

# ANÁLISIS DE SISTEMAS ASFALTO-AGREGADO A PARTIR DE MEDICIONES DE ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE

## ANALYSIS OF ASPHALT-AGGREGATE SYSTEMS BASED ON MEASUREMENTS OF SURFACE FREE ENERGY

ALLEX E. ALVAREZ

*Ph.D. Profesor Asociado de la Universidad de Magdalena, Santa Marta, Colombia, allexalvarez@yahoo.com*

EVELYN OVALLES

*Ingeniera Civil; miembro del GIIC-Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia, eveovallesg@gmail.com*

Recibido para revisar Diciembre 11 de 2011, aceptado Mayo 8 de 2012, versión final Mayo 14 de 2012

**RESUMEN:** La energía superficial libre (ESL) es una propiedad termodinámica fundamental de los materiales que puede ser empleada para cuantificar la calidad de la adhesión entre diversos materiales, la susceptibilidad de éstos a perder su adhesión por la presencia de agua en el sistema y la capacidad del recubrimiento de un material sobre otro con diferentes valores de ESL (i.e., humectabilidad). Estos principios son aplicables a diferentes materiales, incluidos los sistemas asfalto-agregado (i.e., mezclas asfálticas). El presente trabajo tiene como objetivo principal presentar un análisis, basado en mediciones de ESL de los materiales constitutivos de las mezclas asfálticas, mediante el cual se puede cuantificar la calidad de la adhesión, la susceptibilidad al daño por humedad y la calidad del recubrimiento del asfalto sobre el agregado en diversos sistemas asfalto-agregado. Las mediciones de ESL de asfaltos y agregados fueron realizadas en laboratorio a través del método de la Placa Wilhelmy y de la Máquina de Adsorción Universal (USD), respectivamente. Los materiales evaluados incluyeron asfaltos colombianos y agregados de origen colombiano y norteamericano. El análisis específico consistió en evaluar el efecto de procesos industriales de modificación y la adición de llenante mineral sobre la calidad de la adhesión, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad de diversos sistemas asfalto-agregado. Los resultados sugieren que la medición de la ESL de asfaltos y agregados es una herramienta eficiente para evaluar la compatibilidad y el desempeño esperado de diversos sistemas asfalto-agregado, así como los cambios inducidos a nivel fundamental por diferentes procesos propios de la fabricación de mezclas asfálticas (e.g., adición de llenante mineral).

**PALABRAS CLAVE:** Energía superficial libre (ESL), propiedad fundamental de un material, daño por humedad, llenante mineral, mezcla asfáltica en caliente.

**ABSTRACT:** The surface free energy (SFE) is a fundamental thermodynamic material property that can be used to quantify the quality of adhesion between diverse materials, the susceptibility of these materials to loss its adhesion due to the presence of water in the system, and the coating ability of a material over another material with different SFE values (i.e., wettability). These principles can be applied to different materials, including the asphalt-aggregate systems (i.e., hot mix asphalt (HMA) mixtures). This research work aims to present an analysis, based on SFE measurements of the asphalt mixture basic constituents, to quantify the adhesion quality, moisture susceptibility, and the coating quality of the asphalt over the aggregate surface (wettability) for different asphalt-aggregate systems. The SFE measurements of asphalts and aggregates were conducted in the laboratory by applying, respectively, the Wilhelmy Plate method and the Universal Sorption Device (USD). The materials assessed included Colombian asphalts and aggregates produced in both Colombia and The United States. The analysis focused on evaluating the effect of industrial asphalt modification processes and filler addition on the quality of adhesion, moisture susceptibility, and wettability of different asphalt-aggregate systems. The results suggest that the SFE measurement of asphalts and aggregates is an efficient tool to assess the compatibility and the expected performance of diverse asphalt-aggregate systems as well as the modifications induced, at a fundamental level, by different processes used in the fabrication of HMA (e.g., mineral filler addition).

**KEYWORDS:** Surface free energy, fundamental material property, moisture damage, mineral filler, hot mix asphalt.

### 1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un análisis de la caracterización de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de energía superficial libre (ESL)—una propiedad termodinámica fundamental de un

material—de asfaltos y agregados empleados en mezclas asfálticas de pavimentación. Una propiedad fundamental de un material es un parámetro que define su naturaleza y comportamiento o respuesta bajo la aplicación de un estímulo externo y es independiente de las condiciones de ensayo (i.e., tamaño de la muestra,

tipo de equipo, etc.). Por lo tanto, una propiedad fundamental puede incluirse en un modelo constitutivo con el objetivo de analizar la respuesta de un material ante diferentes condiciones externas. Así, por ejemplo, el punto de ebullición es una propiedad fundamental que indica la temperatura a la cual la presión de vapor de un líquido iguala la presión externa ejercida sobre éste; por lo tanto siempre que el líquido y la presión externa sean los mismos, este valor de temperatura—punto de ebullición—no cambiará.

