

Determinación de la energía superficial libre de cementos asfálticos colombianos

Determining surface free energy for Colombian asphalts

Alex E. Alvarez-Lugo¹ y Silvia Caro-Spindel²

RESUMEN

La energía superficial libre (ESL) de un material se define como la energía necesaria para crear una nueva unidad de superficie en condiciones de vacío. Dicha propiedad está directamente relacionada con la resistencia a la fractura y recuperación (i.e., *healing*) de un material y con la capacidad de crear fuertes adhesiones con otros materiales. Adicionalmente, la calidad de la adhesión entre un cemento asfáltico y un agregado se puede evaluar mediante la cuantificación del *trabajo de adhesión* entre estos materiales. Este valor se puede emplear como un parámetro complementario para la selección y combinación óptima de materiales para mezclas asfálticas, así como en la modelación micromecánica de procesos de fractura y recuperación de dichas mezclas. Este documento describe una técnica de medición de la ESL de cementos asfálticos basada en el uso de la placa de Wilhelmy y reporta las primeras mediciones de ESL disponibles para los cementos asfálticos producidos en las refinerías colombianas de Barrancabermeja y Apiay. Los resultados correspondientes y la ESL de diversos agregados fueron usados para analizar las diferencias en el trabajo de adhesión de varias combinaciones de cemento asfáltico y agregado en condición seca. Dentro de los materiales analizados, el mayor trabajo de adhesión fue el producido por el cemento asfáltico de Barrancabermeja. Los resultados sugieren además que el efecto de un llenante mineral específico sobre la ESL del cemento asfáltico es particular para cada ligante asfáltico. Dicho efecto no necesariamente conlleva al incremento de la ESL del sistema cemento asfáltico-llenante mineral.

Palabras clave: cemento asfáltico, energía superficial libre, trabajo de adhesión, método de placa de Wilhelmy, mezclas asfálticas, pavimentos.

ABSTRACT

The surface free energy (SFE) of a material is defined as being the energy required in vacuum to create a new surface unit. This property is directly related to a material's fracture resistance and healing properties and to its capacity for creating strong bonds with other materials. The quality of the adhesion between asphalt binders and aggregates can also be assessed by computing these materials' *work of adhesion*. This value can be used as an additional parameter for selecting and appropriately combining materials for hot mix asphalt as well as a component of micromechanical models for fracture and healing within these mixtures. This paper describes in detail a technique used for measuring the SFE of asphalts based on the Wilhelmy plate method and reports the first SFE measurements available for asphalts produced in the Colombian refineries of Barrancabermeja and Apiay. Corresponding results, along with the SFE for different aggregates, were used for analysing differences in the work of adhesion for different asphalt-aggregate combinations in dry conditions. Barrancabermeja asphalt produced the highest work of adhesion amongst the materials analysed here. The results also suggested that the effect of specific mineral filler on asphalt SFE is asphalt-dependent; such effect does not necessarily lead to increasing the SFE for the corresponding asphalt-mineral filler system.

Keywords: asphalt, surface free energy, work of adhesion, Wilhelmy plate method, hot mix asphalt, pavement.

Recibido: agosto 12 de 2008

Aceptado: junio 3 de 2009

Introducción

Las mezclas asfálticas empleadas en estructuras de pavimento son materiales porosos que resultan de la combinación de agregados (i.e., roca triturada en variados tamaños y proporciones) y cemento asfáltico. La resistencia y durabilidad de una mezcla asfáltica depende en gran medida de la calidad de la adhesión entre el cemento asfáltico y los agregados. A su vez, la adhesión entre estos dos materiales es función de su composición mineralógica y química, de la morfología de los agregados (i.e., forma y textura) y de las

condiciones en las que se realiza la mezcla. Cuando estas condiciones no son apropiadas (e.g., muy bajas o altas temperaturas, agregados húmedos o recubiertos con material granular fino), o cuando la compatibilidad entre las propiedades químicas y físicas de los componentes de las mezclas es inapropiada, la adhesión entre los dos materiales será deficiente, así como su desempeño en obra.

