



COGRESO MEXICANO DEL ASFALTO

Expo-ASFALTO 2017

23 - 25 de agosto Cancún 2017

## ESTUDIO DE LA ADHESIÓN Y COHESIÓN POR MEDIO DE ENERGÍA SUPERFICIAL LIBRE DE TRES TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS UTILIZADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ASFALTO PENETRACIÓN 60-70

Fredy Reyes<sup>1</sup>, Néstor Cely<sup>2</sup>, Ana Figueroa<sup>3</sup>

1: Profesor Titular Ingeniería Civil, Grupo CECATA, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia, fredy.reyes@javeriana.edu.co.

2: Grupo CECATA, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia, n.cely@javeriana.edu.co.

3: Profesor Asociado. Grupo INDETEC, Universidad de la Salle, Bogotá Colombia, afigueroa@unisalle.edu.co.

### RESUMEN

Las vías en Bogotá, Colombia presenta malas condiciones y con las constantes lluvias en la zona se pretende dar una medida cuantitativa del efecto del “stripping” y de la humedad sobre la unión del asfalto 60-70 Barrancabermeja y tres agregados pétreos, los cuales dos son areniscas explotadas en canteras de la región y el tercero es una caliza traída del Rio Coello, los cuales son típicamente usados en mezclas asfálticas, y así determinar el mejor comportamiento adhesivo y cohesivo de las estructuras a través del ensayo BBS y del método de la Gota Sésil. Para las diferentes uniones asfalto-agregado se determinaron los ángulos de contacto, la humectabilidad y el trabajo adhesivo en seco y en húmedo. De este modo, se determinó que la interacción del agregado del Alto la Laguna con el asfalto presenta mejor comportamiento ante el efecto del agua, y un mayor Índice de Daño por Humedad (IDH); además se concluyó que los tres agregados estudiados se clasifican como altamente susceptibles al daño por humedad con valor de IDH menor a 0,5 por lo tanto se recomienda que las mezclas asfálticas tengan un modificador que reduzca el efecto hidrófilo de los agregados con el agua.

**Palabras clave:** Adhesión, Cohesión, Energía superficial libre, Humectabilidad, Stripping.

### ABSTRACT

Roads in Bogota, Colombia are plagued by both poor pavement conditions and constant precipitation. To tackle these issues, this paper quantitatively measures the effect of stripping and moisture on the bond between AC 60-70 and three aggregates (two sandstone and one limestone, given that they represent those most commonly employed in Bogota's pavements). The idea is to study the aggregate's adhesive and cohesive behavior via the BBS test and the Sessile Drop method. For the asphalt-aggregate bonds, contact angles, wettability and adhesive work under dry and wet conditions were determined. Results identify sandstone



aggregate as preferable, especially in terms of moisture damage resistance. Furthermore, this study concludes that the aggregates studied are highly susceptible to water damage, with a Humidity Damage Index less than 0.5. As a result, asphalt mixtures should rely on a modifier to mitigate moisture damage in asphalt mixtures.

**Keywords:** Adhesion, Cohesion, Surface free energy, Wettability, Stripping.

## 1 Introducción

El asfalto constituye uno de los materiales más usados en el área de la ingeniería vial; debido a que aporta economía y versatilidad en dicho campo, por lo que gran parte de las vías de la ciudad de Bogotá están construidas con carpetas asfálticas. No obstante, las condiciones climáticas de la región inciden en el deterioro de las mezclas y afectan la unión del asfalto-agregado generando separación del ligante y el agregado.

Ishai y Craus (1977)(1), estudiando los micro-mecanismos de daño por humedad de las mezclas asfálticas introdujeron la teoría de Energía Superficial como un tercer mecanismo, además de la teoría química y mecánica, para explicar la adhesión. Así mismo lo definieron como el método más potente de evaluación de la adhesión entre el asfalto y el agregado.

En las últimas décadas se han desarrollado nuevas metodologías que estudian los modelos micro-mecánicos de fractura para identificar e investigar las causas y el desarrollo de los efectos del agua en mezclas asfálticas (2).

No obstante, el problema a estudiar está basado en las condiciones de la malla vial de la ciudad de Bogotá presentan en un 63%, de su longitud total, de malas a regulares condiciones de movilidad, de acuerdo al índice PCI. De ahí que, Villegas Flores et al. (2014) reflejan que el 94.5% de los deterioros encontrados en los pavimentos en la ciudad de Bogotá están asociados principalmente al comportamiento frágil que experimentan mezclas asfálticas sometidas a climas de bajas temperaturas. Especialmente en vías con escaso mantenimiento superficial en donde el daño por humedad y fenómenos como el “stripping” se hacen evidentes (4).

