

## **Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas**

### **Assessment of moisture damage susceptibility of asphalt mixtures using thermodynamic properties**

*Silvia Caro-Spinel<sup>1\*</sup>, Alex Eduardo Alvarez-Lugo<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

(Recibido el 25 de febrero de 2010. Aceptado el 30 de agosto de 2010)

#### **Resumen**

Este artículo presenta una evaluación comparativa de la susceptibilidad al daño por humedad de diferentes combinaciones de cementos asfálticos producidos en Colombia y agregados pétreos. La metodología empleada se centra en establecer el Índice de Daño por Humedad (IDH) de diferentes sistemas cemento asfáltico-agregado. Este índice se calcula con base en propiedades termodinámicas intrínsecas (i.e., energía superficial libre) de los materiales involucrados. Los resultados obtenidos en este estudio sugieren: (i) que el tipo de agregado empleado en mezclas asfálticas tiene mayor influencia en la resistencia de la mezcla al ataque del agua que la influencia que tiene el cemento asfáltico y (ii) que los procesos de modificación empleados para producir los diferentes tipos de cemento asfáltico modificado conllevan a sistemas cemento asfáltico-agregado con una variada resistencia al daño por humedad. Finalmente, los resultados de este estudio demuestran que la caracterización termodinámica de los materiales de pavimentación puede ser eficientemente empleada en la selección de materiales durante la etapa inicial del diseño de mezclas asfálticas.

----- **Palabras clave:** Daño por humedad, cemento asfáltico, energía superficial libre, trabajo de adhesión, índice de daño por humedad, pavimentos

---

\* Autor de correspondencia. teléfono: + 57 + 1 + 332 43 12, fax: + 57 + 1 + 332 43 13, correo electrónico: scaro@uniandes.edu.co (S. Caro)

### Abstract

This paper presents a comparative assessment of the susceptibility to moisture damage for different combinations of Colombian asphalt binders and aggregates. The methodology applied focuses on the calculation of the Moisture Damage Index (MDI) for different asphalt binder-aggregate systems. This index has been estimated using thermodynamic properties (i.e., surface free energy) of the involved materials. The results suggest that: (i) the type of aggregate has a larger influence on the final mixture resistance to moisture damage, compared to the role of the type of asphalt binder and (ii) the modification processes used in the production of different types of modified asphalt binders generate asphalt binder-aggregate systems with a wide range of resistance to moisture damage. Finally, the results of this study prove that the thermodynamic characterization of paving materials can efficiently be used for material selection during the initial stage of mixture design.

----- **Keywords:** Moisture damage, asphalt binder, surface free energy, work of adhesion, moisture damage index, pavements

### Introducción

El deterioro causado en las mezclas asfálticas de pavimentación por la presencia de agua ha sido reconocido como una de las principales causas del daño prematuro de los pavimentos asfálticos [1]. En la última década se han desarrollado nuevas metodologías que combinan la medición de propiedades intrínsecas de los materiales que componen las mezclas y el empleo de modelos micromecánicos de fractura para identificar e investigar las causas y el desarrollo de los efectos del agua en mezclas asfálticas [2]. Estas metodologías han probado ser superiores a los enfoques fenomenológicos empleados hasta el momento para cuantificar el daño por humedad en mezclas asfálticas (e.g., ensayo Lottman, AASTHO T 283), ya que permiten caracterizar los mecanismos de deterioro a nivel microestructural y no solo cuantificar el efecto adverso que tiene el agua en la integridad de la mezcla a nivel macroestructural [2].

En este trabajo se presenta una evaluación comparativa de la susceptibilidad al daño por humedad de diversas combinaciones de cementos asfálticos colombianos (modificados y no-modificados) y agregados pétreos de diverso origen geológico. La metodología empleada en este estudio se basa en la determinación de propiedades fundamentales (energía superficial libre [ESL])

de los cementos asfálticos y agregados pétreos (o agregados), con el objetivo de calcular un Índice de Daño por Humedad (IDH) [3]. Este índice de daño ha demostrado proveer una alta correlación con observaciones realizadas en campo sobre la resistencia al deterioro por humedad de mezclas asfálticas [3]. Por esta razón, la información obtenida en este estudio puede ser utilizada como soporte científico en los procesos de selección de materiales para proyectos de pavimentación, con el fin de promover la producción de mezclas asfálticas de alta calidad y mayor durabilidad.

