

ANÁLISIS DE ADHESIÓN ASFALTO-AGREGADO EN COSTA RICA

José Pablo Aguiar Moya¹, Jorge Salazar Delgado², Juan Francisco Pacheco Fallas³,
María José Jiménez⁴, Luis Guillermo Loria Salazar⁶

¹ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. jose.aguiar@ucr.ac.cr

² Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. jorge.salazardelgado@ucr.ac.cr

³ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. juan.pachecofallas@ucr.ac.cr

⁴ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. mariajose.jimenez@ucr.ac.cr

⁶ Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Resumen

A nivel nacional, el deterioro de pavimentos por causas asociadas a la humedad es muy alto. Lo anterior va directamente asociado a la capacidad de adhesión entre el asfalto y el agregado y a la cohesión interna de la matriz asfáltica. Esta afinidad entre componentes es la que va a incidir en cómo responde el material compuesto a la presencia de agua, ¿Se presentará un daño asociado a humedad rápidamente?, ó ¿El efecto de la humedad será poco durante la vida útil del material?

Aunado a esto, se ha demostrado que las pruebas típicas para la determinación de la resistencia al daño por humedad no son representativas para las condiciones imperantes en el país, razón por la cual se presenta una necesidad importante de poder cuantificar cuál es la resistencia real de una mezcla asfáltica al efecto de la humedad. Para poder responder dicha pregunta se busca entender el fenómeno de adhesión desde una perspectiva física pura donde se analiza directamente la energía superficial del asfalto y del agregado, así como la energía interfacial entre dichos materiales.

Como parte del proyecto se midió la energía superficial libre del asfalto disponible a nivel nacional (PG64-22) en todas las condiciones de envejecimiento (original, RTFO y RTFO+PAV) y la de agregados de cinco de las principales fuentes de material a nivel nacional (calizo, silíceo), permitiendo así el cálculo del trabajo de adhesión entre estos materiales. Adicionalmente, conociendo las propiedades del agua, se cuantificó como varía dicha adhesión en presencia de agua.

Finalmente, los resultados de trabajo de adhesión fueron comparados con observaciones realizadas mediante el ensayo ABS (Fuerza de Enlace del Asfalto), el cual corresponde a una técnica rápida para cuantificar la adhesión entre el asfalto y el agregado de una manera mucho más expedita. Dichos resultados correlacionaron significativamente con las mediciones de energía.

Palabras clave: adhesión, cohesión, energía superficial, daño por humedad, desempeño, PATTI, Goniometría, ángulo de contacto, trabajo de adhesión.

1 Introducción

En Costa Rica, como en muchos países del trópico, existe variedad de los llamados microclimas a lo largo de las rutas pavimentadas, cambios climáticos rápidos y en ocasiones agresivos, precipitación elevada. A esto se suman altas cargas por vehículos pesados, tránsito a baja velocidad, suelos ricos en arcillas expansivas y drenajes que son insuficientes durante la época lluviosa. Todos los factores anteriores se combinan para generar una alta probabilidad de daño por humedad, que puede ser desde desnudamiento por desprendimiento de la película de ligante

asfáltico, generación de huecos o baches hasta agrietamiento, y con este que el agua y vapor ingrese, deteriore la estructura y finalmente falle.

Considerando el caso de desnudamiento y la pérdida de la película de ligante asfáltico de los agregados, claramente es un caso de falla por adhesividad entre el agregado y el material aglutinante, es evidente que roca como un material inorgánico posee poca afinidad química con materiales orgánicos complejos como el ligante asfáltico, diferencias de carga (polaridad) genera que la compatibilidad no perdure y que el agua genere que se separe con facilidad solo con ayuda del tiempo, es un problema de adhesión donde interviene una serie de factores o teorías, solo estudiando esta área podrá ser analizado y solventado el daño por humedad.