Existen tres teorías básicas para explicar la adhesión entre un material líquido –como el cemento asfáltico a temperatura de mezclado– y uno sólido como el agregado: 1) la adhesión física, 2) la

¹ Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc., en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Colombia. Candidato a Ph.D., Texas A&M University, USA. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Magdalena, Colombia. aalvarez@neo.tamu.edu

² Ingeniera civil y M.Sc., en Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes, Colombia. Candidato a Ph.D., Texas A&M University, USA. Profesor en formación, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Colombia. scaro@neo.tamu.edu

adhesión mecánica, y 3) la adhesión química (Hefer et al., 2005; Bhasin, 2006).

La primera teoría de adhesión se refiere a las propiedades físicas superficiales de los materiales que permiten que el líquido *humezca* o *recubra* el componente sólido. Este fenómeno se conoce como *wetability* y se define como la resistencia de una gota líquida de mantenerse en equilibrio cuando se encuentra en contacto con un cuerpo sólido (Kinloch, 1980). La capacidad de los líquidos de recubrir cuerpos sólidos, y de los sólidos de permitir ser recubiertos por líquidos, está directamente relacionada con la tensión superficial o energía superficial libre (ESL) de los materiales (i.e., la energía requerida para generar una nueva unidad de área del material). La adhesión entre dos materiales sólo es posible si la ESL del cuerpo sólido es superior a la ESL del líquido. La ESL es una propiedad fundamental de los materiales y su cuantificación se realiza mediante la aplicación de técnicas de caracterización avanzada, tales como el método de placa de Wilhelmy (MPW), el *Sessile Drop*, el método de adsorción universal (USD, por sus siglas en inglés), (Bhasin et al., 2007), la cromatografía de gas inversa y el microcalorímetro. Bhasin (2006) presenta un completo resumen de las características de estas técnicas.

De acuerdo con la teoría de la adhesión mecánica, la unión de los dos materiales depende directamente de las propiedades físicas superficiales del cuerpo sólido. En el caso específico de los agregados empleados en mezclas asfálticas, se ha demostrado que rocas angulares y rugosas generan uniones más resistentes con los cementos asfálticos que agregados con forma redondeada y textura fina (Bhasin, 2006).

Finalmente, la adhesión química sugiere que la unión entre los dos materiales es el resultado de las reacciones químicas que ocurren en la zona de contacto o interfase. La calidad y resistencia de los enlaces químicos son función de las características moleculares de los materiales.

La adhesión entre líquidos y sólidos ha sido ampliamente investigada por ingenieros químicos y mecánicos durante los últimos 50 años debido al uso intensivo de juntas adhesivas compuestas por metales y polímeros (o epóxidos) en la industria automotriz, aeronáutica y electrónica. Los estudios de adhesión de cementos asfálticos y agregados son, por el contrario, más recientes.

La principal motivación para caracterizar la adhesión en mezclas asfálticas es la creciente necesidad de contar con mejores técnicas de selección de materiales (i.e., combinación de agregados y cementos asfálticos) basadas en propiedades fundamentales de los materiales, que garanticen mezclas más resistentes y duraderas. En particular, se ha demostrado que mediante el estudio de la adhesión en sistemas agregado-cemento asfáltico se pueden identificar las combinaciones de materiales que producen sistemas de alta adhesión y alta resistencia al daño por humedad. Este tipo de daño en mezclas asfálticas se define como la disminución de la adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado o la disminución de la cohesión dentro del cemento asfáltico (Kiggundu y Roberts, 1988). La pérdida de adhesión en un sistema agregado-cemento asfáltico por la presencia de humedad es resultado de la preferencia termodinámica del agregado a ser recubierto por agua en lugar de cemento asfáltico, por la cual el agua tiende a romper la unión entre el cemento asfáltico y el agregado. Dicha pérdida de adhesión y cohesión por la presencia de humedad disminuye la resistencia mecánica de la mezcla y acelera otros procesos de deterioro como fatiga y deformación permanente. Mediante la determinación de la ESL de los materiales y aplicando teoría básica de física superficial, es posible identificar combinaciones de agregados y

cementos asfálticos con alta adhesión en estado seco y con baja susceptibilidad al daño por humedad.