La primera parte de este artículo describe el fenómeno de daño por humedad en mezclas asfálticas. A continuación se presenta el procedimiento empleado para cuantificar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas. Posteriormente, se describe el diseño experimental utilizado en el estudio. Finalmente, se presentan y analizan los valores de IDH obtenidos para diferentes combinaciones agregado-cemento asfáltico.

### **Efecto del agua en la durabilidad de mezclas asfálticas**

El daño por humedad en mezclas asfálticas se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso al interior

de su microestructura [1]. Una revisión literaria en este tema revela que aunque el efecto adverso del agua en las propiedades de adhesión de sistemas agregado-cemento asfáltico se empezó a investigar desde la primera mitad del siglo pasado [1], este fenómeno solo llamó la atención de las agencias encargadas de administrar las redes de infraestructura vial en la década de 1.980.

En la actualidad, la mayoría de estas agencias en Estados Unidos y Europa cuentan con especificaciones para garantizar una resistencia mínima de las mezclas al daño por humedad, así como con procedimientos para emplear modificadores que promuevan dicha resistencia [4]. No obstante, y a pesar de que en las últimas tres décadas ha aumentado sustancialmente la inversión en investigación sobre los efectos adversos del agua en las mezclas asfálticas, los mecanismos asociados a este fenómeno en el nivel microestructural aún no se comprenden en su totalidad [2].

En las siguientes secciones se describen los mecanismos relacionados con el daño por humedad en mezclas asfálticas y el procedimiento (basado en la caracterización de propiedades termodinámicas de materiales) empleado para caracterizar este tipo de deterioro.

### **Transporte de agua y manifestación de daño por humedad en mezclas asfálticas**

Los mecanismos de daño por humedad en mezclas asfálticas se inician con los modos de transporte mediante los cuales el agua alcanza el interior de la estructura del material y culminan con las diversas manifestaciones de este deterioro. Existen tres modos principales de transporte de agua al interior de las mezclas asfálticas en un pavimento: (i) infiltración de agua líquida desde la superficie del pavimento hacia el interior de la mezcla a través de vacíos interconectados, (ii) difusión de agua líquida y/o vapor de agua a través de los componentes constitutivos de la mezcla y (iii) ascensión capilar de agua líquida proveniente de la superficie inferior de la mezcla.

La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles se conoce como “*stripping*” o “*pérdida del recubrimiento*” de cemento asfáltico de la superficie de los agregados. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los agregados de la superficie de la mezcla causado por el paso de las llantas de los vehículos sobre el material asfáltico (conocido internacionalmente como “*raveling*”). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase agregado-cemento asfáltico. Estas condiciones sugieren que estudios integrales sobre la caracterización de la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas deben incluir la cuantificación del deterioro de la adhesión que ocurre entre sus materiales constitutivos.

### **Caracterización termodinámica de la adhesión entre cementos asfálticos y agregados**

Desde el punto de vista termodinámico es posible cuantificar la calidad de la adhesión de sistemas cemento asfáltico-agregado y su susceptibilidad a la pérdida de adhesión por la presencia de agua, mediante el empleo de la ESL de los materiales involucrados.

La ESL de un material se define como la energía o trabajo necesario para crear una nueva unidad de área del material en condiciones de vacío [5]. Aunque existen diversas teorías para cuantificar y representar analíticamente esta propiedad, la teoría de Good-Van Oss-Chaudhury establece que la ESL de un material está compuesta por: (i) un componente monopolar ácido,  $\Gamma^+$ , (ii) un componente monopolar básico,  $\Gamma^-$ , y (iii) un componente no polar,  $\Gamma^{LW}$ , también conocido como el componente de Lifshitz-van der Waals [5]. Los componentes ácido y básico (i.e.,  $\Gamma^+$  y  $\Gamma^-$ , respectivamente) se pueden combinar para representar el componente polar,  $\Gamma^{AB}$ , de la ESL. La ESL de un material,  $\Gamma$ , se puede expresar con base en estas tres componentes mediante la ecuación (1):

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^+\Gamma^-} = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \quad (1)$$