El fenómeno de adhesión evidencia la tendencia de dos materiales disímiles desde el punto de vista molecular a mantenerse unidos. Se aceptan cuatro teorías que explican el fenómeno de adhesión entre el asfalto y el agregado, las cuales son: adhesión mecánica, orientación molecular, energía superficial y la reacción química. En la mayoría de las veces es una combinación de los mecanismos citados anteriormente son los responsables de la adhesión y no sólo uno de ellos de manera individual. Estas cuatro teorías se ven afectadas por algunos factores, entre los que tienen un efecto más significativo sobre ellas están: tensión superficial del asfalto y el agregado, composición química del asfalto y el agregado, viscosidad del asfalto; textura superficial, porosidad y limpieza del agregado así como la temperatura y el contenido de humedad del agregado en el momento que se realiza la mezcla asfáltica.

Por tanto para el presente estudio se buscó cuantificar la afinidad de las distintas fuentes de agregado al asfalto usado en Costa Rica y caracterizar el efecto del uso de cal en la susceptibilidad al daño por humedad. Para tal propósito se utilizó el ensayo ABS (Fuerza de Enlace del Asfalto) para evaluar la adhesión del asfalto-agregado y la cohesión interna del asfalto. Adicionalmente, se realizaron mediciones del ángulo de contacto para las distintas combinaciones de asfalto-agregado mediante el goniómetro. Esto se complementó con la estimación del trabajo de adhesión entre los materiales, a partir de la energía superficial de ambos materiales (asfalto y agregado). Todas las mediciones anteriores se realizaron a tres niveles de envejecimiento para medir el efecto de este proceso en la adhesividad.

1.1 Teoría de Adhesión Mecánica

Esta teoría física de adhesión se basa en las propiedades físicas del agregado. Entre las más destacadas se deben citar la textura superficial, la porosidad o absorción, el área superficial y el tamaño de partícula. La idea central de esta teoría se reduce a lograr una superficie del agregado capaz de maximizar el área superficial y obtener una superficie tal que facilite el enlace físico entre ambos materiales, lo que a su vez mejorará el enlace químico entre el asfalto y el agregado, aún en la presencia de agua [1].

1.2 Teoría de Adhesión por Reacción Química

La teoría de adhesión considera la reacción química tomando como base que los componentes ácidos y básicos que se encuentran presentes en la composición del asfalto y del agregado reaccionan dando como productos compuestos estables e insolubles resistentes al desnudamiento [2]. Algunos autores consideran la posibilidad de que dichas reacciones se den de manera selectiva, además resaltan la importancia de la quimisorción de grupos funcionales del asfalto sobre la superficie del agregado y como esto minimiza el potencial de desnudamiento de la mezcla asfalto agregado [3].

La atracción entre los componentes polares del agregado y las moléculas orgánicas del asfalto se ve promovida por la separación de carga (polaridad) que se da a través de la molécula orgánica, la cual es causada por la presencia de diversos grupos funcionales. Aunque ni el asfalto ni el agregado tengan una carga neta, si poseen una distribución no uniforme de cargas, lo que a su vez genera dipolos que atraen la carga opuesta del otro material. En la literatura se encuentran explicaciones sobre las reacciones que ocurren entre el asfalto y el agregado a nivel

molecular. Por ejemplo los compuestos nitrogenados básicos presentes en el asfalto se adhieren de manera fuerte al agregado. Por otra parte los ácidos carboxílicos presentes en el asfalto se adhieren de una forma considerable al agregado seco, sin embargo estos se desprenden fácilmente del mismo en presencia de agua. Esto último varía según el tipo de ácido [4].

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es el efecto de los cationes de sales monovalentes, e.j., las sales de sodio y potasio de los ácidos carboxílicos presentes en el asfalto. Estas al comportarse típicamente como surfactantes se pueden remover fácilmente de la superficie del agregado en la presencia de agua, este efecto se ve magnificado por la acción del tráfico [5]. En el caso de los cationes de sales divalentes de ácidos carboxílicos, e.j., el calcio proveniente de la cal, son mucho más resistentes a la acción del agua. Tomando en cuenta lo anterior se debe tener el cuidado de que los ácidos en el asfalto sean libres de cationes monovalentes [6].

