producto de esta investigación, se ha propuesto la Especificación de Energía Superficial y Agregados, la cual busca proponer un criterio de aceptación para las combinaciones de

Informe LM-PI-UMP-038-R3	Fecha de emisión: 11 de diciembre de 2018	Página 38 de 61
--------------------------	---	-----------------



asfalto y agregado que posean una mayor compatibilidad fisicoquímica ante el daño por humedad. Tal criterio fue calculado a partir de una base de datos generada en el LanammeUCR, la cual cuenta con más de 200 combinaciones asfalto-agregado representativas del país.

En el Anexo se presenta la propuesta de la especificación.

8. Referencias

- 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.
- 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
- 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
- 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
- Baldi-Sevilla, A. (2015). Evaluación de la resistencia al daño por humedad y desempeño de asfalto modificado con nanosílica, diatomita y diatomita hidrófoba. Thesis dissertation. University of Costa Rica, San José, Costa Rica.
- 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
- Cheng, D., Little, D., Lytton, R., and Hostle, J. (2003). "Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixture by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated Load Conditions." *Transp. Res. Rec.*, 1832, 42-49. doi: 10.3141/1832-06



- Choubane, B., Page, G. C., and Musselman, J. A. (1998). "Investigation of water permeability of coarse graded superpave pavements." *J.Assoc. Asphalt Pav.*, 67, 254–71.
- Das, P. K., Baaj, H., Kringos, N., & Tighe, S. (2015). Coupling of oxidative ageing and moisture damage in asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 16(S1), 265–279. doi:10.1080/14680629.2015.1030835
- 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
- Fatoni, A., Koesnarpardi, S., Hidayati, N. Synthesis, characterization and applications of diatomaceous earth-4,4-diaminodiphenylether-O-hydroxybenzaldehyde as an adsorbent of Ag(I) metal ion. *Indones. J. Chem.* **2010**, 10(3), 315-319. doi:10.14499/ijc-v10i3p315-319
- Good, R. J., and van Oss, C. J., (1991). *The Modern Theory of Contact Angles and the Hydrogen Bond Components of Surface Energies*. Plenum Press, New York.
- Grenfell, J., Ahmad, N., Liu, Y., Apegyei, A., Largec, D., and Airey, G. (2014). "Assessing asphalt mixture moisture susceptibility through intrinsic adhesion, bitumen stripping and mechanical damage." *Road Mater. Pavement*, 15(1), 131-152. doi: 10.1080/14680629.2013.863162
- 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, R. G. (1991). "Moisture damage in asphalt concrete." NCHRP Synthesis of Highway practice 175: TRB National Research Council, Washington, D.C.
- Hicks, G., Santucci, L., & Aschenbrener, T. (2003). *Introduction and seminar objectives. Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar, San Diego, California*. Washington DC: Transportation Research Board.
- Jiang, W., Luo, S., Liu, P., Deng, X., Jing, Y., Bai, C., Li, J. Purification of biosilica from living diatoms by a two-step acid cleaning and baking method. *J. Appl. Phycol.* **2014**, 26, 1511-1518. doi:10.1007/s10811-013-0192-3
- Kakar, M. K., Hamzah, M. O., and Valentin, J. (2015). "A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations." *J. Clean. Prod.*, 99, 39-58. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.028
- Kiggundu, B. M., and Roberts, F. L. (1988). "Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods." NCAT Report No. 88-2, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.