El *trabajo de adhesión* entre dos materiales que se encuentran en contacto se define como la cantidad de energía que es necesario proporcionar al sistema para crear dos nuevas superficies de área unitaria en cada material [3]. En otras palabras, el trabajo de adhesión es la energía necesaria para propagar una grieta en una unidad de área en la interfase de dos materiales. El trabajo de adhesión entre un cemento asfáltico (subíndice *A*) y un agregado (subíndice *S*) se puede calcular empleando las componentes de la ESL de cada uno de los materiales mediante la ecuación (2) [3]:

$$W_{AS}^{seco} = \gamma_{AS} = 2\sqrt{\Gamma_A^{LW}\Gamma_S^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_A^+\Gamma_S^-} + 2\sqrt{\Gamma_A^-\Gamma_S^+} \quad (2)$$

Sistemas de interfase entre materiales con altos valores de  $W_{AS}^{seco}$  están asociados con una mayor resistencia a la fractura (i.e., mayor vida en fatiga). Por lo tanto, altos valores de  $W_{AS}^{seco}$  es una condición deseable en toda mezcla asfáltica. Los valores individuales de ESL también se pueden emplear para calcular el efecto de la presencia de un tercer material en el trabajo de adhesión entre dos materiales. Así, la ecuación (3) permite calcular el trabajo de adhesión entre un cemento asfáltico y un agregado cuando el agua está presente en su interfase:

$$W_{WAS}^{húmedo} = \gamma_{AW} + \gamma_{SW} - \gamma_{AS} \quad (3)$$

donde el subíndice *W* se refiere al tercer componente, en este caso el agua. El cálculo de los valores individuales de la ecuación (3) (i.e.,  $\gamma_{AW}$ ,  $\gamma_{SW}$  y  $\gamma_{AS}$ ) se puede realizar mediante la aplicación de la ecuación (2) para las diferentes combinaciones de materiales.  $W_{WAS}^{húmedo}$  es una cantidad termodinámica que proporciona información sobre la susceptibilidad de sistemas cemento asfáltico-agregado a ser separados por la presencia de agua. La ecuación (3) suele proveer valores negativos para  $W_{WAS}^{húmedo}$  [3]. Esto significa que el proceso mediante el cual el agua desplaza al cemento asfáltico de la superficie del agregado es termodinámicamente favorable (i.e., este proceso ocurrirá sin necesidad de suministrar

energía adicional al sistema). La favorabilidad termodinámica de la pérdida de adhesión entre cemento asfáltico y agregado por la presencia del agua se deriva de la preferencia natural del agregado a ser recubierto por agua en lugar de ser recubierto por cemento asfáltico. Mayores valores absolutos de  $W_{WAS}^{húmedo}$  simbolizan una mayor susceptibilidad del sistema a la pérdida de adhesión.

### Índice de daño por humedad (IDH)

Bhasin et al. [3] propusieron el uso de un índice de daño basado en valores de trabajo de adhesión para calcular la susceptibilidad al deterioro por humedad de mezclas asfálticas. La ecuación (4) define este valor, denominado en este estudio Índice de Daño por Humedad (IDH).

$$IDH = \frac{W_{AS}^{seco}}{|W_{AS}^{húmedo}|} \quad (4)$$

Como se mencionó antes, es deseable que un sistema cemento asfáltico-agregado tenga buenas condiciones de adhesión en estado seco (i.e., altos valores de  $W_{AS}^{seco}$ ) y baja susceptibilidad a la pérdida de adhesión por la presencia de agua (i.e., bajos valores de  $|W_{AS}^{húmedo}|$ ). Por lo tanto, altos valores de IDH están relacionados con mezclas resistentes al daño por humedad. Por esta razón, el IDH fue seleccionado en este estudio para comparar cuantitativamente la propensión al daño por humedad de las diferentes combinaciones de cemento asfáltico y agregado consideradas.

## Experimentación

A continuación se describen los materiales empleados en esta investigación y las metodologías empleadas para calcular la ESL de estos materiales.

### Selección de materiales

Los cementos asfálticos evaluados corresponden a los producidos por Ecopetrol S.A. en las refinerías de Barrancabermeja (penetración 80-100 1/10 mm) y Apiay (penetración 60-70 1/10 mm). Muestras de dichos materiales fueron obtenidas

respectivamente de las plantas de mezclado de las compañías Patria S.A. (Mosquera, Cundinamarca) y Nacional de Pavimentos (Villavicencio, Meta). El estudio también incluyó la evaluación de cuatro cementos asfálticos modificados con polímero (elastómero). Los cementos asfálticos modificados fueron fabricados por la compañía MPI Ltda. empleando diversos procesos industriales a partir de diferentes cementos asfálticos base y diversas proporciones de elastómero para cumplir las especificaciones que el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) establece para cementos asfálticos modificados tipo I, II, III y V [6].