Este artículo tiene como objetivos presentar los resultados de las mediciones de ESL de los principales cementos asfálticos colombianos (Barrancabermeja y Apiay) empleados en la producción de mezclas asfálticas y describir el empleo de estos valores para cuantificar la calidad de la adhesión generada cuando son mezclados con agregados de distinto origen y mineralogía. En la primera parte de este documento se explica el significado de la ESL de un material y del *trabajo de adhesión* entre dos materiales. A continuación se describen los materiales empleados en este estudio y el MPW utilizado para la obtención de ESL de los cementos asfálticos. La siguiente sección presenta los valores de ESL obtenidos para dichos materiales y describe la calidad de la adhesión que resulta de combinar diversos cementos asfálticos (colombianos y extranjeros) con agregados de diferente origen.

Energía superficial libre y trabajo de adhesión

Desde el punto de vista termodinámico, la ESL de un material se define como el trabajo requerido para crear una nueva unidad de área en dicho material, bajo condiciones de vacío (Bhasin, 2007). Según la teoría de Good-Van Oss-Chaudhury (Van Oss, 1994), basada en el origen de las fuerzas intermoleculares, la ESL puede descomponerse en tres componentes: monopolar ácida, Γ^+ ; monopolar básica, Γ^- (estos dos términos determinan la componente polar Γ^{AB}) y la componente no polar, Γ^{LW} (también denominada componente Lifshitz-van der Waals). De esta forma, la ESL, Γ , de un material (e.g., cemento asfáltico o agregado) se puede calcular como:

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

A partir de las componentes de ESL de dos materiales, cemento asfáltico y agregado, por ejemplo, es posible calcular el trabajo de adhesión ($W_{AS}^{sec o}$) entre dichos materiales:

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

donde A y S representan las componentes de ESL del cemento asfáltico y del agregado, respectivamente. El trabajo de adhesión se define como la cantidad de energía que se debe suministrar a un sistema para propagar una grieta en su interfase y crear dos nuevas superficies de área unitaria (Bhasin, 2007). Altos valores del trabajo de adhesión están asociados con mayor resistencia a la fractura (i.e., mayor cantidad de energía requerida para propagar una grieta en el material). Es importante mencionar que la ecuación 2 permite determinar el trabajo de adhesión en ausencia de agua en la interfase cemento asfáltico-agregado, pero debe ser modificada para incluir los efectos del agua en dicha interfase (i.e., tres materiales).

Diseño experimental

A continuación se describen los materiales empleados en esta investigación y el MPW usado para calcular la ESL de los cementos asfálticos estudiados.

Selección de materiales

El presente estudio incluyó la caracterización de la ESL de los cementos asfálticos producidos en las refinerías de Ecopetrol S. A. de Barrancabermeja (penetración 80-100 1/10 mm) y Apiay (penetración 60-70 1/10 mm) sin incorporación de modificadores.

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) y fueron ensayadas en dos condiciones: 1) original o virgen, y 2) después de adicionar llenante mineral (arenisca pasatamiz No. 200). En los dos casos, los cementos asfálticos fueron sometidos a ensayos de ESL sin aplicar procesos de envejecimiento o recalentamiento de muestras, con excepción del calentamiento requerido para la preparación de los especímenes, tal como se describe posteriormente. El llenante mineral fue precalentado a 150 °C y mezclado con el cemento asfáltico a la temperatura especificada de mezcla (150 °C en los dos cementos asfálticos) para proceder inmediatamente a la preparación de las placas de ensayo (sección 3.2). La relación en volumen de llenante mineral y cemento asfáltico fue 0,6. Esta relación corresponde al límite inferior de los valores recomendados por Anderson (1996) para la dosificación de llenante mineral en mezclas asfálticas de gradación densa (i.e., 0,6 a 1,2).