- 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.
- 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).
- Liu, M.; Ferry, M.A.; Davison, R.R.; Glover, C.J.; Bullin, J.A. Oxygen uptake as correlated to carbonyl growth in aged asphalts and asphalt Corbett fractions. *Ind. Eng. Chem. Res.* **1998**, *37*, 4669-4674. doi: 10.1021/ie980450o
- 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.
- Majidzadeh, K., and Brovold, F. N. (1968). Special Report 98: State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures. Highway Research Board (HRB), National Research Council, Washington, D.C.
- Masad, E., Arambula, E., Ketcham, R. A., Abbas, A. R., and Martin, A. E. (2007). "Nondestructive measurements of moisture transport in asphalt mixtures." *J. Assoc. Asphalt Pav.*, *76*, 919-952.
- 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
- Petersen, J. C.; Glaser, R. Asphalt oxidation mechanisms and the role of oxidation products on age hardening revisited. *Road Mater. Pavement* **2011**, *12*(4), 795-819. doi: 10.1080/14680629.2011.9713895
- Taylor, M. A., and Khosla, N. P. (1983). "Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art." *Transport. Res. Rec.*, *911*.
- Terrel, R. L., and Shute, J. W. (1989). "Summary report on water sensitivity." SHRP-A/IR-89-003, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C.
- van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., and Good, R. J. (1988). "Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems." *Chem. Rev.*, *88*, 927-941. doi: 10.1021/cr00088a006
- Vargas-Nordbeck, A., Leiva-Villacorta, F., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. (2016). "Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Mixtures Through Simple Performance Tests." *Trans. Res. Rec.*, *2575*, 70-78. doi: 10.3141/2575-08



- 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., Apegyei, 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



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Anexo A

PROPUESTA DE MODIFICACIÓN AL CR-2010 ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTOS Y AGREGADOS



ENERGÍA SUPERFICIAL DE ASFALTO Y AGREGADO

01 Descripción

Este trabajo consiste en cuantificar la susceptibilidad a la humedad de materiales para mezclas asfálticas con base en sus valores de energía superficial, así como en parámetros derivados de la misma. Lo anterior responde a la necesidad de la escogencia de mezclas asfálticas resistentes al deterioro causado por el agua, con el objetivo de aumentar la durabilidad de estas en presencia de humedad.

02 Material

Conforme a las siguientes Subsecciones:

Cemento asfáltico sin modificantes	702.01
Cemento asfáltico modificado	702.02
Agregado ⁽¹⁾	

(1) Piedra bruta cuyo diámetro permita realizarle cortes transversales de acuerdo a la Subsección 04

Se requerirán los siguientes disolventes: agua, etilenglicol, glicerina, formamida y diyodometano. Estos deberán seguir las especificaciones de la Norma ASTM D7490-13, detalladas en la Subsección 03.

03 Requisitos mínimos

Para poder realizar la medición de energía superficial, los disolventes deberán cumplir los requisitos mostrados en la Tabla 01.

Tabla 01. Requisitos mínimos para la medición de energía superficial

Disolvente	Grado de pureza
Agua	Grado reactivo o superior ⁽¹⁾
Etilenglicol ⁽²⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Glicerina ⁽²⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Formamida ⁽⁴⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾
Diyodometano ⁽⁴⁾	Grado reactivo o superior ⁽³⁾

(1) De acuerdo a la norma ASTM D1193 - 06.

(2) Se deberá contar al menos con uno de estos reactivos para la medición.

(3) De acuerdo a la Norma ASTM D7490 - 13.

(4) Se deberá contar al menos con uno de estos reactivos para la medición.

04 Preparación de las muestras

Se prepararán las muestras de asfalto al verter una cantidad determinada de asfalto caliente sobre un portaobjetos de vidrio limpio y seco, tal que se cubra la superficie del vidrio en su totalidad. Se calentará



el portaobjetos con el asfalto a (100 ± 5) °C hasta alcanzar homogeneidad superficial en la película de asfalto resultante. Se deberá asegurar el recubrimiento completo del portaobjetos por la película asfalto. Se prepararán las muestras de agregado partiendo de una piedra bruta, la cual se cortará en porciones, tipo rebanada, cuyas dimensiones deberán ser acordes al instrumento (goniómetro) a ser utilizado. Las muestras de agregado se lavarán con agua destilada y deberán colocarse dentro de un baño ultrasónico durante al menos 5 minutos. Se sacarán del baño ultrasónico y se dejarán secar en un horno a (100 ± 5) °C durante 1 hora.

05 General

Los disolventes, las muestras de película de asfalto y las muestras de agregado deberán almacenarse dentro de una desecadora. Al menos 24 horas antes de llevar a cabo la medición los disolventes y las muestras deberán mantenerse dentro de un cuarto con temperatura controlada de (20.0 ± 0.05) °C, dentro de una desecadora.