1.3 Teoría de la Energía Superficial y Orientación Molecular

La energía superficial se puede entender en términos de la mojabilidad o humectabilidad relativa de la superficie del agregado por parte del agua o del asfalto. Por sus características químicas que se ven reflejadas en una menor viscosidad y tensión superficial el agua resulta un mejor agente mojante que el asfalto. El uso del concepto de energía superficial para describir la fuerza cohesiva del mastic asfáltico y el enlace adhesivo entre el agregado y el asfalto será discutido posteriormente.

Conjuntamente con la teoría de la energía superficial se puede tratar la teoría de la orientación molecular, esto debido a que ambas son parte de una teoría que toma en cuenta la estructura de las moléculas del asfalto en la interface agregado-asfalto y considera que el fenómeno de adhesión se ve facilitado por una reducción de la energía superficial en la superficie del agregado conforme el asfalto se adsorbe a la superficie [2].

1.4 Teoría de Cohesión

La resistencia del mastic al desarrollo de micro grietas está influenciada de manera importante por la dispersión del relleno mineral. Por lo tanto la fuerza cohesiva del mastic no solo está dada por el asfalto, sino por la combinación e interacción entre el asfalto y el relleno mineral. Como es de esperar, las propiedades cohesivas influyen en las propiedades del mastic más allá de la región donde las propiedades interfaciales son predominantes. Al igual que la adhesión, la cohesión se ve afectada por el efecto del agua de diversas maneras, la más importante se constituye en el debilitamiento del mastic a causa de la saturación de humedad y el hinchamiento o expansión de vacíos [7].

Diversos estudios han demostrado el severo debilitamiento que sufren las mezclas asfálticas cuando son sometidas a acondicionamientos con agua, este debilitamiento se puede prever al comparar la fuerza del enlace adhesivo entre el asfalto y el agregado en condición húmeda versus la condición seca. También se demuestra que la tasa de daño en distintas mezclas está relacionada a la difusión de agua dentro del mastic asfáltico y que los asfaltos que retienen mayores cantidades de agua acumulan daño en tasas mayores [8].

2 Naturaleza de la Interacción Asfalto-Agregado

Según la literatura disponible primeramente se consideraron los agregados ácidos como hidrofóbicos y los básicos como hidrofílicos, sin embargo debido a la gran cantidad de excepciones a dicha regla se concluyó que prácticamente ningún agregado es completamente resistente al desnudamiento provocado por la humedad [9].

Existe una lista de los factores que tienen influencia sobre el enlace asfalto agregado, los cuales son: textura de la superficie del agregado, penetración de poros y grietas con asfalto, angularidad del agregado, envejecimiento de la superficie del agregado por efectos ambientales,

recubrimientos adsorbidos a la superficie del agregado y la naturaleza del agregado seco contra el agregado húmedo [9].

La textura de la superficie del agregado afecta de una manera muy significativa su habilidad para ser revestido apropiadamente, esta condición es primordial para prevenir el desnudamiento. Además de la importancia de un buen enlace mecánico promovido por una superficie con textura apropiada, se ha determinado que la severidad del desnudamiento se ve aumentada en agregados más angulares. Lo anterior se puede explicar basándose en que la angularidad puede promover ruptura en los enlaces del mastic dando paso así a puntos por donde puede ingresar el agua. Se debe tomar en cuenta que bajo cualquier condición la fuerza de enlace entre el agregado y el agua es considerablemente mayor que la fuerza de enlace entre agregado y asfalto [8].