Método de placa de Wilhelmy (MPW)

La ESL de los cementos asfálticos caracterizados en este estudio fue obtenida empleando el MPW. Este método permite determinar el ángulo de contacto de un líquido de prueba (i.e., líquido con características de ESL conocidas) sobre la superficie del cemento asfáltico. Con base en el ángulo de contacto entre el cemento asfáltico y diversos líquidos de prueba, y conociendo las componentes de ESL de dichos líquidos, es posible calcular las componentes de ESL del cemento asfáltico, tal como se describe a continuación.

La medición del ángulo de contacto entre el cemento asfáltico y un líquido de prueba con el MPW se realiza empleando placas de vidrio delgadas (50 mm por 24 mm por 0,15 mm de espesor) recubiertas con una capa delgada y uniforme de cemento asfáltico (Figura 1a). Este recubrimiento se obtiene mediante la inmersión de las placas de vidrio en cemento asfáltico precalentado a la temperatura especificada de mezcla (i.e., en estado líquido). Las placas recubiertas se mantienen en un desecador por 24 horas antes de ser sometidas al ensayo con los líquidos de prueba. Durante el ensayo, cada placa recubierta de cemento asfáltico se sumerge y retira lentamente del líquido de prueba mientras se encuentra suspendida de una balanza de precisión (Figura 1b) que registra la fuerza del sistema durante el proceso de inmersión de la placa (o *humedecimiento*) y de retiro de la placa (o *retroceso*).

El análisis de equilibrio de fuerzas del sistema placa-líquido de prueba durante el ensayo permite obtener el ángulo de contacto (θ) que genera el líquido de prueba sobre la superficie del cemento asfáltico:

$$\cos \theta = \frac{\Delta F + V_{im}(\rho_L - \rho_{air})g}{P_L \Gamma_L} \quad (3)$$

donde ΔF es la fuerza medida con la balanza, V_{im} es el volumen de la placa sumergida, ρ_L es la densidad del líquido de prueba, ρ_{air} es la densidad del aire, g es la aceleración local de la gravedad, P_L es el perímetro de la placa recubierta con cemento asfáltico y Γ_L es la ESL total del líquido de prueba. Si la fuerza ΔF empleada en la ecuación 3 corresponde a la lectura de la balanza durante el proceso de inmersión de la placa en el líquido de prueba, el resultado es el ángulo de contacto en humedecimiento o inmersión. Cuando este valor corresponde a la lectura de la balanza al retirar la placa del líquido de prueba, el resultado es el ángulo de contacto de retroceso.

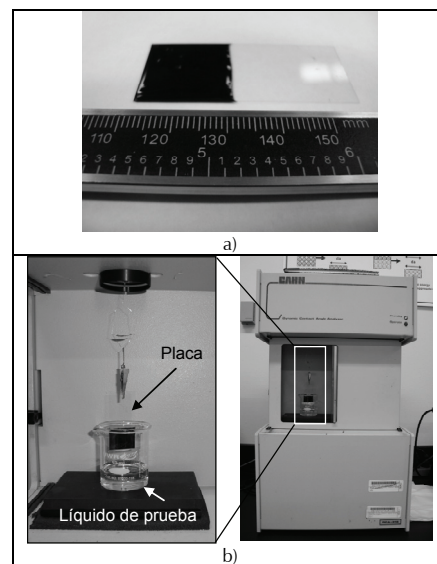


Figura 1. (a) Placa de vidrio recubierta con cemento asfáltico; (b) analizador de ángulo de contacto dinámico (balanza de precisión)