Adicionalmente, se cuantificó la ESL de un agregado de origen aluvial producido en el Municipio de La Virginia, Risaralda (Colombia) para fabricación de mezclas asfálticas. Este material corresponde a gravas con presencia de partículas provenientes de depósitos rocosos de basalto. En el estudio comparativo también se incluyeron datos de ESL de cinco agregados de diversas características mineralógicas comúnmente empleados en Estados Unidos de Norteamérica para la fabricación de mezclas asfálticas, los cuales fueron caracterizados previamente en términos de su ESL [7].

### **Medición de energía superficial libre (ESL) de cementos asfálticos**

La ESL de los cementos asfálticos se determinó a partir del método de placa de Wilhelmy, empleando el equipo disponible en el Laboratorio de Caracterización Avanzada de Materiales de Infraestructura (ACIM Lab, por sus siglas en inglés) de Texas A&M University. Esta técnica permite cuantificar el ángulo de contacto de *líquidos de prueba* (i.e., líquidos con valores de ESL conocidos) sobre la superficie del cemento asfáltico. Durante el ensayo se emplean por lo menos tres líquidos de prueba y con cada líquido se someten a ensayo cuatro placas de vidrio delgadas (0,15 mm de espesor) recubiertas de cemento asfáltico para calcular el respectivo ángulo de contacto promedio. Con base en estos ángulos de contacto y las componentes

de ESL de los líquidos de prueba, se calculan las componentes de ESL del cemento asfáltico empleando la teoría postulada por Good, van Oss y Chaudhury [8]. Alvarez y Caro [9] presentan detalles adicionales sobre esta técnica.

### **Medición de energía superficial libre (ESL) de agregados pétreos**

La ESL del agregado fue cuantificada usando la Máquina de Adsorción Universal o USD (por su sigla en inglés a partir de Universal Sorption Device), empleando el método mejorado propuesto por Bhasin y Little [10]. El USD permite determinar la isoterma de adsorción a temperatura constante de un *gas de prueba* (i.e., gas con componentes de ESL conocidas) sobre el agregado en estudio. La isoterma de adsorción relaciona la cantidad de gas de prueba adsorbido en función de la *presión de vapor* a la cual se somete dicho gas y se puede emplear para calcular el trabajo de adhesión,  $W_a$ , entre el agregado y el gas de prueba. El uso de mínimo tres gases de prueba permite conformar un sistema de tres ecuaciones linealmente independientes (en función del trabajo de adhesión entre el gas de prueba y el agregado) cuya solución corresponde a los valores de las tres componentes de ESL del agregado.

Los ensayos de ESL de agregados se llevaron a cabo empleando el USD disponible en el ACIM Lab (Texas A&M University). En estos ensayos se empleó material granular seco (en horno a 150°C durante 8 horas) pasa tamiz No. 4 (4,75 mm) y retenido en tamiz No 8 (2,36 mm), previamente lavado con agua destilada. Se requirieron 200 g de agregado y un tiempo de ensayo de una semana para caracterizar el agregado de origen colombiano. Los gases empleados en este estudio fueron los recomendados por Bhasin y Little [10] e incluyen vapor de agua, *n*Hexano y MPK (methyl propyl ketone). El *x*Hexano también fue empleado para calcular el área específica superficial del agregado, el cual es un parámetro requerido para calcular la ESL del agregado.

En el ensayo de ESL realizado con el USD, la relación del trabajo de adhesión entre el agregado y cada uno de los gases de prueba ( $W_a$ ), la ESL total del gas de prueba ( $\Gamma_v$ ) y la presión de equilibrio del gas de prueba sobre la superficie del agregado ( $\pi_e$ ) está dada por la ecuación (5):

$$W_a = \pi_e + 2\Gamma_v \quad (5)$$

donde  $\pi_e$  se define según la ecuación (6):

$$\pi_e = \frac{RT}{MA} \int_0^{p_0} \frac{n}{p} dp \quad (6)$$

donde  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura de ensayo,  $M$  es el peso molecular del gas de prueba,  $A$  es al área específica superficial del agregado,  $n$  es la masa de gas adsorbida, por unidad de masa de agregado, sobre la superficie del agregado a la presión de vapor  $p$  del gas de prueba y  $p_0$  es la máxima presión de vapor de saturación del líquido de prueba (a partir del cual se generan los gases de prueba en el USD). El área específica superficial del agregado,  $A$ , se obtiene mediante la ecuación de Brunauer, Emmett, and Teller (ecuación 7):

$$A = \left( \frac{n_m N_0}{M} \right) \alpha \quad (7)$$

donde  $N_0$  es el número de Avogadro,  $\alpha$  es el área proyectada de una molécula del gas de prueba y  $n_m$  es la capacidad monocapa de la superficie del agregado (i.e., número de moléculas requerido para recubrir la superficie del agregado con una capa mono molecular). La capacidad monocapa se puede calcular en función de la masa de gas adsorbida y la presión de vapor [10].