Un aspecto que merece atención es el efecto que tiene el proceso de molienda en las características de la superficie del agregado. La nueva superficie que se forma una vez que el agregado se ha fracturado cuenta con una cantidad importante de enlaces rotos, lo que conduce a pensar que esta cuenta con una mayor cantidad de energía libre que el agregado sin moler. Sin embargo existen estudios que demuestran que en algunas ocasiones el agregado recién molido tiende a desnudar más rápidamente que el agregado almacenado [10], esto se debe a que sobre la superficie fresca se adsorben varias capas de agua resultado de atracción electroquímica. Un proceso de oxidación reduce los radicales libres presentes en los puntos de oxidación y esto logra que el agregado que lleva algún tiempo sometido a condiciones climáticas sea más resistente al desnudamiento que el agregado recién molido [11].

Otro mecanismo de remoción de agua se da cuando las moléculas de las capas más externas de agua adsorbida sobre la superficie del agregado se ven reemplazadas o cubiertas por contaminantes orgánicos presentes en el aire, lo cual conduce a una disminución del potencial de desnudamiento [10]. El caso ideal consiste en tomar agregado recién molido y mezclarlo con el asfalto en una atmósfera libre de humedad, sin embargo en condiciones de trabajo esto es prácticamente imposible.

Otro aspecto que se debe considerar es el efecto del calentamiento del agregado. Como se mencionó anteriormente este contiene capas de agua adsorbidas sobre su superficie, las cuales son retiradas con el calentamiento, causando que la tensión interfacial entre el agregado y el asfalto disminuya dando como resultado una reducción en el potencial de desnudamiento. Un efecto secundario positivo que tiene el calentamiento del agregado es el descenso que provoca en la viscosidad del asfalto. Esto permite una mejor penetración del mismo sobre la superficie del agregado y promoviendo un enlace físico más efectivo entre ambos materiales [10].

El enlace asfalto-agregado se ve mejorado por tres procesos: el precalentamiento del agregado, el aclimatamiento del agregado y por último la remoción de recubrimientos de la superficie del agregado. Como ya se mencionó anteriormente, el proceso de calentamiento elimina las capas más externas de agua adsorbida sobre la superficie del agregado y esto mejora la condición de la tensión interfacial entre el asfalto y el agregado, conduciendo así a un mejor enlace entre el agregado y el asfalto [9]. Como resultado del proceso de aclimatamiento se tiene el reemplazo de capas de agua adsorbidas sobre la superficie del agregado por moléculas orgánicas, e.j., ácidos grasos, presentes en el aire. Esto también conduce a una mejora en el enlace asfalto agregado [12]. Es de conocimiento que una cubierta de polvo sobre la superficie del agregado desfavorece también el contacto entre el asfalto y el agregado lo que lleva a un aumento del potencial de desnudamiento y además favorece la formación de canales por donde el agua puede penetrar [13].

3 Química del Asfalto y Adhesión

La atracción de los componentes polares presentes en la superficie del agregado con las moléculas polares del asfalto se da gracias a la polaridad o separación de cargas que se da en las moléculas orgánicas del asfalto. Sin embargo ninguno de los dos materiales cuenta con una carga neta, tal como se detalló anteriormente. Estudios han demostrado que existe una variedad

importante en términos de carga superficial según el tipo de agregado y que la misma está influenciada por condiciones ambientales [14]. También se ha reportado sobre la capacidad de incorporación y transporte de agua por parte del asfalto, cómo esto varía según la composición del mismo y además como este fenómeno cambia conforme se da el proceso de oxidación del asfalto [4].

Un estudio desarrollado utilizando Espectroscopía de Adsorción UV logró determinar un orden de afinidad de varios grupos funcionales presentes en el asfalto con las superficies de agregado. Los resultados mostraron que los grupos ácidos, ácidos carboxílicos y sulfóxidos tienen la mayor adsorción, mientras que las cetonas y los grupos nitrogenados no básicos cuentan con la menor adsorción. Sin embargo, los sulfóxidos y los ácidos carboxílicos mostraron gran susceptibilidad a la desorción en presencia de agua [14].