La teoría propuesta por Good, Van Oss y Chaudhury (Good et al., 1988) relaciona el ángulo de contacto de un líquido de prueba, L , en contacto con un sólido, S (e.g., cemento asfáltico en estado sólido) con las componentes de ESL (Γ^{LW} , Γ^+ y Γ^-) del líquido y el sólido, mediante:

$$W_{L,S}^a = \Gamma_L(1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\Gamma_S^{LW}\Gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\Gamma_S^+\Gamma_L^-} + 2\sqrt{\Gamma_S^-\Gamma_L^+} \quad (4)$$

donde $W_{L,S}^a$ representa el trabajo de adhesión entre el líquido de prueba y el cemento asfáltico, el cual se puede calcular mediante la ecuación 2. Es importante recordar que los valores de ESL de los líquidos de prueba (subíndice L en la ecuación 4) son conocidos. Por esta razón, los ángulos de contacto del cemento asfáltico obtenidos de la ecuación 3 con al menos tres líquidos de prueba pueden ser empleados en la ecuación 4 para producir un sistema de tres ecuaciones linealmente independientes. La solución de este sistema proporciona los valores de las tres componentes de ESL del cemento asfáltico, representadas en este caso por Γ_S^{LW} , Γ_S^+ y Γ_S^- . Con base en estos resultados, la ecuación 1 se puede aplicar para obtener la ESL total (Γ) del cemento asfáltico.

En este estudio se emplearon cinco líquidos con el objeto de incrementar la confiabilidad del cálculo de las componentes de ESL y cuatro placas recubiertas fueron sometidas a ensayo con cada líquido para obtener un valor promedio del ángulo de contacto. La tabla 1 presenta las componentes y la ESL total de los líquidos de prueba (Hefer et al., 2006). Los líquidos empleados en el cálculo final de la ESL de los cementos asfálticos fueron seleccionados siguiendo el procedimiento sugerido por Hefer et al. (2006). Los mismos autores presentan detalles adicionales sobre el procedimiento experimental del MPW.

Resultados y análisis

Las componentes y la ESL total (Γ) calculadas para las muestras de cemento asfáltico de Barrancabermeja y Apiay evaluadas en este estudio empleando los ángulos de contacto de humedecimiento y retroceso, se presentan en las tablas 2 y 3, respectivamente. Adicionalmente, estas tablas incluyen el mismo tipo de resultados obtenidos de investigaciones en curso efectuadas en Texas A&M University, para cuatro cementos asfálticos utilizados en la fabri-

cación de mezclas asfálticas en el estado de Texas, USA (Howson et ál., 2008).

Tabla 1. Energía superficial libre de líquidos de prueba a 20 °C (ergs/cm²).

Líquido	Γ_l	Desviación Standard	Γ_l^{IW}	Γ_l^+	Γ_l^-
Agua	72.80	0.20	21.80	25.50	25.50
Glicerol	64.00	0.30	34.00	3.92	57.40
Formamida	58.00	0.20	39.00	2.28	39.60
Etilenglicol	48.00	0.20	29.00	1.92	47.00
Yoduro de metileno	50.80	0.10	50.80	0.00	0.00

Tabla 2. Energía superficial libre de cemento asfáltico basado en ángulos de contacto de humedecimiento

Cemento asfáltico	Γ (ergs/cm ²)	Γ^{IW}	Γ^{AB}	Γ_l^+	Γ_l^-
Apiay – base	10.79	6.24	4.55	2.17	2.39
Barranca. – base	13.09	8.27	4.82	3.43	1.70
Apiay – base con llenante	15.76	9.45	6.32	3.62	2.75
Barranca. – base con llenante	10.40	1.27	9.13	7.64	2.73
PG 64-22 base - 1	20.87	20.16	0.70	0.03	3.75
PG 64-22 base - 2	29.79	29.79	0.00	0.00	1.42
PG 58-28 base - 3	25.79	25.79	0.00	0.00	0.26
PG 64-22 base - 4	17.35	15.30	2.05	0.32	3.31