De esta manera, es deseable que los estudios de comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas y de los materiales que las conforman se realicen a la luz de sus propiedades fundamentales. Este enfoque se traduce en una caracterización más confiable de la respuesta de los materiales de pavimentación en comparación con la obtenida al seguir el enfoque fenomenológico convencionalmente aplicado en su caracterización [1]. A su vez, la aproximación propuesta dista de los indicadores de comportamiento convencionalmente empleados en la tecnología de pavimentos (e.g., evaluación de estabilidad y flujo Marshall, resistencia a tracción indirecta, ensayos convencionales de carga axial) y permite avanzar en la aplicación de técnicas que ofrezcan parámetros más confiables para la escogencia de materiales y la evaluación de su respuesta y desempeño como componentes de estructuras de pavimento.

Por ejemplo, Beltrán et al. [2] recientemente presentaron la aplicación de un modelo micromecánico, desarrollado por Lytton et al. [3] y modificado por Castelo Branco [4], para la caracterización de la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas tibias a partir de propiedades fundamentales de los materiales constitutivos (incluyendo la ESL del asfalto y del agregado) y de las mezclas asfálticas. Adicionalmente, basados en mediciones de ESL, Wasiuddin et al. [5] analizaron el efecto de aditivos empleados para la fabricación de mezclas asfálticas tibias (i.e., Sasobit<sup>0</sup> y Aspha-min<sup>0</sup>) en términos de la adhesión entre los asfaltos “modificados” y los agregados y de la humectabilidad (indicador de la capacidad del recubrimiento del asfalto sobre el agregado; conocido en inglés como *wettability*) de estos asfaltos sobre los agregados. A futuro, otros fenómenos (e.g., envejecimiento del cemento asfáltico, que a la fecha ha sido caracterizado parcialmente por diferentes medios [6,7]) podrían ser analizados en función de los cambios de ESL generados por éstos.

En relación con la caracterización de materiales, por ejemplo, la selección y adición del llenante mineral (finos producto de trituración; pasa tamiz #200) a adicionar en mezclas asfálticas, ésta es usualmente realizada con base en diferentes pruebas que incluyen [8]: granulometría (ASTM D546), equivalente de arena (ASTM D2419), límites líquido y plástico (ASTM D4318), índice de azul de metileno (ASTM C837), vacíos Rigden (BS 812), ensayo modificado (Penn State) de vacíos Rigden y el ensayo Alemán de llenante mineral [9]. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones para la adecuada selección del llenante mineral dado que diferentes agencias emplean diversas especificaciones y, aún más importante, estas pruebas no dan indicaciones de propiedades fundamentales del llenante mineral. Es así, como a la fecha se realiza una caracterización indirecta y limitada sobre las propiedades morfológicas (forma, angularidad, y textura del llenante) y la actividad de las partículas del llenante mineral.

Adicionalmente, a pesar de que la caracterización del llenante mineral se ha centrado en los aspectos antes indicados, es de esperar que la calidad y respuesta del sistema agregado-masilla (i.e., cemento asfáltico con llenante mineral) en la mezcla asfáltica dependa de las propiedades físicas del llenante (i.e., granulometría y propiedades morfológicas), pero también de sus propiedades químicas y termodinámicas, por ejemplo de su ESL [8].

En este contexto, en el presente trabajo se utiliza la ESL como propiedad fundamental para analizar de forma novedosa el efecto de procesos industriales de modificación de cementos asfálticos (o asfaltos) y la adición de llenante mineral en la respuesta de sistemas asfalto-agregado. Este efecto se estudió específicamente en términos de la calidad de la adhesión (resistencia a la fractura, falla adhesiva, de la interfase asfalto-agregado) y la susceptibilidad al daño por humedad (i.e., falla adhesiva en la interfase con presencia de agua en ésta) de diversos sistemas asfalto-agregado. Estos parámetros pueden ser integrados en modelos micromecánicos de fractura tal como antes se ejemplificó. Adicionalmente, se incluyó un análisis de la humectabilidad o calidad del recubrimiento del asfalto sobre el agregado. Todo esto es posible gracias al uso de índices calculados a partir de las componentes de ESL (i.e., aplicación de teoría termodinámica).

Para ello, se inicia con el marco teórico básico en torno al concepto de ESL, así como la descripción de los índices que la relacionan con el estudio de la calidad de la adhesión, el daño por humedad y la humectabilidad. A continuación se caracterizan los métodos experimentales y materiales utilizados y, por último, se presenta el uso de las mediciones de ESL en el cálculo de los índices indicados, así como el subsecuente análisis de los resultados acompañados de las conclusiones finales del estudio.