El fenómeno anteriormente nombrado tiene como efecto la separación del ligante asfáltico de los agregados pétreos debido a la pérdida de adherencia y cohesión de la interface asfalto-agregado (Caro-Spínel&Alvarez-Lugo, 2011; Kassem, Masad, Lytton, & Bulut, 2009; Kyatham&Khattak, 2008; Mallick, Pelland, & Hugo, 2005; Rondón-Quintana & Moreno-Anselmi, 2010).

De esta manera la investigación tiene como objetivo principal determinar el mejor comportamiento adhesivo de los tres tipos de agregados pétreos usados en la región con el asfalto 60-70 Barranca.

## 2 Materiales y métodos

El cemento asfáltico utilizado en la investigación corresponde al producido en las refinerías de Barrancabermeja por Ecopetrol S.A que según la referencia internacional es un ASTM D 1437 lo cual nos garantiza una penetración mínima/máxima de 60/70 (0,1 mm) a 25°C de 60-70. Esta muestra se obtuvo de la planta de mezclado de la compañía INCEIN S.A. (Mosquera, Cundinamarca).

De igual manera, se utilizaron 3 tipos de agregados comúnmente usados en mezclas asfálticas en la ciudad de Bogotá. Dos agregados vienen de zonas de explotación a cielo abierto, el primer agregado utilizado fue extraído de la zona de Mondoñedo, este tipo de material es una arenisca con una densidad aparente de 2,46 y una absorción del 3,36%, el segundo agregado fue extraído del Alto la Laguna con una densidad aparente de 2,43 y una absorción del 3,33%, por último, el tercer agregado es del río Coello, es una caliza de color gris de origen aluvial con valores de densidad aparente de 2,74 y absorción de 0,36%.

El Primero de los ensayos que se utilizaron para determinar el efecto de la humedad en la unión asfalto agregado, el ensayo BBS, el cual se tomó como guía la norma AASHTO TP-91 (5). El objetivo de este ensayo es la cuantificación de la afectación de la humedad sobre la interface de los dos materiales, como se ve en la Figura 1. La principal ventaja del ensayo BBS es que se ha podido comprobar su simplicidad, rapidez y repetitividad (6).

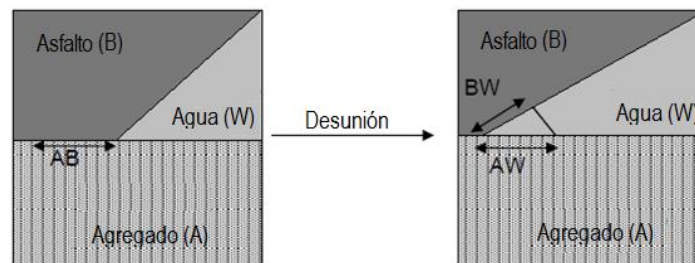


Figura 1. Desplazamiento de la unión de la Ligante-Agregado Interface por agua. Fuente: (7).

Para el ensayo BBS se utilizaron cuatro tipos de superficies, la primera fue el vidrio, el cual fue utilizado para comprobar la repetitividad y agilidad del método. Las siguientes tres superficies fueron cortadas de las rocas mencionadas anteriormente. El equipo utilizado es el PATTI, que está compuesto como lo explica Moraes, Bahia, & Velasquez (2011a) por un medidor neumático, mangueras de presión, pistón, placa de reacción y un pull-out stub (tornillo de arranque).

El ensayo cuenta con tres etapas fundamentales, la primera es la preparación de las superficies, los tornillos y el asfalto. Comienza con la limpieza de las rocas y vidrios buscando que las caras queden superficialmente limpias de cualquier rastro de polvo, impurezas y asfalto. Acto seguido, la elaboración de las gotas de asfalto las cuales deben pesar  $0,40 \pm 0,02$  gr. La segunda etapa es el montaje Tornillo- Asfalto-Agregado, el cual, se realiza con una carga controlada de 50 gr.

Por último, el ensayo propiamente dicho, que empieza con la calibración del equipo PATTI, este proceso inicia al conectar el aire y cargar el medidor neumático del equipo con exactamente 100 psi, la prensa debe estar ajustada a la placa de reacción y el pistón (ver Figura 2a). Al ejecutar el medidor neumático, regulando el paso de aire, la presión se transmite al pistón a través de la manguera de presión a una velocidad de presión de tracción constante, el software PQGold muestra los resultados en forma de Tiempo vs. Presión a la tracción. Este proceso debe realizarse variando la cantidad de aire que pasa por el medidor neumático hasta que la pendiente de la gráfica sea  $100 \pm 0,02$  (ver Figura 2b).