Tabla 3. Energía superficial libre de cemento asfáltico basado en ángulos de contacto de retroceso

Cemento asfáltico	Γ (ergs/cm ²)	Γ^{IW}	Γ^{AB}	Γ_l^+	Γ_l^-
Apiay – base	24.69	9.85	14.85	5.42	10.16
Barranca. – base	50.19	21.23	28.96	4.88	43.00
Apiay – base con llenante	49.47	27.26	22.21	2.79	44.21
Barranca. – base con llenante	23.35	10.57	12.78	3.37	12.12
PG 64-22 base - 1	48.15	42.74	4.42	0.59	8.27
PG 64-22 base - 2	49.68	41.83	7.85	1.00	15.37
PG 58-28 base - 3	47.61	39.34	8.27	0.70	24.34
PG 64-22 base - 4	42.47	40.11	2.37	0.12	11.41

Como se mencionó, una de las principales aplicaciones de la ESL es su empleo en la evaluación de combinaciones óptimas de cementos asfálticos y agregados. Adicionalmente, con base en las componentes de la ESL determinadas en los procesos de humedecimiento y retroceso (tablas 2 y 3), es posible calcular sendos trabajos de adhesión entre el cemento asfáltico y el agregado mediante la aplicación de la ecuación 2. De acuerdo con Kim (2009), dichos trabajos de adhesión se pueden emplear para predecir procesos de recuperación (i.e., *healing*) –a partir del trabajo de humedecimiento– y fractura –a partir del trabajo de retroceso– de mezclas asfálticas. La magnitud total de recuperación de la mezcla asfáltica se relaciona directamente con la razón entre la componente polar y la componente no polar del trabajo de adhesión de humedecimiento (Kim, 2004). Así mismo, la resistencia a la fractura de un material, es decir, la resistencia a iniciar y propagar fisuras, se relaciona directamente con la magnitud del trabajo de adhesión de retroceso.

Con el objeto de ilustrar la evaluación de combinaciones de materiales, la ESL de los cementos asfálticos antes referidos y la ESL de agregados de diverso origen mineralógico fueron empleadas para cuantificar y analizar las diferencias en el trabajo de adhesión de retroceso de diferentes combinaciones de estos materiales. La tabla 4 presenta las componentes y el valor de ESL total correspondientes a cinco agregados de origen norteamericano incluidos en esta aplicación. Las mediciones de ESL de los agregados se obtuvieron empleando la máquina de adsorción universal (Bhasin et

ál., 2007) en el marco de un estudio de caracterización termodinámica de materiales usados en mezclas asfálticas (Howson et ál., 2008).

Tabla 4. Energía superficial libre de agregados

Agregado	Γ (ergs/cm ²)	Γ^{IW}	Γ^{AB}	Γ_l^+	Γ_l^-
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

La tabla 5 presenta los trabajos de adhesión, W_{AS}^{sec} , obtenidos al combinar los componentes de ESL de los cementos asfálticos incluidos en la tabla 3 con los componentes de ESL de los agregados reportados en la tabla 4, mediante el empleo de la ecuación 2.

Tabla 5. Trabajo de adhesión (retroceso-fractura) entre cementos asfálticos y agregados (en ergs/cm²)

	Caliza (Texas)	Granito (Oklahoma)	Cuarcita (Arkansas)	Arenisca (Oklahoma)	Caliza (Ohio)
Apiay – base	193.34	219.44	176.70	128.18	149.54
Barranca. – base	332.19	279.17	214.09	157.40	176.02
Apiay – base con llenante	345.97	259.50	199.10	151.32	164.08
Barranca. – base con llenante	201.34	197.40	157.17	116.07	132.27
PG 64-22 base - 1	257.37	180.15	156.17	135.63	139.12
PG 64-22 base - 2	287.67	204.83	171.06	143.29	149.04
PG 64-22 base - 3	312.75	206.12	166.43	138.22	142.21
PG 64-22 base - 4	262.67	159.23	135.32	120.18	119.47

Los valores reportados en la tabla 5 sugieren que:

–El sistema con la mejor adhesión (en ausencia de agua) consta de la mezcla de cemento asfáltico de Apiay con llenante y la caliza de Texas, mientras que la adhesión más débil ocurre entre el cemento asfáltico de Barrancabermeja con llenante y la arenisca de Oklahoma.