Las muestras no deberán tener defectos visibles ni deberán ser tocadas con los dedos o contaminadas de alguna otra forma.

La humedad relativa del recinto donde se llevarán a cabo las mediciones deberá ser $\geq 50\%$.

La distancia entre la punta del dispensador y la muestra no debe de exceder los 3 mm.

El valor máximo de volumen dispensado es de (20.0 ± 0.1) μL .

El tiempo entre el posicionamiento de la gota y la medición no puede exceder de los 30 s debido a que existen fenómenos de evaporación o difusión.

06 Procedimiento

La medición de Energía superficial se basa en el procedimiento descrito en las Normas ASTM D7490 - 13 y ASTM D7334 - 08(2013). A continuación, se resumen los puntos más relevantes.

- (a) Se asegurará del cumplimiento de la Subsección 05.
- (b) Se deberá nivelar la plataforma del goniómetro según las indicaciones del fabricante.
- (c) Se deberá medir el ángulo de contacto de los disolventes de la Tabla 01 (uno por vez) de acuerdo a la Norma ASTM D7334 - 08(2013). Brevemente:
 - (1) Mediante el uso de un volumen definido de líquido de prueba descritos en la Tabla 1 se extraerá una gota mediante un dispensador automático.
 - (2) Se medirá el ángulo de contacto mediante la captura de la imagen de la gota del líquido de prueba y mediante el uso del software brindado por el fabricante del equipo se analiza la misma.
 - (3) Se establecerá el horizonte de la gota y su respectivo vertical con el fin de determinar el ángulo de contacto y la simetría de la misma.

Informe LM-PI-UMP-038-R3	Fecha de emisión: 11 de diciembre de 2018	Página 45 de 61
--------------------------	---	-----------------



(d) En el caso de agregado se debe verificar que ambas caras del mismo posean la suficiente planicidad.

(e) Se considera pertinente que el agregado tenga un acabado superficial que permita la reflexión de luz con el fin de definir un horizonte que el programa del goniómetro necesita.

07 Aceptación

Las mediciones de ángulo de contacto deben seguir la tolerancia especificada por la Norma ASTM D7490.



Anexo B

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

1. Información básica:

Código:	B5A44		
Nombre del proyecto, actividad o programa:	Análisis físico-químico de adhesión asfalto-agregado en Costa Rica		
Programa de adscripción:	Ley 8114 Impuesto a combustibles		
Unidad base	LanammeUCR	Unidad de apoyo	NA
Período vigencia:	01 de marzo de 2015 al 31 de diciembre de 2018		
Fecha de presentación:	Diciembre 2018		

2. Descripción general:

El daño por humedad es un proceso indeseable que resulta en la pérdida de propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica. Por lo tanto, la aproximación de la resistencia a la humedad de los materiales del pavimento se ha convertido en un tema de investigación importante. Como consecuencia, se han desarrollado una gran cantidad de pruebas para evaluar el comportamiento de daño por humedad de una mezcla de asfalto. Desafortunadamente, la mayoría de las pruebas de laboratorio no muestran una buena correlación con el rendimiento en el campo de las mezclas de asfalto. Se han atribuido estas inconsistencias al hecho de que las pruebas relacionan el daño por humedad a las propiedades mecánicas del asfalto, ignorando la contribución de las propiedades fisicoquímicas de los materiales individuales a la durabilidad de la mezcla. Con base en esta afirmación, se destaca la necesidad de tener una perspectiva integral del daño por humedad para evaluar la susceptibilidad de los pavimentos a ser deteriorados por el agua.

En este estudio, las propiedades químicas de los materiales se consideran clave para describir la susceptibilidad del pavimento ante el daño por humedad. Específicamente, se ha elegido la energía superficial para evaluar la resistencia a la humedad de los aglutinantes y agregados mediante parámetros físico-químicos tales como adherencia (W_{AB}), el potencial de desnudamiento (W_{wet}) y relación de energía (ER).