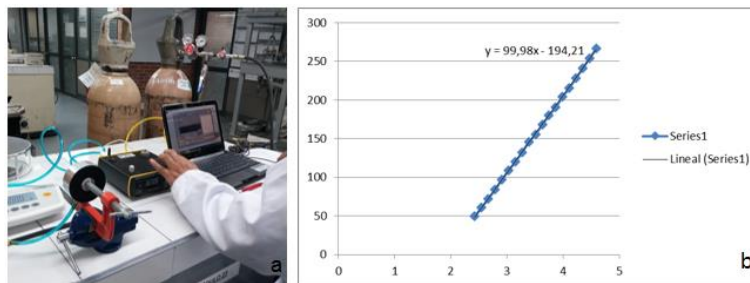


Figura 2. (a) Proceso de calibración del equipo PATTI y (b) Línea de chequeo del proceso de calibración.

Antes de medir la tensión necesaria para el arranque de los tornillos se debe tener controlada la temperatura de ejecución en ambas condiciones por lo que el ensayo se realiza dentro de un baño maría a  $25^{\circ}\text{C}$ . Por último, se aplica la carga de presión de aire neumática retirando el tornillo del agregado con cemento asfáltico. La superficie se inspecciona visualmente para determinar el tipo de falta (Ver Figura 3). Si la huella de asfalto es superior al 80% el modo de falla es Cohesivo, pero si por el contrario, la huella es inferior al 80% el modo de falla es Adhesivo.



Figura 3. Huellas típicas después de realizado en ensayo BBS.

El segundo ensayo realizado fue la medición de los ángulos de contacto con el Goniómetro, la metodología usada está descrita en la norma ASTM-D7334 (8), con los cuales, se puede calcular la Energía Superficial Libre (ESL) y la Humectabilidad del asfalto 60-70 Barranca con los tres diferentes agregados. Estos cálculos se realizaron siguiendo la metodología del ensayo de la Gota Sésil



basado en la teoría termodinámica ácido-base, fundamentada en las fuerzas de adhesión intermoleculares y sus componentes, la monopolar ácida - básica, y la no polar (9). Como base matemática se usó la formulación de Young-Dupre, donde se relacionan las componentes de la ESL con los ángulos de contacto que se obtienen con el ensayo gracias al Goniómetro. Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

El equipo usado en la experimentación (Goniómetro) está diseñado básicamente para la caracterización de la energía superficial en sólidos. Con la ventaja de poder medir el ángulo de contacto de la gota con alta precisión.

La humectabilidad se determina ensayando el asfalto como líquido, para ello, se usó el controlador de la cámara térmica, encendido a 135°C por 30 minutos. La medición del ángulo de contacto debe ser realizada inmediatamente después de la colocación de la gota sobre la roca (máximo 1 minuto después).

El cálculo de la ESL se realizó usando cuatro superficies (los tres agregados y la lámina de asfalto) y tres líquidos de referencia con los valores de sus componentes polares – apolares conocidos. En esta investigación se utilizaron Formamida, Agua Desionizada y Etilenglicol.

Siguiendo la metodología, la jeringa de dispersión se ubicó a una altura estándar y la base móvil es la que varía, subiendo y bajando verticalmente, de forma que al subir el líquido se contacte con la superficie, adhiriéndose e inmediatamente se separó de la superficie y se tomó la medida del ángulo de contacto. Dicha medición se realizó gota por gota (ver figura 4), debido a que la porosidad de los agregados varía el volumen y el ángulo de contacto de los líquidos sobre la superficie.

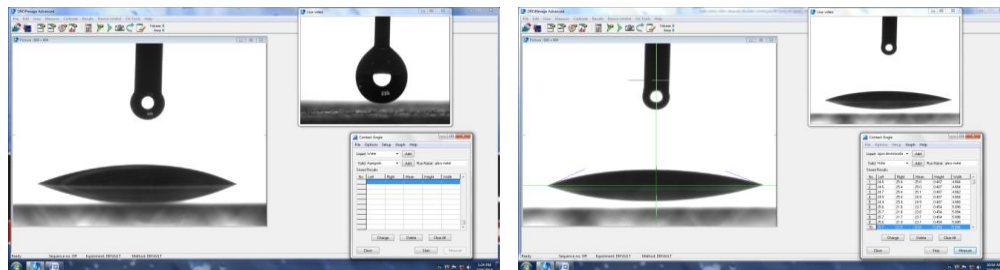


Figura 4. Ejecución del Software DROPIImageAdvanced.

### 3 Análisis y discusión de los resultados

El tiempo de acondicionamiento de las muestras se reflejó en el modo de falla mostrado por la huella de asfalto sobre las rocas después de ser arrancados los tornillos. La absorción de asfalto por parte de las rocas, la cual es una propiedad física, incidió en que las areniscas presentaran falla cohesiva en condiciones seca y húmeda y que la caliza presentara falla cohesiva en condición seca y en



condición húmeda falla adhesiva demostrando la baja porosidad y capacidad de captar asfalto por parte de este tipo de roca como se demuestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Modo de falla de la Unión Asfalto-Agregado para cada condicionamiento.