Finalmente, el trabajo de adhesión ( $W_a$ ) entre el gas de prueba ( $V$ ) y el agregado ( $S$ ) se puede calcular en términos de las componentes de ESL a partir de la ecuación (8):

$$W_a = 2\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_V^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_V^-} + 2\sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_V^+} \quad (8)$$

La combinación de las ecuaciones (5) y (8) para, al menos, tres gases de prueba produce un sistema

de ecuaciones linealmente independientes de la forma mostrada en la ecuación (9):

$$\pi_e + 2\Gamma_v = 2\sqrt{\Gamma_S^{LW} \Gamma_V^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_S^+ \Gamma_V^-} + 2\sqrt{\Gamma_S^- \Gamma_V^+} \quad (9)$$

La solución de este sistema lineal permite determinar las tres componentes de ESL del agregado, representadas en este caso por  $\Gamma_S^{LW}$ ,  $\Gamma_S^+$  y  $\Gamma_S^-$ . Con base en estos resultados, la ESL total del agregado ( $\Gamma_s$ ) se puede calcular mediante el empleo de la ecuación (1).

## Resultados y análisis

Las tablas 1 y 2 presentan las componentes y la ESL total ( $\Gamma$ ) obtenidas, respectivamente, para los cementos asfálticos y los agregados pétreos empleados en este estudio. Los resultados presentados en la tabla 1 permiten concluir que el orden de magnitud de las componentes de ESL y su magnitud total es similar entre los asfaltos modificados y no-modificados. Sin embargo, la comparación de los valores reportados en las tablas 1 y 2 muestra que la ESL de los agregados es un orden de magnitud superior a la ESL de los cementos asfálticos. Si este resultado se analiza desde el rol que las componentes de ESL tienen en el cálculo del trabajo de adhesión (ecuación (2)), es de esperar que las propiedades del agregado tengan un mayor efecto relativo sobre el valor del trabajo de adhesión desarrollado en la interfase cemento asfáltico-agregado que las propiedades del cemento asfáltico involucrado. Adicionalmente, los datos de la tabla 2 indican que el valor de la ESL total del agregado colombiano es similar al valor de ESL de calizas y cuarcitas, aunque el componente básico del agregado colombiano es sustancialmente superior al de cualquiera de los agregados de origen norteamericano.

La tabla 3 presenta los valores de trabajo de adhesión (ecuación (2)) entre los diferentes cementos asfálticos y agregados,  $W_{AW}^{sec o}$ , obtenidos a partir de la información reportada en las tablas 1 y 2. La tabla 4 resume los valores de trabajo de adhesión en presencia de agua,  $W_{WAS}^{húmedo}$ , para las mismas combinaciones de materiales empleados en la tabla 3 (ecuación 3).

**Tabla 1** Energía superficial libre (ESL) de cementos asfálticos

<b>Cemento asfáltico</b>	$\Gamma$ (ergs/cm <sup>2</sup> )	$\Gamma^{LW}$	$\Gamma^{AB}$	$\Gamma^+$	$\Gamma^-$
Apiay	10,79	6,24	4,55	2,17	2,39
Barrancabermeja	12,06	7,24	4,82	3,43	1,70
MT I	12,68	9,24	3,44	1,28	2,32
MT II	15,08	10,24	4,84	2,10	2,79
MT III	11,24	11,24	0,00	4,24	0,00
MT V	12,24	12,24	0,00	4,30	0,00