Con base en esto, se ha reconocido la necesidad de un parámetro integral que describa las interacciones entre el agua y los materiales del pavimento que puedan servir para predecir su susceptibilidad al daño por la humedad. Por lo tanto, en el presente informe se muestran los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización fisicoquímica de los materiales para pavimentos y su relación con el desempeño mecánico que exhiben. Los hallazgos permiten explicar desde una perspectiva más integral la sensibilidad de los materiales a ser dañados por el agua, por lo que se muestran como una mejora al criterio de selección de materiales de forma que se elijan aquellos que sean superiores y que tengan más probabilidad de tener una mayor vida útil.



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

Objetivos específicos y metas	% de logro	Actividades desarrolladas	Dificultades y formas de resolverlas
<p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 01</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuantificar la adhesividad de una fuente de asfalto con distintos tipos de agregado mineral de uso común en Costa Rica. <p>METAS: Analizar la susceptibilidad a la humedad de combinaciones asfalto-agregado.</p> <p>Indicador: Parámetros fisicoquímicos y mecánicos como la afinidad asfalto-agregado y pérdida de módulo de los especímenes luego de haber sido expuestas a condiciones de humedad.</p>	100	Se midió la energía superficial de asfaltos y agregados y se relacionaron los parámetros obtenidos con su desempeño mecánico bajo condiciones húmedas. Se logró distinguir entre los materiales y combinaciones más resistentes ante el daño por humedad.	NA
<p>OBJETIVO ESPECÍFICO: 02</p> <ul style="list-style-type: none"> Caracterizar el efecto del uso de aditivos de diferente índole en la susceptibilidad al daño por humedad. <p>METAS: 1) Identificar los agregados que podrían ser más susceptibles al daño por humedad.</p> <p>Indicador: Parámetros fisicoquímicos y mecánicos como la afinidad asfalto-agregado y pérdida de módulo de los especímenes luego de haber sido expuestas a condiciones de humedad.</p>	100		NA

*Agregar las celdas que sean necesarias



4. Resultados globales (utilice la cantidad de palabras necesarias):

<p>Resultados principales: La investigación permitió concluir que la naturaleza química de los materiales para pavimentos está estrictamente relacionada con el desempeño mecánico de la mezcla ante el daño por humedad.</p>
<p>Impacto del proyecto en los ámbitos que corresponda: Se espera que el impacto del proyecto corresponda a una contribución al estado de conocimiento existente en el daño por humedad de mezclas asfálticas. Con esto, podrían generarse soluciones a la problemática causada por este proceso. Específicamente, se generó una propuesta de especificación para la modificación del Manual de Especificaciones CR-2010, en la que se pretende incluir la medición de la energía superficial como uno de los criterios de selección de materiales para pavimentos.</p>
<p>Beneficios para la unidad académica y la Universidad de Costa Rica: Los beneficios son: Transferencia de tecnología y aporte al estado de conocimiento.</p>
<p>Interrogantes y nuevas investigaciones: Continuar con el análisis de mezclas asfálticas y desarrollar protocolos de preparación de muestras.</p>
<p>Actividades pendientes: NA</p>

5. Producción académica (adjuntar anexos):

<p>Referencias de los artículos u otros productos que se proyectan:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Aguiar, J., Salazar, J., Baldi, A., Leiva, F., Loria, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. <i>Transportation Research Record</i>, 2505, 57-65. 2. Aguiar, J. P., Baldi, A., Salazar, J., Loría, L., Pacheco, J., Reyes, F., Leal, N. (2016). Adhesive Properties of Asphalts and Aggregates in Tropical Climates. <i>International Journal of Pavement Engineering</i>. 738-747. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199884 3. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2016). Influence of nanosilica and diatomite on the physicochemical and mechanical properties of binder at unaged and oxidized conditions. <i>Construction and Building Materials</i>, 127, 176-182. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.140 4. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L., Bhasin, A. (2017). Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. <i>Road Materials and Pavement Design</i>. 18(sup 2), 304-317. doi: 10.1080/14680629.2017.1304265. 5. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordcbeck, A., Loría-Salazar, L. (2017). Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures. <i>Road Materials and Pavement Design</i>. 18(sup 2), 318-328. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304248.



6. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2018). Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto-agregado. *Infraestructura Vial*, 21(24), 5-9.
7. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L. (2018). Effect of chemical nature on stripping potential of binder-aggregate interfaces. *Energy & Fuels*. En revision.

Títulos de las ponencias y participación en eventos, lugar y fechas:

1. Aguiar, J. P., Baldi, A., Salazar, J., Loría, L., Pacheco, J., Reyes, F., Leal, N. Adhesive properties of asphalts and aggregates in tropical climates. 10° Simposio en Ciencia de Materiales Avanzados y Nanotecnología 2015. UCR. Diciembre, 2015.
2. Aguiar-Moya, J. P., Salazar, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., Loría-Salazar, L. G. Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures using the Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. Transportation Research Board, Washington, 2016.
3. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., Vargas-Nordbeck, A., Loría-Salazar, L. Effect of aggregate-bitumen compatibility on moisture susceptibility of asphalt mixtures. European Asphalt Technology Association (EATA), 2017. Zürich, Suiza.
4. Baldi-Sevilla, A., Montero, L. M., Aguiar-Moya, J. P., Loría-Salazar, L., Bhasin, A. Influence of bitumen and aggregate polarity on interfacial adhesion. European Asphalt Technology Association (EATA), 2017. Zürich, Suiza.
5. Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., & Loría-Salazar, L. Effect of oxidation on stripping potential of binder-aggregate interfaces. Petersen Asphalt Research Conference (PARC), 2018. Laramie, Wyoming, Estados Unidos.

Impacto en procesos de enseñanza aprendizaje:

NA

Otros productos:

NA

6. Trabajos de graduación y participación estudiantil:

Asistentes	Labores ejecutadas
Michelle Münkkel Jiménez	Preparación de muestras Mediciones de energía superficial Cálculos y análisis de datos
Stuar Tencio González	
Nathalia Rojas González	

*Agregar las celdas que sean necesarias

Título de las tesis involucradas en el proyecto	Nombre de los/las estudiantes	Grado



<p>Determinación de las mejores condiciones de preparado de muestra para las pruebas de energía superficial y adhesión neumática en agregado con análisis topológico superficial para la generación de un protocolo.</p>	<p>Stuar Tencio González</p>	<p>Licenciatura en Ingeniería Química</p>
--	------------------------------	--

*Agregar las celdas que sean necesarias

7. Comentarios generales:

Ninguno

8. Informe financiero (adjuntar informe respectivo):

NA

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

Comentarios:
Ninguno

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

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

11 de diciembre de 2018

José Pablo Aguiar Moya

Fecha

Firma

Investigador(a) principal

Versión 14-12-2018.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Anexo C



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
COMITÉ ÉTICO CIENTIFICO

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

LanammeUCR

Aplicación para revisión continua o para cerrar el estudio*

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

Proyecto #: B5A44

Fecha de expiración de la vigencia de la revisión inicial otorgada por el CEC: 31 de diciembre, 2018.

Investigador(a) principal: Rafael Ernesto Villegas Villegas

Título de la investigación: Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural

1. ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN

Marque la opción que describe mejor el estado actual de esta investigación:

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



remanentes se limitan a análisis de datos que puede requerir contacto con información sobre la que usted normalmente no tiene acceso, tal como registros médicos, académicos, especímenes de laboratorio, patología, etc.

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

2. CANTIDAD DE PARTICIPANTES

Complete con la información correspondiente:

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

José Pablo Aguiar Moya, investigador principal, sin carga académica

Jorge Salazar Delgado, investigador asociado, sin carga académica

Alejandra Baldi Sevilla, investigador asociado, sin carga académica

Ellen Rodríguez Castro, investigador asociado, sin carga académica

Luis Guillermo Loría Salazar, investigador asociado, sin carga académica

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

5

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

0

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

5

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

Ninguna

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

Conteste todas las preguntas, para las que no aplican a su estudio indique NO.