Superficie	Condición Seca		Condición Húmeda	
	Perdida de Asfalto Promedio	Modo de Falla	Perdida de Asfalto Promedio	Modo de Falla
Agregado 1 (Arenisca) Fuente Mondoñedo				
Agregado 2 (Arenisca) Fuente Alto La Laguna	98,60%	Falla Cohesiva	96,72%	Falla Cohesiva
Agregado 3 (Caliza) Fuente Rio Coello	94,92%	Falla Cohesiva	92,40%	Falla Cohesiva
	88,60%	Falla Cohesiva	40,00%	Falla Adhesiva

La Figura 5 muestra los valores de la tensión necesaria para arrancar el tornillo (Pull-Out Tensile Strength, POTS) de la unión Asfalto-Agregado, la cual es calculada usando la siguiente ecuación:

$$POTS = \frac{(BP*Ag)-C}{Aps} \quad (1)$$

La ecuación mencionada anteriormente depende del área cubierta por el asfalto después de ser arrancado el tornillo (Ag) y la tensión de arranque obtenida en el ensayo (BP); C es la constante del pisto y Aps es el área total de contacto del asfalto con el agregado. En condiciones secas las tres rocas fallaron cohesivamente, demostrando, que las fuerzas de adhesión de la interface Asfalto-Agregado fueron mayores que las fuerzas internas de cohesión del asfalto. Así mismo, en condición húmeda, las areniscas continuaron con ese comportamiento, pero la caliza cambio totalmente el modo de falla, presentando perdida del material asfáltico de más del 60%, debido a que como se explicó anteriormente su porcentaje de absorción de asfalto es menor que el de las areniscas.

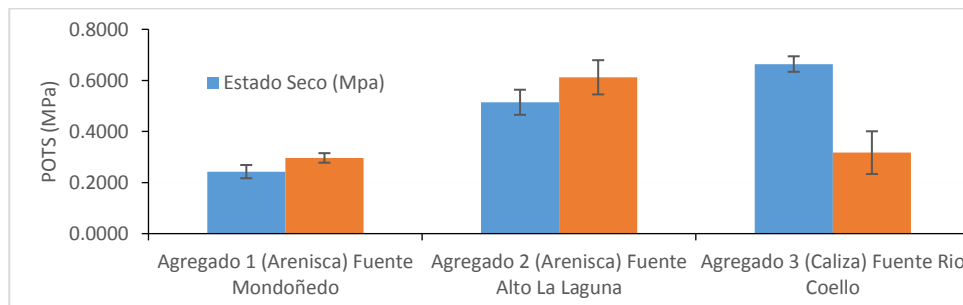


Figura 5. Valores de POTS para las tres rocas en las dos condiciones.

Las huellas de asfalto sobre las superficies de los diferentes agregados muestran claramente el daño por humedad causado por el agua al entrar en

contacto con la unión Agregado- Asfalto. En condición seca (Figura 6) los tres tipos de roca fallaron por cohesión, debido a que la huella de asfalto es completa.



Figura 6. Comportamiento de la Unión Asfalto-Agregado en Condición Seca.



Figura 7. Comportamiento de la Unión Asfalto-Agregado en Condición Húmeda.

En la Figura 7 se puede ver claramente como en las areniscas la tensión de arranque aumenta a pesar de estar condicionadas las mismas 96 horas que la caliza, esto se puede entender al comparar la unión asfalto-agregado al ser ensayado en condiciones seca y húmeda, al ver el comportamiento de los tres tipos de rocas al ser ensayado en seco, se destaca que la falla fue cohesiva entre las partículas de asfalto, por lo tanto, la tensión de arranque no se vio reducida por la pérdida de asfalto, pero al revisar la unión creada en la interface entre las areniscas y el asfalto en condiciones húmedas se ve que esta es suficientemente resistente como para no ser desplazada por el agua (ver Figura a y 8b), por lo tanto, la interface se va consolidando con el tiempo y ahí un aumento en la tensión de arranque. Lo contrario sucede con la caliza, ya que el asfalto es desplazado con mayor facilidad al estar en contacto con agua después de 96 horas (ver Figura 8). Este efecto se explica también, matemáticamente debido a que la huella residual de asfalto disminuye más del 55% al pasar de 88,6% para condición seca a 39,7% en condición húmeda.