## 2. ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE (ESL)

La ESL es una propiedad fundamental, definida como la cantidad de energía necesaria para crear una nueva unidad de superficie—a partir de una fisura preexistente—en un material dado, en condiciones de vacío [8]. Tal como se discute en literatura previamente publicada [1], la ESL del asfalto y del agregado que conforman una mezcla asfáltica están relacionadas con la recuperación (i.e., *healing*) y la resistencia a la fractura (i.e., *fatiga*) de la mezcla. Más específicamente, estas respuestas de la mezcla se relacionan con la interacción de las componentes de ESL de los materiales constitutivos. Adicionalmente, investigaciones recientes [8] sugieren que la adición de llenante mineral (i.e., material producto de procesos de trituración de agregados) puede tener un efecto significativo en la recuperación y la resistencia a la fractura de sistemas asfalto-agregado.

De acuerdo con la teoría de Good-Van Oss-Chaudhury, la ESL puede ser descompuesta en: (i) un componente monopolar básico,  $\Gamma^-$ , (ii) un componente monopolar ácido,  $\Gamma^+$ , y (iii) un componente no polar,  $\Gamma^{LW}$  [10,11]. Así el cálculo de la ESL de cualquier material, queda definido mediante la Ecuación 1.

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

El estudio de la calidad de la adhesión, la susceptibilidad al daño por humedad y la humectabilidad de los sistemas asfalto-agregado incluidos en este estudio se llevó a cabo empleando diferentes índices calculados a partir de las componentes de ESL de los materiales incluidos en el análisis. Estos índices incluyen el trabajo de adhesión en condición seca ( $W_{AS}^{seco}$ ) y húmeda ( $W_{WAS}^{húmedo}$ ) y los índices ER [12],  $A_2$  [8] y

SC (coeficiente de expansión—spreading coefficient, SC, por sus siglas en inglés—) [5]. El significado físico y la interpretación de los valores numéricos de estos índices serán explicados posteriormente. A continuación se presentan las ecuaciones asociadas a los índices antes indicados.

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

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

$$ER = \left| \frac{W_{AS}^{seco}}{W_{WAS}^{húmedo}} \right| \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{|W_{AS}^{húmedo}| - |W_{FS}^{húmedo}|}{|W_{AS}^{húmedo}|} \quad (5)$$

$$SC = W_{AS}^{seco} - W_{AA} \quad (6)$$

Para las Ecuaciones 2 y 3, los subíndices *A* y *S* representan las componentes de ESL del asfalto y del agregado, respectivamente, y en la Ecuación 3 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. Además, la Ecuación 4 relaciona los índices expuestos en las dos ecuaciones precedentes. La selección de estos índices se basó en investigaciones previas [13,14] en las que se reportó una adecuada correlación entre la resistencia en campo de las mezclas asfálticas a desarrollar daño por presencia de agua (i.e., *stripping* o *raveling*) y el trabajo de adhesión y el índice ER.

En la Ecuación 5 se emplean el trabajo de adhesión en condición húmeda calculado con base en los valores de ESL de un asfalto y un agregado en particular ( $W_{AS}^{húmedo}$ ) y el trabajo de adhesión en condición húmeda calculado con base en los valores de ESL de la masilla (combinación de asfalto y llenante mineral—subíndice F—) y un agregado en particular ( $W_{FS}^{húmedo}$ ). Finalmente, la Ecuación 6 define el coeficiente de expansión (SC) a partir del trabajo de cohesión del asfalto (o de la masilla) ( $W_{AA}$ ), cuyo valor es el resultado de reemplazar dos veces en la Ecuación 2 los valores de ESL del asfalto (i.e., cálculo del trabajo de adhesión para una interface asfalto-asfalto).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección contiene una breve descripción de los materiales empleados (listados en la Tabla 1), así como de los métodos utilizados para la obtención de los datos de ESL incluidos en el estudio. Los cementos asfálticos utilizados corresponden a “no modificados” y “modificados”. El primer grupo, no modificados, se refiere a cementos asfálticos producidos en Colombia por Ecopetrol S.A. en las refinerías de Apiay (penetración 60-70 1/10 mm) y Barrancabermeja (penetración 80-100 1/10 mm)<sup>9</sup>. Muestras de dichos materiales fueron obtenidas, respectivamente, de las plantas de mezclado de las compañías Nacional de Pavimentos (Villavicencio, Meta) y Patria S.A. (Mosquera, Cundinamarca). El segundo grupo incluye dos cementos asfálticos industrialmente modificados con elastómero para cumplir con las especificaciones que el Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS) establece para cementos asfálticos modificados tipos I y V.

**Tabla 1.** Materiales evaluados

Cementos Asfálticos	Llenantes y Proporciones Utilizadas	Agregados
No Modificados	I: Apiay	F1-50%
	II: Barrancabermeja	F1-50%
		F2-50%
Modificados	I M: Asfalto Modificado Tipo I	F3-50%
		F2-100%
	V M: Asfalto Modificado Tipo V	Oklahoma, E.E.U.U.
		F2-50%
	F2-100%	3. Grava: Risaralda, Colombia

F1: Arenisca; F2: Basalto; F3: Caliza.