**Tabla 2** Energía superficial libre (ESL) de agregados pétreos

<b>Agregado</b>	$\Gamma$ (ergs/cm <sup>2</sup> )	$\Gamma^{LW}$	$\Gamma^{AB}$	$\Gamma^+$	$\Gamma^-$
Caliza (Texas)	271,00	152,00	119,00	236,00	15,00
Granito (Oklahoma)	425,18	56,35	368,83	43,45	782,70
Cuarcita (Arkansas)	200,07	60,86	139,21	8,89	544,98
Arenisca (Oklahoma)	104,98	62,46	42,52	2,03	222,61
Caliza (Ohio)	111,15	58,01	53,14	1,76	401,07
Grava (Risaralda)	212,07	52,08	159,99	3,45	1854,83

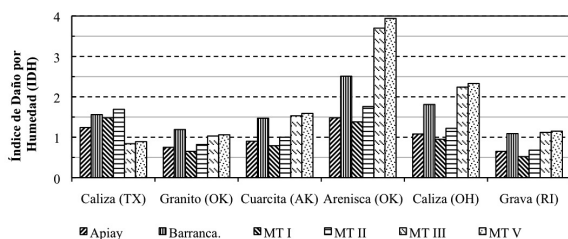
**Tabla 3** Trabajo de adhesión entre cementos asfálticos y agregados,  $W_{AW}^{sec o}$  (en ergs/cm<sup>2</sup>)

	<b>Apiay</b>	<b>Barranca.</b>	<b>MT I</b>	<b>MT II</b>	<b>MT III</b>	<b>MT V</b>
Caliza (Texas)	120,50	139,61	130,51	141,45	98,62	102,22
Granito (Oklahoma)	140,31	184,15	129,02	151,15	165,55	168,55
Cuarcita (Arkansas)	116,97	153,89	109,33	127,55	148,45	151,40
Arenisca (Oklahoma)	87,85	113,46	86,15	98,58	114,44	117,18
Caliza (Ohio)	101,16	133,12	95,66	111,22	133,54	136,35
Grava (Risaralda)	168,68	230,29	146,98	177,21	225,75	229,11

**Tabla 4** Trabajo de adhesión en presencia de agua entre cementos asfálticos y agregados,  $W_{WAS}^{húmedo}$  (en ergs/cm<sup>2</sup>)

	<b>Apiay</b>	<b>Barranca</b>	<b>MT I</b>	<b>MT II</b>	<b>MT III</b>	<b>MT V</b>
Caliza (Texas)	-97,11	-89,62	-88,48	-83,73	-117,28	-115,08
Granito (Oklahoma)	-187,13	-154,91	-199,80	-183,86	-160,18	-158,68
Cuarcita (Arkansas)	-129,97	-104,67	-138,99	-126,97	-96,79	-95,34
Arenisca (Oklahoma)	-59,25	-45,25	-62,32	-56,08	-30,94	-29,71
Caliza (Ohio)	-93,84	-73,49	-100,72	-91,35	-59,74	-58,44
Grava (Risaralda)	-260,65	-210,66	-283,72	-259,69	-201,86	-200,01

Finalmente, la figura 1 presenta los valores de IDH obtenidos a partir de los datos reportados en las tablas 3 y 4, mediante el empleo de la ecuación (4).



**Figura 1.** Índice de Daño por Humedad, IDH

Los valores reportados en las tablas 3 y 4 y en la figura 1 sugieren que:

El agregado colombiano (i.e., grava-basalto) es el que mayores valores de trabajo de adhesión en seco produce con todos los cementos asfálticos estudiados, mientras la arenisca de Oklahoma y la caliza de Ohio generan las adhesiones más débiles.

A diferencia de los agregados, ninguno de los cementos asfálticos produce consistentemente mejores trabajos de adhesión con todos los tipos de agregado. Es de resaltar, sin embargo, que los mayores valores de adhesión en condición seca de algunos agregados se producen con la combinación del cemento asfáltico no-modificado de Barrancabermeja. Por el contrario, los menores valores de adhesión resultan de emplear el cemento asfáltico no-modificado proveniente de Apiay y el cemento asfáltico modificado tipo MT I.

Los valores de las Tablas 3 y 4 sugieren que, así como el agregado colombiano produce los mayores valores de trabajo de adhesión en seco, este mismo agregado presenta los mayores valores (en valor absoluto) del trabajo de adhesión en presencia de agua, cuando se combina con cualquiera de los cementos asfálticos estudiados. En otras palabras, las combinaciones de materiales que contienen el agregado colombiano tienen una mayor susceptibilidad termodinámica a que el cemento asfáltico sea desplazado de la superficie del agregado por acción del agua.