Los ángulos de contacto obtenidos mediante el ensayo de la Gota Sésil son mostrados en las Tablas 2 y 3. La Tabla 2 es obtenida al momento de usar el asfalto como líquido, para esta parte del ensayo se recuerda que se realizó sobre las superficies de los tres agregados estudiados. La Tabla 3 muestra los ángulos de contacto formados entre los tres líquidos de referencia y las cuatro superficies. Para simplificar las tablas se nombraron tomando como referencia las iniciales de los líquidos y de las superficies, el asfalto se discrimino como "A" la Formamida como "F", el Etilenglicol como "E", y el Agua Desionizada como "H<sub>2</sub>O". Los



agregados fueron nombrados de la siguiente manera: El primer agregado obtenido en Mondoñedo fue nombrado “C1MO”, el segundo del Alto La Laguna se nombró “C2AL” y el tercer agregado traído del Río Coello recibió el nombre de “C3RC”.

La Tabla 2 muestra los ángulos de contacto formados van desde 155,9° hasta 161,4°, estos valores demuestran que el asfalto no moja las superficies de las rocas ya que el ángulo formado entre los dos materiales es muy superior a 90°.

Tabla 2. Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil (Asfalto).

Superficie	Ángulo. contacto	COV
AC1MO	155,9°	3,13%
AC2AL	159,2°	2,21%
AC3RC	161,4°	2,22%

La Tabla 3 refleja el comportamiento esperado, debido a que los líquidos de referencia al entrar en contacto con las rocas mojan la superficie (ángulo de contacto menor a 90°) y debido a su porosidad son absorbidos con rapidez, lo contrario sucede en la interacción de estos líquidos con la lámina de asfalto, ya que al no ser solventes de asfalto estas gotas caen y permanecen casi inalteradas sobre la superficie mostrando ángulos muy aproximados a 104°.

Tabla 3 Resumen Ángulos de Contacto Promedio con el Ensayo Gota Sésil.

Superficie	Formamida		Etilenglicol		Agua Desionizada	
	Promedio	COV	Promedio	COV	Promedio	COV
FA	105,2	1,32%	104,0	1,33%	103,9	0,82%
FC1MO	20,0	5,78%	10,5	6,17%	18,2	4,53%
FC2AL	22,8	4,67%	22,9	4,20%	27,1	3,46%
FC3RC	31,7	6,23%	34,7	5,59%	31,0	5,81%

El cálculo de las componentes monopolar acida, monopolar básica, y la no polar son fundamentales en el cálculo de la Energía Superficial Libre Total de los tres agregados usados en la investigación y del asfalto 60/70 Barrancabermeja (ver Tabla 4), esta teoría termodinámica fundamentada en las fuerzas de adhesión intermoleculares y sus componentes relacionadas con los ángulos de contacto obtenido del ensayo de la Gota Sésil, apoyado en la fórmula de Young-Dupre (Formula 2) para el cálculo del trabajo adhesivo, como se muestra a continuación.

$$\gamma_L * (1 + \cos\theta) = 2 * \sqrt{\gamma_S^{LW} * \gamma_L^{LW}} + 2 * \sqrt{\gamma_S^+ * \gamma_L^-} + 2 * \sqrt{\gamma_S^- * \gamma_L^+} \quad (2)$$

Tabla 4. Componentes de la Energía Superficial Libre de los Líquidos de Prueba a 20°C. Fuente: (3).

Líquido	Energía libre superficial total	Componente Apolar	Parámetro ácido	Parámetro básico
	$\gamma^{total}(mJ/m^2)$	$\gamma^{LW}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$
Agua Desionizada	72,80	21,80	25,50	25,50
Formamida	57,50	38,50	2,30	39,60
Etilenglicol	48,00	29,00	1,92	47,00





La expresión matricial se generará de la siguiente manera  $A x = B$ , donde:

$$A = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_{l1}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l1}^+} & \sqrt{\gamma_{l1}^-} \\ \sqrt{\gamma_{l2}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l2}^+} & \sqrt{\gamma_{l2}^-} \\ \sqrt{\gamma_{l3}^{LW}} & \sqrt{\gamma_{l3}^+} & \sqrt{\gamma_{l3}^-} \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \sqrt{\gamma_s^{LW}} \\ \sqrt{\gamma_s^-} \\ \sqrt{\gamma_s^+} \end{bmatrix} \quad B = 0,5 * \begin{bmatrix} \gamma_{l1}(1 + \cos \theta_1) \\ \gamma_{l2}(1 + \cos \theta_2) \\ \gamma_{l3}(1 + \cos \theta_3) \end{bmatrix}$$

Donde, los subíndices  $l1, l2$  y  $l3$  reseñan a los líquidos de referencia y el subíndice  $s$  especifica una determinada superficie.