Además, el estudio incluyó el uso de llenante mineral (pasa tamiz 200), producto de la trituración y cribado de tres agregados de diferente composición mineralógica (i.e., arenisca, basalto y caliza), para la producción y correspondiente medición de ESL de masillas asfálticas (asfalto con adición de llenante mineral). Estas masillas fueron preparadas añadiendo dos proporciones de llenante mineral (0.6 y 1.2 de relación de llenante mineral a asfalto por volumen) identificadas en la Tabla 1 como 50% y 100%, respectivamente. La mayor relación empleada (1.2) corresponde al máximo valor sugerido por Anderson [15] para la adición de llenante

mineral en mezclas asfálticas de gradación densa, razón por la cual se identificó como 100% de adición de llenante mineral. Es necesario aclarar que no todas las masillas reportadas (combinaciones asfalto-llenante) incluyen los tres tipos llenantes ni tampoco las dos proporciones de los mismos (Tabla 1).

Las mediciones de ESL para los dos grupos de cementos asfálticos—modificados y no modificados—y para las masillas fabricadas con éstos, se realizaron mediante la aplicación del método de la Placa de Wilhelmy con base en los ángulos de contacto de avance, siguiendo las recomendaciones propuestas por Hefer et al. [16]. Detalles sobre la medición de ESL empleando el método de la Placa de Wilhelmy pueden encontrarse en Hefer et al. [16] y Alvarez y Caro [17]. Adicionalmente, empleando la Máquina de Adsorción Universal (USD, por su sigla en inglés a partir de Universal Sorption Device) se determinaron las componentes de ESL para los tres agregados listados en la Tabla 1. Detalles sobre el procedimiento y los fundamentos de la técnica de medición de ESL empleando el USD se encuentran reportados en literatura previa [18,19]. El agregado de procedencia colombiana (“Grava”), es caracterizado por la presencia de partículas provenientes principalmente de depósitos rocosos de basalto.

Los ensayos de medición de ESL se llevaron a cabo en el Laboratorio de caracterización avanzada de materiales de Texas A&M University. En total se realizaron catorce mediciones de ESL, once para cementos asfálticos y masillas, y tres para los agregados. Estos datos fueron usados para la evaluación de los índices descritos anteriormente, en función de las Ecuaciones 2 a 5.

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestran los valores de trabajo de adhesión en seco calculados a partir de la Ecuación 2. Estas cifras indican la cantidad de energía necesaria para crear una nueva superficie de área unitaria en la interface del sistema asfalto (con o sin llenante)-agregado en ausencia de agua (en estado líquido o gaseoso) en su interface. Por lo tanto, altos valores de trabajo de adhesión en seco identifican un sistema asfalto-agregado difícil de separar y, consecuentemente, con alta adhesividad y resistente a la fractura (i.e., *fatiga*).

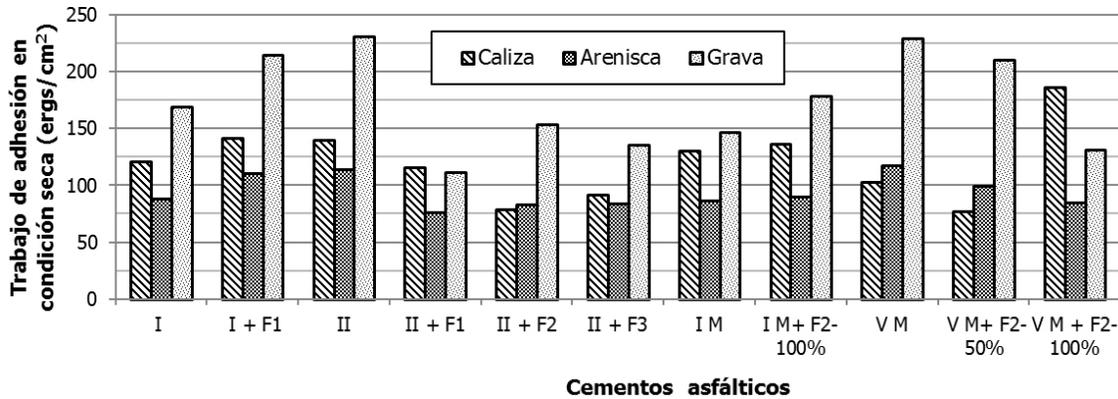


Figura 1. Valores de trabajo de adhesión en condición seca (ergs/cm<sup>2</sup>)

Los valores más altos de trabajo de adhesión en condición seca se obtienen sistemáticamente para las combinaciones de *Grava* (excepto con el asfalto VM + F2-100%), mientras que la arenisca estudiada tiende a generar las adhesiones más débiles. Por su parte, la adición de llenante mineral modificó los valores de trabajo de adhesión en condición seca en diferentes proporciones dependiendo del asfalto base, tipo y cantidad de llenante mineral. Estas modificaciones proporcionan evidencia de la interacción asfalto-llenante mineral, la cual conlleva a modificaciones en las componentes de ESL del asfalto base y por ende en la respuesta del sistema masilla asfáltica-agregado.