–La caliza de Texas y el granito de Oklahoma producen uniones resistentes con todos los tipos de cemento asfáltico, mientras que la arenisca de Oklahoma y la caliza de Ohio presentan los valores más bajos de adhesión para todos los ligantes asfálticos. Estas respuestas son en general congruentes con las magnitudes de las componentes de ESL de los agregados y permiten observar diferencias importantes en mezclas constituidas con agregados de origen similar (e.g., caliza de Texas y Ohio) provenientes de fuentes distintas.

–El llenante mineral afecta de varias maneras la capacidad de adhesión de los cementos asfálticos. Por ejemplo, mientras que el llenante empleado mejora la adhesión entre el cemento asfáltico de Apiay y todos los tipos de agregado incluidos en este estudio, su empleo disminuye la calidad de la adhesión entre el cemento asfáltico de Barrancabermeja y los mismos agregados. Diferentes respuestas se deben esperar al emplear llenantes con diferentes características (i.e., mineralogía, gradación y proporción). Las modificaciones antes discutidas ilustran la importancia del llenante mineral como modificador de cementos asfálticos y la necesidad

de realizar su adecuada selección en la fabricación de mezclas asfálticas.

-Dentro de los cementos asfálticos analizados, el cemento asfáltico virgen de Barrancabermeja produce en general la mejor adhesión, en condición seca, con todos los tipos de agregado considerados.

Es importante aclarar que la tabla 5 no se debe emplear para clasificar el “mejor cemento asfáltico” o el “mejor agregado”; por el contrario, esta información se ha de utilizar exclusivamente como una guía para elegir combinaciones apropiadas dentro de un grupo de materiales disponibles. Adicionalmente, es importante resaltar que existen combinaciones de agregado y cemento asfáltico que generan fuertes adhesiones en ausencia de agua, pero que son muy susceptibles a separarse cuando existe humedad en la interfase de los dos materiales. Por esta razón, la mejor combinación de materiales es aquella que se caracteriza no sólo por tener altos trabajos de adhesión en condición seca, es decir, que requiere gran cantidad de energía externa para separar sus componentes, sino que también presenta baja susceptibilidad al daño por humedad. Bhasin *et ál.* (2006) propusieron varios índices, basados en principios de física superficial, que permiten identificar este tipo de combinaciones. El análisis se encuentra fuera del alcance de este artículo.

Conclusiones

Este documento describe brevemente los fundamentos teóricos de la energía superficial libre (ESL) de un material, el trabajo de adhesión entre cementos asfálticos y agregados empleados en mezclas asfálticas y la técnica de medición de la ESL de cementos asfálticos basada en el método de la placa de Wilhelmy. Adicionalmente, se reportan mediciones de la ESL obtenidas para los cementos asfálticos producidos en las refinerías colombianas de Barrancabermeja y Apiay.

La ESL es una propiedad termodinámica fundamental que permite determinar el trabajo de adhesión entre dos o más materiales. Este parámetro puede emplearse para establecer combinaciones de cementos asfálticos y agregados que generen mezclas con fuerte adhesión en condición seca (i.e., alta resistencia a la fractura) y baja susceptibilidad al daño por humedad. De esta forma, el trabajo de adhesión se puede utilizar como parámetro inicial de la metodología de diseño de mezclas asfálticas, al constituirse en un indicador eficaz para el diseño de mezclas resistentes y duraderas. Adicionalmente, el trabajo de adhesión puede ser empleado para modelar a nivel micromecánico los fenómenos de fractura y recuperación (i.e., *healing*) de mezclas asfálticas y de esta forma mejorar la caracterización de dichos materiales para el diseño de estructuras de pavimento.