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

Informe LM-PI-UMP-038-R3	Fecha de emisión: 11 de diciembre de 2018	Página 53 de 61
--------------------------	---	-----------------



- B. SI NO ¿El estudio ha estado reclutando participantes? *Si la respuesta es NO, pero la de A. fue SI, incluya un resumen describiendo las razones por las cuales no se ha producido.*
- C. SI NO ¿Alguno de los participantes se ha retirado del estudio, ha sido sacado o se ha perdido? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo describiendo las razones para esto.*
- D. SI NO ¿Algún participante se ha quejado de la investigación? *Si la respuesta es SI, incluya un resumen narrativo de las quejas recibidas.*
- E. SI NO ¿Se ha publicado literatura científica relevante para esta investigación, durante este periodo, que pueda alterar las apreciaciones iniciales de riesgos o de beneficios asociados a este estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de esta publicación y un resumen narrativo.*
- F. SI NO ¿Ha habido hallazgos preliminares, incluyendo informes interinos, manuscritos, resúmenes, publicaciones y hallazgos clínicos, que puedan tener impacto sobre el estudio? *Si la respuesta es SI, adjunte copias de estos informes y un resumen narrativo. Anote cualquier evento o descubrimiento que pueda alterar la razón riesgo/beneficio del estudio, incluyendo informes favorables.*
- G. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio como los que se envían a la Vicerrectoría de Investigación, a las agencias financiadoras y otros? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*
- H. SI NO ¿Se han realizado informes de avance del estudio por parte de otros investigadores participantes, fuera de la UCR, para enviar a sus respectivas instituciones (estudios multicéntricos y otros)? *En caso afirmativo, adjunte las copias y un resumen narrativo.*
- I. SI NO ¿Se ha descubierto alguna otra información relevante a este estudio, sobre todo relacionada con los posibles riesgos y beneficios asociados al mismo? *En caso afirmativo, adjunte copias de esta información y un resumen narrativo.*
- J. SI NO ¿Se ha detectado algún problema no anticipado, relacionado con riesgos para los participantes u otras personas, en la UCR o algún otro sitio donde se desarrolle el estudio? *En caso afirmativo, enumere y describa estos problemas en un resumen narrativo.*



- K. SI NO No aplica ¿Se han reportado al CEC todos los problemas no anticipados que conllevan riesgo para los participantes u otras personas, que requieren ser informados con prontitud? *Si la respuesta es negativa, envíe al CEC la información requerida antes de que transcurran 5 días hábiles. Indique si estos eventos o problemas cambiaron la razón riesgo/beneficio o requirieron cambios en el documento de consentimiento informado.*
- L. SI NO ¿El perfil de reacciones adversas experimentado por los participantes difiere del esperado? (reacción adversa/evento adverso significa cualquier acontecimiento desfavorable e indeseado, tanto serio como no serio, esperado o inesperado, relacionado o no con el estudio). *Si la respuesta es afirmativa, adjunte un resumen narrativo describiendo las diferencias entre el perfil de reacciones adversas esperado y el encontrado.*
- M. SI NO ¿Se ha asignado a un Comité Independiente de Monitorización de Datos la revisión periódica de los riesgos para los participantes? *Si la respuesta es afirmativa indique la frecuencia con que se realiza esta tarea y un resumen narrativo de sus informes.*
- N. SI NO ¿Los participantes han experimentado algún beneficio derivado del estudio? *En caso afirmativo, adjunte un resumen narrativo describiendo estos beneficios.*

4. INFORMACIÓN SOBRE EL DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

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

En caso afirmativo, adjunte una copia del documento aprobado y sellado que ha estado en uso Y otra copia idéntica y limpia para volver a sellar una vez aprobada la revisión continua, para ser usado durante el siguiente periodo de aprobación (excepto si ya concluyó el reclutamiento).