En la Figura 2 se presentan los valores de adhesión en condición húmeda calculados para los diferentes sistemas asfalto-agregado-agua. Estos valores suministran información sobre la susceptibilidad de los sistemas asfalto-agregado al daño por humedad. La susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas (i.e., pérdida gradual de la integridad estructural de la mezcla por la presencia de humedad en su microestructura) es de particular interés en la caracterización de este material puesto que constituye una de las principales causas de deterioro temprano y acelerado en pavimentos flexibles. Caro et al. [20] presentan una revisión detallada de los mecanismos asociados con este proceso de deterioro.

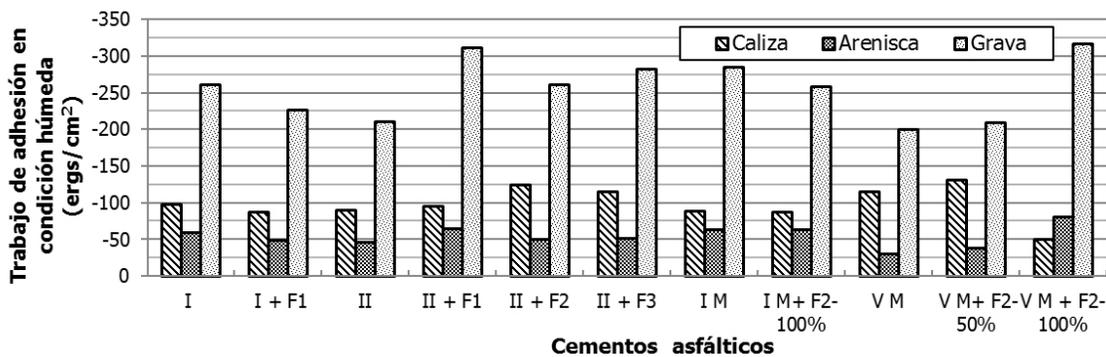


Figura 2. Valores de trabajo de adhesión en condición húmeda (ergs/cm<sup>2</sup>)

Es común encontrar valores negativos para el trabajo de adhesión en condición húmeda, lo cual indica que el asfalto en presencia de agua será desprendido del agregado sin necesidad de adicionar energía al

sistema. De esta forma, los sistemas más susceptibles son aquellos con un mayor valor absoluto de trabajo de adhesión en condición húmeda. En semejanza con la Figura 1, la *Grava* nuevamente genera los

valores más altos de trabajo de adhesión para todas las combinaciones evaluadas, dejando al descubierto que, a pesar de ser un excelente agregado en términos de resistencia a la fractura (con respecto a las combinaciones de materiales estudiadas), frente al daño por humedad su aporte no es positivo. Sin embargo, sus elevados valores de trabajo de adhesión en húmedo, tienden a disminuir si la combinación analizada incluye llenante mineral, como es el caso de los cementos asfálticos *I+F1*, *IM+F2-100%*, lo cual devela un potencial aporte novedoso del llenante mineral en el desempeño de la mezcla asfáltica.

El índice ER (Ecuación 4) facilita la evaluación comparativa de la susceptibilidad al daño por humedad de distintas combinaciones asfalto-agregado; las combinaciones de cementos asfálticos y agregados que producen altos valores del índice ER son menos sensibles al daño por humedad. En este orden de ideas, y con base en los resultados presentados en la Figura 3, los sistemas más sensibles pueden variar dependiendo del esquema que se utilice para su análisis. Si la evaluación se realiza desde la perspectiva de los asfaltos no modificados, el asfalto más proclive al daño por humedad es el *II+ F1*, mientras que para los modificados es el *VM+ F2-100%*.