Los agregados asociados con los mayores valores de IDH (i.e., menor vulnerabilidad al daño por humedad) son las calizas de Texas y Ohio y la arenisca de Oklahoma.

Al igual que en el caso de los trabajos de adhesión en seco, no existe un único cemento asfáltico que produzca sistemáticamente los mejores o más bajos valores de IDH. Sin embargo, es de resaltar que los mayores valores de IDH están relacionados con la combinación de cementos asfálticos modificados MT II, III y V y la caliza de Ohio o la arenisca de Oklahoma.

En términos del IDH, el cemento asfáltico modificado MT V proporciona la menor susceptibilidad al daño por humedad al ser combinado con la mayoría de los agregados considerados (figura 1). Sin embargo, el cemento asfáltico modificado MT I tiende a generar la mayor susceptibilidad al daño por humedad, incluso comparado con los cementos asfálticos no modificados. Estos resultados ilustran el amplio rango de resistencias al daño por humedad de los cementos asfálticos modificados evaluados.

Bhasin et al. [3] emplearon los valores de IDH para proponer una escala cualitativa de la resistencia al daño por humedad de diversas mezclas asfálticas. Esta escala resultó de comparar valores de IDH de diferentes combinaciones cemento asfáltico-agregado con observaciones de campo sobre el desempeño real de las mezclas ante los efectos del agua. Así, los autores encontraron que mezclas asfálticas con valores de IDH mayores de 1,5 están asociadas con una alta resistencia al daño por humedad en campo, mezclas con valores de IDH entre 1,5 y 0,5 poseen una resistencia media al daño por humedad y mezclas con valores de IDH inferiores a 0,5 son altamente susceptibles al daño por humedad.

Los datos antes presentados (Figura 1) permiten concluir que la mayoría de las combinaciones de materiales evaluadas están asociadas con una resistencia media al daño por humedad. Algunas combinaciones de calizas y areniscas con asfaltos modificados tipo MT III y MT V presentan una alta resistencia a este daño, mientras que



combinaciones de granito y del agregado colombiano con los cementos asfálticos de Apiay y modificado tipo MT I están cerca al límite inferior de IDH, lo cual las clasificaría como mezclas de baja resistencia al daño por humedad.

El rol que poseen los agregados en la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas se puede explicar, parcialmente, con base en su origen mineralógico. En 2005, Bagampadde et al. [11] demostraron que mezclas compuestas por agregados ricos en calcio, magnesio e hierro, también llamados agregados *básicos* o *hidrofóbicos* (e.g., caliza), proveen una mayor resistencia al ataque del agua en comparación con mezclas compuestas por agregados ricos en elementos metálicos alcalinos o con altos contenidos de cuarzo, también llamados agregados *ácidos* o *hidrofilicos* (e.g., granito). Estos resultados tienen relación directa con los valores de ESL y por ende con los altos valores de IDH reportados para las calizas y arenisca y los bajos valores de IDH obtenidos para el granito y el agregado colombiano.

Por otra parte, estudios experimentales sobre la susceptibilidad de diferentes tipos de mezclas al daño por humedad han demostrado que el tipo de agregado posee un papel mucho más relevante que el tipo de cemento asfáltico empleado en la mezcla [12; 13]. Los resultados obtenidos en este estudio mediante la aplicación de teoría termodinámica refuerzan esta observación.

La información reportada en las tablas 3 y 4 y en la figura 1 justifica la necesidad de seleccionar cuidadosamente los materiales de pavimentación de tal forma que estos produzcan sistemas cemento asfáltico-agregado con alto trabajo de adhesión en estado seco y baja susceptibilidad al debilitamiento de dicha adhesión por acción del agua. Es importante aclarar, sin embargo, que los valores de IDH proveen información sobre la susceptibilidad termodinámica al daño por humedad, pero no permiten comparar la razón del daño (i.e., velocidad de deterioro) a la cual se espera que ocurran estos procesos de deterioro.

## Conclusiones

Este artículo resume los fundamentos de una metodología basada en la medición de propiedades termodinámicas que se puede emplear para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad en mezclas asfálticas. Las propiedades termodinámicas corresponden a la energía superficial libre (ESL) de cementos asfálticos y agregados y al trabajo de adhesión entre estos materiales con y sin presencia de agua en su interfase. La ESL de cementos asfálticos producidos en Colombia fue cuantificada empleando el método de placa de Wilhelmy y la ESL de los agregados se determinó empleando la Máquina de Adsorción Universal. Finalmente, se cuantificó la susceptibilidad al daño por humedad de diferentes combinaciones agregado-cemento asfáltico en términos del trabajo de adhesión y del Índice de Daño por Humedad (IDH).