Así pues, después de desarrolladas las matrices, la Tabla 5 presenta los componentes de Energía Superficial Libre del Asfalto 60-70 Barrancabermeja y de los tres agregados utilizados en la investigación. Se puede deducir que comparativamente el agregado con menor tendencia a formar una nueva superficie de área individualizada es el agregado de Mondoñedo, esto significa, que a menor ESL mayor será la capacidad del material en estar en contacto con otro y no tratar de separarse.

Tabla 2. Resumen Energía Superficial Libre Total y sus Componentes.

Superficie	Componentes Acido (+) y Basico (-) (ergs/cm2)	Componente Acido-Basico $\gamma^{AB}$ (ergs/cm2)	Componente Apolar $\gamma^{LW}$ (ergs/cm2)	ESLT
				$\gamma$ (ergs/cm2)
Asfalto 60-70	$\gamma$ 0,098	1,886	8,998	10,883
barranca	$\gamma^+$ 9,111			
Agregado 1	$\gamma$ 56,223	14,199	65,849	80,047
Mondoñedo (arenisca)	$\gamma^+$ 0,896			
Agregado 2 alto La Laguna (arenisca)	$\gamma$ 50,440	23,784	78,607	102,391
	$\gamma^+$ 2,804			
Agregado 3 Rio Coello (Caliza)	$\gamma$ 52,161	30,459	80,060	110,519
	$\gamma^+$ 4,447			

De acuerdo con Bhasin A (7) la Energía Superficial Libre Total típicamente en los ligantes asfálticos está en el intervalo de 15 a 45 ergios/cm2 y la Energía Superficial Libre Total en los agregados pétreos se encuentra en el intervalo de 50 a 400 ergios/cm2, otro aspecto que certifica el buen cálculo de la ESLT y sus componentes es que los mismos autores muestran que para los agregados pétreos la magnitud del componente básico siempre será significativamente mayor, contrario a lo que sucede en los ligantes asfálticos donde el componente acido será el mayor de los dos componentes polares.

Para Caro-Spinel y Alvarez-Lugo (3) el asfalto colombiano se encuentra en el orden de los 10,8 y 12,1 ergios/cm2, y como vimos en la Tabla 5 el asfalto estudiado tiene 10,9 ergios/cm2 de ESL total.



Los agregados pétreos de esta investigación también tienen valores muy congruentes con el mismo estudio, como se puede observar en la Tabla 7 los valores de la Arenisca de Oklahoma con 104,98 y la Caliza de Ohio con 111,15 (3) concuerdan con los valores de ESL, los valores obtenidos para la Arenisca del Alto la Laguna una ESL de 102,4 ergios/cm<sup>2</sup> y para la Caliza del Rio Coello una ESL de 110,5 ergios/cm<sup>2</sup>.

En la Tabla 6 se puede ver la combinación de ligantes asfálticos y agregados y sus respectivos valores de trabajo adhesivo, allí se ve claramente que en seco la combinación que tiene mayor capacidad adhesiva es el agregado del Rio Coello con el Asfalto 60-70 Barrancabermeja, debido a que la energía necesaria para separar las dos superficies un mayor que en las otras dos superficies. Como se explica (10) Los sistemas de Unión Asfalto-Agregado entre materiales con altos valores de trabajo adhesivo están asociados con una mayor resistencia a la fractura (mayor vida en fatiga). Por lo tanto, altos valores de trabajo adhesivo es una condición deseable en toda mezcla asfáltica.

Tabla 6. Trabajo de Adhesión en Seco entre el Asfalto 60-70 Barranca y los Agregados Petreos.

Ligante	Agregado	W <sub>LS</sub> (ergs/cm <sup>2</sup> )
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 1 Mondoñedo (arenisca)	59,08
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 2 alto la laguna (arenisca)	67,73
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 3 rio Coello (caliza)	70,92

El trabajo adhesivo en húmedo es usado para determinar el efecto del agua al actuar entre la unión Asfalto-Agregado, esta acción se debe a la afinidad del agua con los agregados pétreos, por lo que, las rocas se dejan envolver fácilmente por el agua, contrario a lo que sucede con el asfalto, que es un material hidrofóbico. La metodología para el cálculo del trabajo adhesivo en condición húmeda es a través de los valores individuales de la ESL. Así, variando la ecuación (3) para la inclusión de un tercer material, en este caso el agua, se pudo calcular el trabajo de adhesión entre un ligante asfáltico y un agregado pétreo cuando el agua está presente en su interface. La ecuación para trabajo adhesivo en húmedo sería:

$$W_{LWS}^{HUMEDO} = \gamma_{LW} + \gamma_{SW} - \gamma_{LS} \quad (3)$$

Donde, los subíndices *L*, *W*, y *S* se refieren a las combinaciones de trabajo adhesivo entre el Ligante Asfáltico, el Agua y los Agregados Pétreos respectivamente.