Con el objetivo de ilustrar la aplicación de la ESL en la selección de materiales, se calculó el trabajo de adhesión (de retroceso) entre cementos asfálticos producidos en las refinerías colombianas de Barrancabermeja y Apiay y agregados de diverso origen. Los resultados sugieren que la resistencia a la fractura –evaluada en términos de la calidad de la adhesión en ausencia de agua en la interfase– de los agregados considerados y cementos asfálticos colombianos es similar a la resistencia de interfaces compuestas por los cementos asfálticos extranjeros considerados en este estudio. Dichos resultados además permiten concluir de forma preliminar que el efecto de un llenante mineral específico sobre la ESL del cemento asfáltico es particular para cada ligante. No obstante, se recomienda adelantar estudios adicionales para cuantificar, entre otros aspectos: 1) la variabilidad de la ESL de los asfaltos colombia-

nos, 2) el efecto de llenantes minerales de diversos orígenes, 3) el efecto del agua sobre el comportamiento de las mezclas, y 4) los cambios inducidos en la ESL por modificadores empleados en la industria para el mejoramiento de cementos asfálticos.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al Ing. José Luis Barrios Murillo y a las compañías Patria S. A. y Nacional de Pavimentos por su colaboración en la obtención de las muestras de ensayo empleadas en este estudio. Adicionalmente, se extiende un agradecimiento especial a la doctora Amy Epps-Martin (profesora asociada, Texas A&M University) por su apoyo en la ejecución del mismo. El primer autor expresa además sus agradecimientos a Colciencias y a la Universidad del Magdalena por el apoyo brindado en la realización de sus estudios de doctorado en Texas A&M University.

Bibliografía

- Anderson, D. A., Influence of fines on performance of asphalt concrete mixtures., Proceedings of the Fourth Annual Aggregates Symposium, Atlanta, GA, abril, 1996.
- Bhasin, A., Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due to Water., Tesis presentada a Texas A&M University (College Station, Tx), para optar por el grado de Doctor of Philosophy, 2006.
- Bhasin, A., Howson, J., Masad, E., Little, D. N., Lytton, R., Effect of modification processes on bond energy of asphalt binders., TRB Annual Meeting CD-Room, Washington D.C., Transportation Research Board, enero, 2007, pp. 1-14.
- Bhasin, A., Little, D. N., Characterization of Aggregate Surface Energy Using the Universal Sorption Device., Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 19, No. 8, 2007, pp. 634-641.
- Hefer, A. W., Bhasin, A., Dallas, N. L., Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach., Journal of Materials in Civil Engineering © ASCE, Vol. 18, No. 6, 2006, pp. 759-767.
- Hefer, A. W., Little, D. N., Lytton, R. L., A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water., Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74., 2005, pp. 139-196.
- Howson, J., Bhasin, A., Masad, E., Lytton, R. L., System for the Evaluation of Moisture Damage Using Fundamental Material Properties-Implementation Study., Report FHWA/TX 0-5524-01-1, College Station, Texas, Texas Transportation Institute-Texas A&M University, *in press*.
- Kiggundu, B. M., Roberts, F. L., Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods., Report 88-02, National Center for Asphalt Technology- Auburn University, 1988.
- Kinloch, A. J., The Science of Adhesion, Part 1: Surface and Interfacial Aspects., Journal of Materials Science, Vol. 15, 1980, pp. 2141-2166.
- Kim, Y. R., Modeling of Asphalt Concrete., New York, ASCE Press-Mc Graw Hill, 2009, pp. 75-77, 359-363.
- Van Oss, C. J., Interfacial Forces in Aqueous Media., Marcel Dekker Inc., New York, 1994.
- Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., Good, R. J., Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems., Chemical Reviews, Vol. 88, No. 6, 1988, pp. 927-941.