Los resultados de este estudio muestran que no es posible identificar un único cemento asfáltico que produzca sistemáticamente las mejores condiciones de adhesión (o más altos valores de IDH). Una observación importante que se obtuvo durante este estudio es que el uso de los cementos asfálticos modificados evaluados está relacionado con un amplio rango de resistencias al daño por humedad. Esto significa que aunque algunos procesos de modificación mejoran la resistencia de las mezclas asfálticas al daño por humedad, éste no es siempre el caso. Adicionalmente, el estudio de las propiedades termodinámicas de los materiales permitió evidenciar que en términos de la resistencia al daño por humedad, el tipo de agregado empleado en la mezcla asfáltica posee un papel más relevante que el tipo de cemento asfáltico.

Finalmente, el análisis realizado demuestra que la metodología aplicada para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de combinaciones cemento asfáltico-agregado es útil como criterio a integrar para la producción de mezclas asfálticas de alta calidad. Dadas las ventajas de la metodología expuesta, es recomendable adelantar estudios adicionales

para establecer una base de datos de ESL de cementos asfálticos y agregados empleados en la fabricación de mezclas asfálticas en Colombia. Adicionalmente, es necesario evaluar la variabilidad (i.e., por fuente de producción) de la ESL de estos materiales con el objeto de integrar este parámetro en el análisis de susceptibilidad al daño por humedad.

### Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Ing. José Luís Barrios M. (Ingenieros Constructores Gayco S.A.) y a las compañías MPI Ltda., Patria S.A. y Nacional de Pavimentos por su colaboración en la obtención de las muestras de ensayo requeridas para el desarrollo del estudio. Adicionalmente, los autores agradecen a la Doctora Amy Epps Martin (Profesora Asociada, Texas A&M University) por el apoyo otorgado para la ejecución experimental de este estudio.

### Referencias

1. B. M. Kiggundu, F. L. Roberts. *Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods*. Report No. NCAT 88-02. Ed. National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn. Alabama. 1988. pp. 4-38.
2. S. Caro, E. Masad, A. Bhasin, D. Little. "Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures, Part II: Mechanisms". *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 9. 2008. pp. 99-114.
3. A. Bhasin. "Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage". *Transportation Research Record*. Vol. 1970. 2006. pp. 3-13.
4. R. G. Hicks, L. Santucci, T. Aschenbrener. *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar*. San Diego. California. 2003. pp. 2-21.
5. A. Bhasin. *Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due to Water*. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University. College Station, (TX). 2006. pp. 6-18.
6. Instituto Nacional de Vías. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Carreteras*. Artículo 400-07. Bogotá D.C. 2007. pp. 6-8.
7. J. Howson, E. Masad, A. Bhasin, V. Castelo Branco, E. Arambula, R. L. Lytton, D. Little. *System for the Evaluation of Moisture Damage Using Fundamental Material Properties-Implementation Study*. FHWA/TX-07/0-4524-1. Texas Transportation Institute-Texas A&M University. College Station, (TX). 2007. pp. 27-41.
8. C. J. Van Oss, M. K. Chaudhury, R. J. Good. "Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems". *Chemical Reviews*. Vol. 88. 1988. pp. 927-941.
9. A. E. Alvarez, S. Caro. "Determinación de la Energía Superficial Libre de Cementos Asfálticos Colombianos". *Ingeniería e Investigación*. Vol. 29. 2009. pp. 20-24.
10. A. Bhasin, D. N. Little. "Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device". *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 19. 2007. pp. 634-641.
11. U. Bagampadde, U. Isacson, B. Kiggundu. "Influence of Aggregate Chemical and Mineralogical Composition on Stripping in Bituminous Mixtures". *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 6. 2005. pp. 229-239.
12. U. Bagampadde, U. Isacson, B. M. Kiggundu. "Impact of Bitumen and Aggregate Composition on Stripping in Bituminous Mixtures". *Materials and Structures*. Vol. 39. 2006. pp. 303-315.
13. G. D. Airey, A. C. Collop, S. E. Zoorob, R. C. Elliot. "Moisture Damage Assessment of Asphalt Mixtures Using the UK SATS Test." *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*. Washington D.C. 2007. pp. 1-22.