Tabla 7 Trabajo de Adhesión en Húmedo entre el Asfalto 60-70 Barranca y los Agregados Petreos y Agua.

Ligante	Agregado	$\gamma_{LW}$	$\gamma_{SW}$	$\gamma_{LS}$	W <sub>LWS</sub> <sup>HUM</sup>
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 1 Mondoñedo (arenisca)	61,65	161,07	59,08	163,63
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 2 alto la laguna (arenisca)	61,65	171,43	67,73	165,35
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 3 rio Coello (caliza)	61,65	177,79	70,92	168,52



En la Tabla 7 se puede ver que el trabajo adhesivo entre el asfalto y el agua en los tres casos es exactamente el mismo, pero, las componentes agregado agua y agregado asfalto tienen variaciones mínimas, dando como resultado que el trabajo adhesivo húmedo varié para las tres combinaciones de agregado-agua-asfalto. Pero, en realidad, estas variaciones no son significativas, mostrando que los tres tipos de agregados tienen un comportamiento similar en presencia del agua.

Siempre se anhela que un sistema Ligante asfáltico – Agregado pétreo tenga buenas condiciones de adhesión en estado seco y que la pérdida de material ligante (stripping) sea lo mínimo posible en presencia de agua. Lo anterior se relaciona con el Índice de Daño por Humedad (IDH) con el hecho que, a mayor magnitud de trabajo adhesivo, mayor será la energía necesaria para generar la pérdida de material en la mezcla asfáltica. Altos valores de IDH están relacionados con mezclas resistentes al daño por humedad (11). Por consiguiente, el IDH se usó para comparar el comportamiento de la unión Asfalto-Agregado, dando valores que posicionaran cada unión según su afectación por humedad.

Tabla 8 Índice de Daño por Humedad (IDH) de las diferentes Uniones Asfalto-Agregado.

Ligante	Agregado	IDH
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 1 Mondoñedo (arenisca)	0,361
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 2 alto la Laguna (arenisca)	0,410
Asfalto 60-70 barranca	Agregado 3 rio Coello (caliza)	0,421

Los valores que se ven en la Tabla 8 sugieren que, los tres agregados pétreos utilizados en la ciudad de Bogotá al ser mezclados con asfalto 60-70 Barrancabermeja se ven afectados de manera similar por la humedad, esto se debe matemáticamente a que los valores de trabajo adhesivo en seco y húmedo también son muy similares entre ellos. El IDH clasifica cualitativamente la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas. (12) enmarcaron a las mezclas asfálticas en tres grandes grupos según su IDH, aquellas con valores mayores a 1,5 de IDH como altamente resistentes al daño por humedad en campo, mezclas con IDH entre 0,5 y 1,5 como mezclas de resistencia media al daño por humedad y por último, mezclas con IDH inferior a 0,5 como altamente susceptibles al daño por humedad. Esto indica que los agregados usados actualmente en la ciudad de Bogotá son altamente afectados por la humedad, y que la diferencia entre ellos no es considerable.

Como nos dice Caro-Spindel y Alvarez-Lugo (11) es importante aclarar, que los valores de IDH proveen información sobre la susceptibilidad termodinámica al daño por humedad, pero no permiten comparar la velocidad de deterioro a la cual se espera que ocurran estos procesos de daño.

Al momento de relacionar los resultados directos de afectación de la unión asfalto-agregado obtenidos con el ensayo BBS (Figura 6) y los valores de afectación termodinámica de dicha unión a través del trabajo adhesivo basado en el método de gota sécil (Figura 9) se puede ver que siguen la misma tendencia ya que para los dos ensayos en ambas condiciones la unión más débil fue el agregado 1 (arenisca) extraído de la zona de Mondoñedo y la unión más fuerte fue



el agregado 3 (caliza) explotado del Rio Coello, pero también, se detalló que físicamente el agregado 3 es el más afectado, debido a que en el ensayo BBS fue la única unión que fallo por adhesión. Este hecho nos sugiere, que el agregado 2 (arenisca) extraído del Alto la Laguna, ante los dos ensayos fue el más regular, con valores de trabajo de adhesión y de tensión de arranque (POTS) muy cercanas al tercer agregado, pero con mejor comportamiento de la unión al ser sometido a un condicionamiento desfavorable (96 horas en contacto directo con el agua).