4 Fuerza del Enlace Asfalto-Agregado

Una manera efectiva de cuantificar la fuerza del enlace de adhesión entre el agregado y el asfalto se basa en el cálculo de los componentes de la energía superficial tanto del agregado como del asfalto. Al variar las fuentes de los agregados, así como los tratamientos y modificaciones del asfalto, se pueden determinar los efectos que estas variables tienen sobre el enlace adhesivo y en la susceptibilidad al daño por humedad.

Tomando como punto de partida la ecuación de Young-Dupré, existe una relación entre la energía libre de Gibbs de adhesión, el trabajo de adhesión, el ángulo de contacto de un líquido de prueba en contacto con un sólido y los componentes de la energía superficial tanto del líquido como del sólido [15].

La energía superficial total (Y_L^{Tot}) está compuesta por dos componentes considerados como los responsables de formar el enlace adhesivo asfalto-agregado, los cuales son el componente de Lifshitz-van der Waals (Y_L^{LW}) y el componente polar; este último se divide en componente ácido (Y^+) y componente básico (Y^-). Como es de esperarse las interacciones no polares son representadas por el componente dispersivo (Y_L^{LW}) mientras que las interacciones polares, que según lo que se ha explicado en párrafos anteriores tienen un papel predominante en el enlace adhesivo, se ven representados por los componentes ácidos y básicos [14]. La ecuación de Young-Dupré toma la siguiente forma:

$$Y_L^{Tot}(1 + \cos\theta) = \left(2\sqrt{Y_L^{LW}}\right)x1 + \left(2\sqrt{Y_L^-}\right)x2 + \left(2\sqrt{Y_L^+}\right)x3 \quad (1)$$

Donde los valores Y_L^{Tot} , Y_L^{LW} , Y_L^+ y Y_L^- pueden ser conocidos mediante líquido de prueba, mientras que el valor del ángulo de contacto θ se obtiene al realizar goniometría (Figura 1a). Los componentes de la energía superficial del asfalto (usado como sólido) o bien del agregado en enumeran en la Ecuación 1 de la forma: $x1$, $x2$ y $x3$. Como se puede observar, existen tres incógnitas en la ecuación por lo tanto es necesario obtener datos de un mínimo tres líquidos de referencia distintos entre sí para así poder realizar un cálculo matricial y despejar los valores de los componentes de la energía superficial, ya sea del asfalto o bien del agregado.

Es importante resaltar que a la hora de seleccionar los líquidos de prueba se deben seguir algunas consideraciones, pues una selección del líquido de prueba, que sumado a pequeños errores experimentales, puede afectar significativamente el cálculo de los componentes de la energía superficial [16].

5 ABS (Asphalt Bond Strength, por sus siglas en ingles)

Existen tres mecanismos por los cuales la humedad degrada una mezcla asfáltica: pérdida de cohesión a través del mastic asfáltico, falla en el enlace adhesivo entre el asfalto y el agregado y

por último degradación del agregado [17]. La falla adhesiva se da cuando se crea una ruptura de enlaces entre moléculas de materiales distintos, mientras que la falla cohesiva ocurre una vez que se rompen enlaces del mismo material, asfalto en este caso.

En los últimos años se ha utilizado un ensayo conocido como ABS (Fuerza de Enlace del Asfalto) el cual resulta apropiado para investigar de manera confiable las propiedades de adhesión y cohesión de los sistemas asfalto-agregado bajo distintas condiciones de ambos materiales y determinar el efecto que causa la humedad en estos sistemas o bien el uso de aditivos. Este método es una modificación de un instrumento neumático para la medición de adhesión por tracción, conocido por sus siglas en inglés como PATTI [18] (Figura 1b).

Cuando el ensayo está en marcha una fuerza de empuje es aplicada al agregado por medio del tornillo, la falla ocurre cuando el esfuerzo aplicada logra sobrepasar la fuerza cohesiva del ligante o bien la fuerza del enlace adhesivo creado entre la superficie del agregado y el asfalto.