5. INFORMACIÓN SOBRE CONTACTOS

Investigador principal:

Nombre:	Apellido:	Cédula #	Unidad académica:
José Pablo	Aguiar Moya		LanammeUCR
Teléfono:	Celular:	Fax:	Email:
2511-2529		25114440	jose.aguiar@ucr.ac.cr

Profesor(a) tutor(a) (complete si el investigador principal es estudiante):

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

Persona encargada del contacto con el estudio (complete si el contacto primario no es alguno de los anteriores):

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

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

SI NO ¿Se ha desarrollado algún nuevo conflicto de intereses para el investigador(a) principal o para el personal clave del estudio? *En caso afirmativo adjunte una narración detallada de las características del conflicto cuando los investigadores, personal clave o cualquier otra persona responsable del diseño, ejecución o reporte del estudio tiene un interés financiero en, o actúa en representación de, una entidad externa cuyos intereses financieros, pareciera razonable pensar, que podrían afectarse por la investigación.*

7. DECLARACIÓN DEL INVESTIGADOR PRINCIPAL

Lea cuidadosamente esta declaración antes de firmar.

Informe LM-PI-UMP-038-R3	Fecha de emisión: 11 de diciembre de 2018	Página 56 de 61
--------------------------	---	-----------------



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Adicionalmente a las respuestas anteriores, yo confirmo que el documento de consentimiento informado en uso, aprobado por el CEC, ha sido firmado, fechado y guardado en mis archivos para cada participante enrolado en este estudio y una copia del mismo fue entregada a la persona que lo firmó como participante (cuando el uso de documento de consentimiento informado fue requerido). Asimismo confirmo que no se han realizado cambios en los procedimientos del estudio o en el documento de consentimiento sin previa aprobación por parte del CEC.

11 de diciembre de 2018

Firma del investigador(a) principal

Fecha

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



Anexo D

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN

Unidad de Gestión de Proyectos

Unidad de Gestión de Calidad

Tel.: 2511-5845

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

Instrucciones

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

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

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



informes parciales como los finales, siendo la entidad que en última instancia aprueba éstos y las solicitudes de ampliación de vigencia.

Las dimensiones a evaluar son las siguientes:

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

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

Evaluación del informe: Exhaustividad, Claridad, Rigurosidad.

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

TITULO DE LA PROPUESTA:

Análisis físico-químico de adhesión asfalto - agregado en Costa Rica

I. Autoevaluación

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

Criterio	Calificación	No aplica
1. Evaluación de la ejecución de la propuesta en general.	100	
2. Valoración del aporte de los colaboradores no académicos.		X
3. Evaluación del nivel de integración de los colaboradores académicos.	100	
4. Evaluación del trabajo de los/las asistentes.	100	
5. Valoración del apoyo administrativo de la unidad académica para esta propuesta.	100	



6. Valoración del apoyo de la Vicerrectoría de Investigación para esta propuesta.		X
7. Valoración del aporte de otras instancias universitarias para esta propuesta.		X
8. Valoración el apoyo de FUNDEVI para esta propuesta.		X
9. Grado de satisfacción con los resultados y logros alcanzados.	100	
Calificación promedio (sin considerar los no aplica)		100

TITULO DE LA PROPUESTA:

Estudio del proceso fisico-químico de la oxidación y su incidencia en el daño por humedad de asfaltos

II. Evaluación de alcances y logros

Criterio	Calificación	No aplica
10. Los logros y alcances académicos del trabajo realizado.	100	
11. Los productos académicos aportados.	100	
12. La visibilidad potencial de los resultados y productos.	100	
13. El impacto potencial de los resultados y productos en los procesos de enseñanza aprendizaje.		NA
14. El impacto potencial de los resultados y productos en la unidad académica de adscripción.		NA
15. El impacto potencial de los resultados y productos en el área disciplinar de adscripción del trabajo.		NA
16. El impacto potencial de los resultados y productos en el ámbito extraacadémico.	100	
Calificación promedio (sin considerar los no aplica)		100



III. Evaluación del informe

Criterio	Calificación	No aplica
17. Grado de exhaustividad en la presentación de resultados y logros.	100	
18. Grado de claridad en la presentación de los resultados y logros.	100	
19. Grado de rigurosidad argumentativa en la presentación de resultados y logros.	100	
20. Evidencias aportadas para sustentar conclusiones y argumentos.	100	
Calificación promedio (sin considerar los no aplica)		

IV. Evaluación de Vicerrectoría de Investigación

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

Versión 12-09-2012.