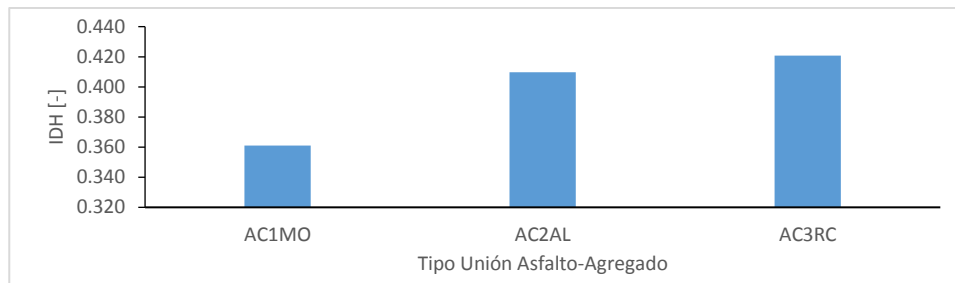


Figura 8. Índice de Daño por Humedad (IDH) de las diferentes Uniones Asfalto-Agregado.

#### 4 Conclusiones y recomendaciones

La absorción es una propiedad física de los agregados pétreos que afecta significativamente el comportamiento de la unión asfalto-agregado, ya que, a mayor absorción, mayor será la dificultad a separar el ligante asfáltico y el agregado pétreo.

Las uniones asfalto-agregado estudiadas presentaron incrementos de resistencia a la tracción de arranque utilizando el ensayo Bitumen Bond Strength (BBS) en condición húmeda comparada con la resistencia a la tracción obtenida en condición seca. Aunque el aumento no fue significativo, mostró que el agua no influye en la disminución de la energía de arranque requerida.

Los tres agregados estudiados se clasificaron según el IDH como muy susceptibles a la humedad, pero el segundo agregado (arenisca) del Alto la Laguna, tuvo el comportamiento más uniforme al ser sometido a los ensayos BBS con un valor promedio de tracción de arranque alto y menor pérdida de ligante asfáltico al estar condicionado; y además, el trabajo adhesivo en la interface fue relativamente alto, por lo que, en comparación con los otros agregados estudiados fue el de mejor comportamiento al ser afectado por la humedad.

Las interfaces de las uniones asfalto-agregado que presentan altos valores de trabajo adhesivo, están asociados con mezclas con mayor vida en fatiga, ya que están menos propensas a generar grietas internas.

Los resultados mostrados anteriormente justifican la necesidad de seleccionar cuidadosamente los materiales de pavimentación de forma que la unión Asfalto-agregado genere altos valores de trabajo de adhesión en estado seco comparado con el trabajo de adhesión húmedo, para así, buscar baja susceptibilidad al debilitamiento de dicha unión por acción del agua.



Debido a que los materiales estudiados están clasificados como altamente afectados por la humedad, sería recomendable introducir un modificador que reduzca la afinidad de los agregados por el agua y así reducir de cierta manera la entrada de agua a la unión Asfalto-agregado.

## 5 Referencias

- [1]. Ishai, I., & Craus, J. (1977). Effect of the filler on aggregate-bitumen adhesion properties in bituminous mixtures. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 46).
- [2]. Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 81-98.
- [3]. Alvarez-Lugo, A. E., & Caro-Spindel, S. (2009). Determining surface free energy for Colombian asphalts. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 20-24.
- [4]. Villegas Flores N, Rondon HA, Sanchez E, Miramontes D, Cabascango AE, Dalfré G. cc [Internet]. 43a Reunión Anual de Pavimentación; 2014 [citado 5 de diciembre de 2014]. Recuperado a partir de: <https://es.scribd.com/doc/245349084/Patologias-de-pavimentos-asfalticos-em-climas-extremos-Estudo-de-caso-Brasil-Mexico-e-Colombia>
- [5]. AASHTO TP-91. Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Bitumen Bond Strength (BBS) Test [Internet]. AASHTO; 2011. Report No.: TP-XX-11. Recuperado a partir de: <https://uwmarc.wisc.edu/binder-bond-strength>
- [6]. Moraes R., Bahia H., & Velasquez R. (2011a). Selección de Materiales para Mezclas Asfálticas Resistentes al Daño por Humedad Utilizando el Método de La Gota Sésil.
- [7]. Bhasin, A., & Little, D. N. (2007). Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(8), 634-641.
- [8]. ASTM D7334. Standard Practice for Surface Wettability of Coatings, Substrates and Pigments by Advancing Contact Angle Measurement [Internet]. ASTM International; 2013 [citado 17 de octubre de 2014]. Report No.: ASTM D7334. Recuperado a partir de: <http://www.astm.org/Standards/D7334.htm>
- [9]. Van Oss C. J. (1994). Interfacial forces in aqueous media. *J Chem Technol Biotechnol.*, 64, 311-311.
- [10]. Bahramian A. (2012). Evaluating surface energy components of asphalt binders using Wilhelmy Plate and Sessile Drop Techniques.
- [11]. Caro-Spindel, S., & Alvarez-Lugo, A. E. (2011). Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (58), 95-104.
- [12]. Bhasin, A., Masad, E., Little, D., & Lytton, R. (2006). Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, (1970), 3-13.