(a) (b)
Figura 1 Equipos para medición de adhesión: (a) goniómetro y (b) PATTI

6 Materiales Utilizados

Los materiales utilizados en el estudio se resumen en la Tabla 1. Una fuente única de asfalto fue utilizada puesto que la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE) distribuye únicamente este tipo de asfalto. El asfalto tiene un grado de desempeño PG64-22. El asfalto también fue modificado con 15% m/m de cal para evaluar el efecto en la adherencia (corresponde a un 1,0% PTM). La cal fue secada previamente en un horno a 110 °C, se determinó su tamaño mediante un analizador de tamaño de partícula por escaneo laser, con un valor promedio de 2,5 μm fue incorporada mediante corte de baja frecuencia al ligante asfáltico a una temperatura de 165 °C y mezclado por alrededor de 2 horas. El asfalto modificado presenta un grado de desempeño resultante de PG70-22.

Tabla 1 Materiales analizados en el estudio.

Factor	Niveles	Descripción
Asfalto	2	PG64-22 PG64-22 + 15% cal
Agregado	5	M687-15 (Grava de Río 1, Valle Central) M688-15 (Grava de Río 2, Caribe Central) M689-15 (Grava de Río 3, Caribe Central) M786-15 (Caliza 1, Pacífico Sur) M787-15 (Grava de Río 4, Pacífico Sur)
Envejecimiento	3	Original RTFO RTFO + PAV

Las fuentes de agregado seleccionadas corresponden a materiales comúnmente utilizados en el país en la construcción de carreteras y para diversos proyectos. Un agregado corresponde a material calizo. Los demás tipos de agregado son gravas de río de mineralogía compleja de diferentes ubicaciones geográficas de Costa Rica. No obstante, todas pueden ser clasificadas como materiales silíceos de formaciones ígneas que han sido sometidas a procesos sedimentarios. El material del Caribe Central y los materiales calizos históricamente se ha desempeñado bien con respecto a la humedad. Los materiales de la Costa Pacífica han demostrado mayor problemática en cuando a problemas de desnudamiento.

7 Resultados y Análisis

7.1 Ensayo de Fuerza de Enlace del Asfalto (ABS)

La primera parte del estudio consistió en caracterizar la fuerza de adhesión entre el asfalto y las diferentes fuentes agregado usando el ABS. Los ensayos se realizaron según la norma AASHTO TP-91 (2011). Las muestras de agregado fueron pulidas inicialmente utilizando silicio de carburo y limpiadas en un baño ultrasónico previo a la aplicación del asfalto de manera que el entramamiento mecánico entre las superficies sea minimizado (las fuerzas presentes sean únicamente de adhesión química). Posteriormente, una muestra de asfalto de $(0.40 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g})$ se coloca en tornillos metálicos de diámetro conocido (20 mm). Los tornillos con la muestra de asfalto son posteriormente presionados contra la superficie del agregado. El ensayo se realizó bajo dos condiciones de acondicionamiento: 24 horas en seco ($22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) y 24 horas de curado en agua a ($60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Las muestras condicionadas en agua se dejan aclimatarse por 2 horas previo a la falla. Se fallaron un mínimo de 2 réplicas por cada condición.

El parámetro que es directamente medido por el ABS es la resistencia a la tensión (POTS). La Figura 2 muestra los resultados para el asfalto original y modificado con cal con las 5 fuentes de agregado, bajo las 3 condiciones de envejecimiento.