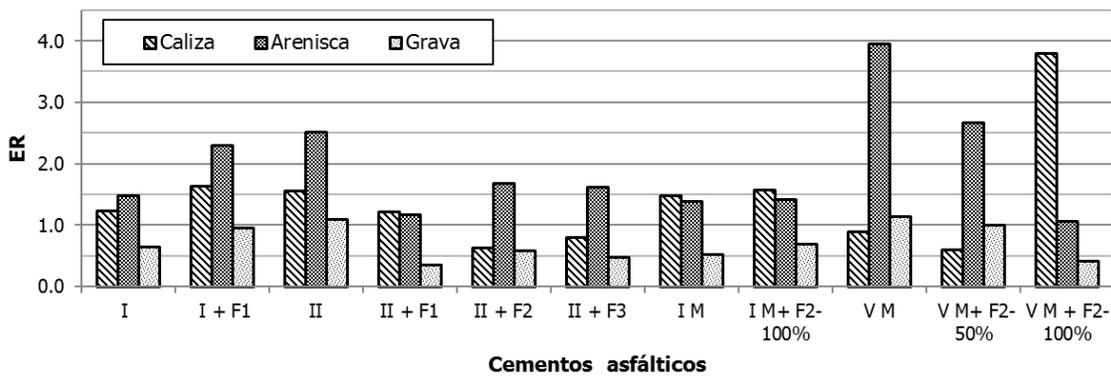


Figura 3. Valores del índice ER

Ahora bien, si la comparación se realiza desde la perspectiva de los agregados, los resultados son bastante diversos. Por ejemplo, la combinación *VM+ F2 100% - Caliza*, arroja el mayor valor del índice ER en comparación con el resto de agregados con los que se combina este asfalto, mientras que para la combinación que incluye este mismo agregado y asfalto *VM+ F2-50%*, es justamente el valor de trabajo de adhesión más bajo. En el mismo ejemplo, al conservar iguales

los materiales constitutivos: asfalto, agregado y tipo de llenante, solo basta cambiar la cantidad de éste último (50% y 100%) para obtener altas diferencias entre los valores del índice ER. Estas observaciones señalan que cada uno de los elementos del sistema asfalto-agregado-llenante mineral puede tener una alta influencia con respecto a la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla asfáltica.

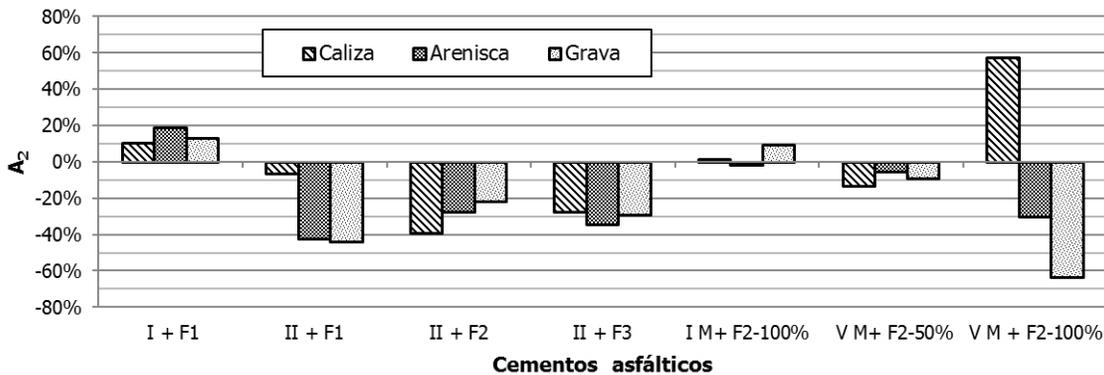


Figura 4. Valores del índice A<sub>2</sub>

En la Figura 4 se presentan los valores del índice  $A_2$  (Ecuación 5), el cual evalúa la influencia de la adición de llenante mineral sobre el trabajo de adhesión en estado húmedo. Valores positivos indican que la adición de llenante mineral mejora el comportamiento de la combinación asfalto-agregado en presencia de agua (i.e., menor susceptibilidad al daño por humedad). Tal como se evidencia en la Figura 4, la adición de llenante mineral resulta ser determinante en el comportamiento de los sistemas frente al daño por humedad, presentándose mejoras al tener valores de  $A_2$  cercanos al 60% ( $VM + F2-100\%-Caliza$ ) y casos en los que la presencia de llenante aumenta significativamente la susceptibilidad al daño por humedad.

Ejemplos de la segunda condición corresponden a los resultados obtenidos con los tres tipos de llenante mineral usados con el asfalto *II*; todos empeoraron el desempeño del asfalto frente a un posible desprendimiento del agregado por acción del agua, situación reflejada en los valores negativos sistemáticamente obtenidos para el factor  $A_2$ . No obstante, también existe la posibilidad de que el impacto del llenante mineral sobre el sistema sea prácticamente nulo. Los resultados obtenidos con la masilla  $IM+F2-100\%$  así lo ejemplifican.

Esta gama de resultados permite concluir que el llenante mineral no es un material “inerte” con efectos únicamente asociados a la respuesta macroscópica de la mezcla asfáltica como en buena parte de la literatura clásica se reporta [21]. Por lo tanto, se considera adecuado adelantar investigación adicional para

reevaluar las razones que justifican el uso actual del llenante mineral en las mezclas asfálticas y establecer criterios específicos para la definición rutinaria (diseño de mezcla) del llenante mineral óptimo a emplear según el asfalto y agregados disponibles.

Por último, los valores del coeficiente de extensión, definido en la Ecuación 6, se presentan en la Figura 5. Este coeficiente es una medida cuantitativa de la capacidad de un asfalto de cubrir un agregado, propiedad conocida como humectabilidad. Un sistema asfalto-agregado con un alto valor de humectabilidad indica alta afinidad del asfalto a recubrir el agregado, beneficiando un adecuado entramamiento mecánico del asfalto y el agregado [13]. Adicionalmente, se podría plantear que altos valores de humectabilidad podrían estar asociados con un bajo potencial de daño por humedad gracias a que existe una menor probabilidad de generar puntos en los que el agua penetre en la interfase del sistema asfalto-agregado [12].

Sin embargo, y de acuerdo con los resultados de las Figuras 2 y 5, es importante mencionar que si bien un buen recubrimiento del asfalto sobre el agregado es fundamental para garantizar un desempeño satisfactorio de la mezcla asfáltica, éste no es un requisito suficiente para evitar el daño por humedad. De hecho, a pesar de que la mayoría de las combinaciones de la Figura 5 que incluyen *Grava* presentan los mayores valores para el coeficiente de extensión, estas mismas combinaciones obtienen los valores más desfavorables frente al desprendimiento asfalto-agregado en presencia de agua (Figura 2).

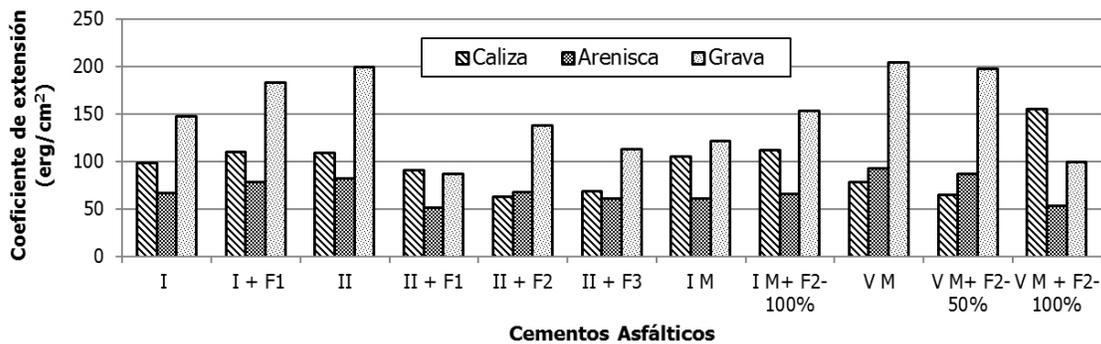


Figura 5. Valores del coeficiente de extensión (SC)

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este artículo presenta un análisis de la caracterización de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de

energía superficial libre (ESL) de asfaltos y agregados empleados en mezclas asfálticas de pavimentación. Para ello se emplearon diversos índices calculados a partir de los valores de las componentes de ESL que

fueron medidos para diferentes cementos asfálticos y agregados. De esta forma, se evaluó la calidad de la adhesión (trabajo de adhesión en condición seca) y la susceptibilidad al daño por humedad (trabajo de adhesión en condición húmeda, índice ER e índice  $A_2$ ) de diversos sistemas asfalto-agregado, así como la capacidad del asfalto de recubrir el agregado (humectabilidad), calculada en términos del coeficiente de extensión. La cuantificación de estos índices permitió, específicamente, el estudio del efecto de procesos industriales de modificación de asfaltos y de la adición de llenante mineral al asfalto.

Los índices discutidos en el artículo se consideran una alternativa al uso de indicadores de comportamiento convencionalmente empleados en la tecnología de pavimentos (e.g., ensayos de resistencia conservada—tracción indirecta—, compresión simple, etc.), los cuales han mostrado tener limitaciones para capturar la respuesta de los materiales analizados, en parte debido a que éstos no se basan en la determinación de propiedades fundamentales de dichos materiales.

Los resultados específicos de esta investigación sugieren que cada componente de la mezcla asfáltica (i.e., asfalto—con o sin adición de llenante mineral u otros modificadores—, agregado y llenante mineral) puede influenciar de manera decisiva su desempeño y durabilidad. Por lo tanto, no es suficiente el estudio de alguno de ellos de manera aislada, puesto que la disposición de sus combinaciones es determinante en el desempeño final de la mezcla asfáltica.

Además se comprobó que una combinación específica de asfalto-agregado puede tener un enlace asfalto-agregado de alta calidad (altos valores de trabajo de adhesión en condición seca) y contar además con una excelente capacidad de recubrimiento (humectabilidad) del asfalto sobre el agregado pero, en presencia del agua, estas condiciones no son suficientes para evitar que conformen mezclas con alta sensibilidad al daño por humedad. En vista de lo anterior, es necesario realizar un análisis conjunto (y específico para cada combinación de materiales) de la respuesta del sistema asfalto-agregado en condiciones seca y húmeda.

Adicionalmente, el análisis de dos grupos de cementos asfálticos—modificados y no modificados—sugiere que

la inclusión de un tipo y cantidad específica de llenante mineral puede transformar el comportamiento de los mismos (e.g., aumento o disminución de la sensibilidad frente al daño por humedad), independientemente del grupo al que pertenezcan. Por lo tanto, se sugiere una revisión de los criterios usados actualmente para la selección de la cantidad y tipo de llenante mineral a adicionar.

Finalmente, el análisis realizado demostró la utilidad del uso de propiedades fundamentales como la ESL, pues ésta permite adentrarse en el análisis de las propiedades de las fases constitutivas de la mezcla asfáltica, entender más claramente la forma como estas fases interactúan y así, seleccionar los materiales más convenientes para el diseño y fabricación de una mezcla asfáltica. Sin embargo, es necesario continuar la investigación en este tema (a través de estudios que perfeccionen las concepciones aquí consignadas) y aportar elementos de juicio adicionales para la óptima selección de materiales, que conlleven a mezclas asfálticas resistentes a la fatiga y al daño por humedad.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Dra. Amy Epps Martin y el Dr. Eyad Masad (Texas A&M University) para completar el trabajo experimental del artículo y la contribución técnica y editorial realizada por la Dra. Silvia Caro Spinel. De la misma forma, el primer autor, como Profesor Asociado y director del Grupo Integrado de Investigación en Ingeniería Civil-GIIC (Universidad del Magdalena), agradece el apoyo brindado por la Universidad del Magdalena a través de FONCIENCIAS para completar el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Kim, R. Y., *Modeling of asphalt concrete*, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [2] Beltrán, D. P., Caro, S., Alvarez, A. E. and Caicedo, B., Empleo de un modelo mecánico de fractura para caracterizar la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas tibias, XVIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos-Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2011.

- [3] Lytton, R., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltmen, D. and Stoffels, S., Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixtures. Report No. SHRP-A-357, Washington, D.C., 1993.
- [4] Castelo Branco, V., A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer [Ph.D. Dissertation]. College Station, TX: Texas A&M University, 2008.
- [5] Wasiuddin, N. M., Zaman, M. M. and O'Rear, E. A., Effect of sasobit and aspha-min on wettability and adhesion between asphalt binders and aggregates, Transportation Research Record, 2051, pp. 80-89, 2008.
- [6] Vargas, X., Afanasjeva, N., Alvarez, M., Marchal, P. and Choplin, L., Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto inducida bajo termo-oxidación in situ en un reactor, DYNA, 155, pp. 191-198, 2008.
- [7] Vargas, X. and Reyes, F., Asphalt's aging phenomenon, Ingeniería e Investigación, 30 (3), pp. 27-44, 2010.
- [8] Alvarez, A. E., Ovalles, E. and Caro, S., Assessment of the effect of mineral filler on asphalt-aggregate interfaces based on thermodynamic properties, Construction and Building Materials, 28 (1), pp. 599-606, 2012.
- [9] Kandal, P. S., Lynn, C. Y. and Parker, F., Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures. NCAT Report 98-02. National Center for Asphalt Technology (NCAT)-Auburn University, Auburn, AL, 1998.
- [10] Bhasin, A., Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water [Ph.D. Dissertation]. College Station, TX: Texas A&M University, 2006.
- [11] Van Oss, C. J., Interfacial forces in aqueous media, New York: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [12] Bhasin, A., Little, D. N., Vasconcelos, K. L. and Masad, E., Surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes, Transportation Research Record, 2001, pp. 37-45, 2007.
- [13] Bhasin, A., Howson, J., Masad, E., Little, D. N. and Lytton, R. L., Effect of modification processes on bond energy of asphalt binders. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington, D.C., pp. 1-14, 2007.
- [14] Bhasin, A., Little, D. N., Vasconcelos, K. L. and Masad, E., Use of surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting. Washington, D.C., p. 1-15, pp. 2007.
- [15] Anderson, D. A., Influence of fines on performance of asphalt concrete mixtures, Proceedings of the Fourth Annual Aggregates Symposium, 1996.
- [16] Hefer, A. W., Bhasin, A. and Little, D. N., Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach, Journal of Materials in Civil Engineering, 18 (6), pp. 759-767, 2006.
- [17] Alvarez, A. E. and Caro, S., Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos, Ingeniería e Investigación, 29 (2), pp. 20-24, 2009.
- [18] Caro, S. and Alvarez, A. E., Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas, Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 58, pp. 95-104, 2011.
- [19] Bhasin, A. and Little, D. N., Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device, Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (8), pp. 634-641, 2007.
- [20] Caro, S., Masad, E., Bhasin, A. and Little, D. N., Moisture susceptibility of asphalt mixtures, part I: Mechanisms, International Journal of Pavement Engineering, 9 (2), pp. 81-98, 2008.
- [21] Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Lee, D. Y. and Kennedy, T. W., Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction, Lanham, Maryland: NAPA Research and Education Foundation, 1996.