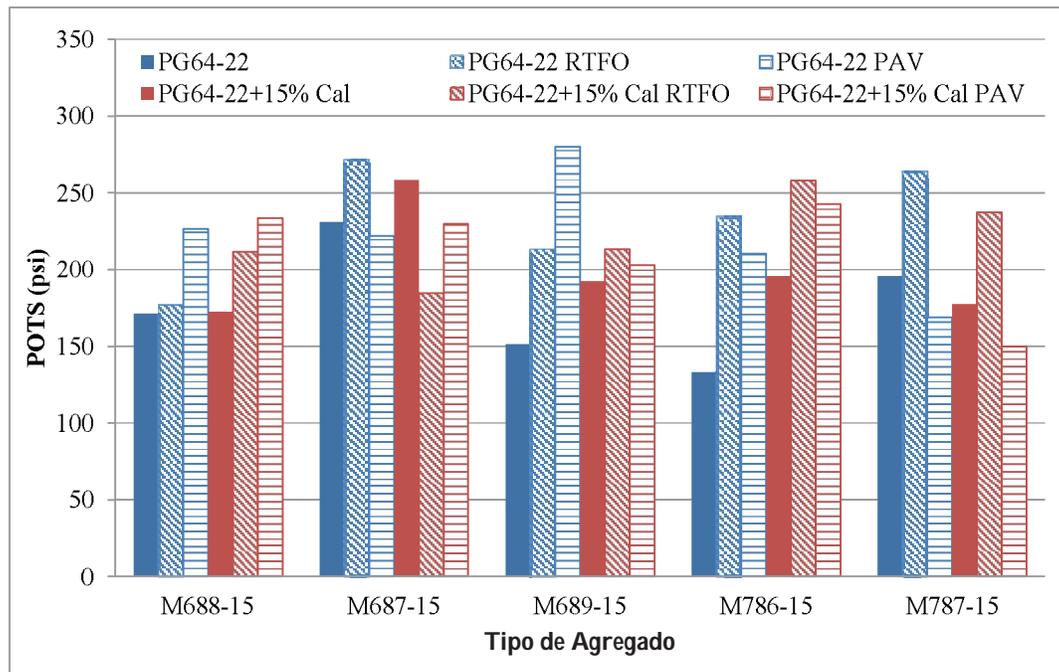


Figura 2. Resultados Fuerza de Enlace del Asfalto (ABS) en condición seca

En general, para la condición seca (sin acondicionamiento en agua), se observan mayores fuerzas de adhesión cuando se utiliza cal como aditivo mejorador de adherencia. Únicamente para los agregados M687-15 y M787-15 (gravas de río) observa una reducción en cuanto a la resistencia obtenida cuando se incluye la cal. Adicionalmente, es importante recalcar que únicamente para estos dos casos en particular se presenta una falla por adhesión. Todos los demás tratamientos experimentales fallaron por cohesión: si el área recubierta por asfalto es menor al 50 %, se considera falla por adhesión, caso contrario se considera falla por cohesión.

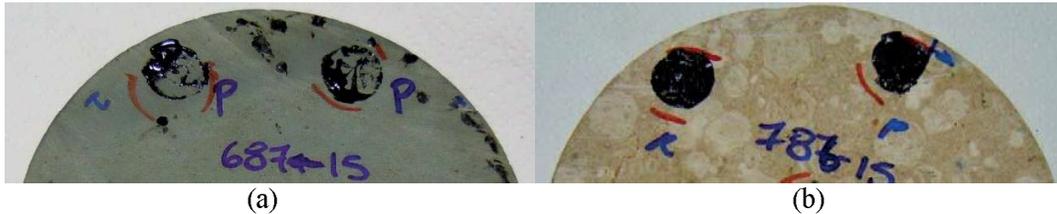


Figura 3 Fallas por (a) adhesión y (b) cohesión

Independientemente del tipo de la fuente de agregado, se observó un incremento en el POTS del 35% al envejecer el asfalto a corto plazo (RTFO) y del 32% cuando el mismo material se envejece al largo plazo (PAV). Nótese la leve reducción promedio entre los asfaltos RTFO y PAV. Esto puede asociarse a un incremento en la fragilidad del asfalto lo que promueve una falla cohesiva en el material. Estos cambios fueron de menor magnitud cuando se incorporó cal.

Para el caso condicionado (muestras colocadas en agua a 60 °C por 24 h) se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 4). Se observa que en general todas las combinaciones experimentales presentan un aumento en el POTS al adicionar la cal. Sólo para el caso del agregado M688-15 no existe cambio significativo. Nótese adicionalmente que los cambios son mayores cuando el asfalto está envejecido (RTFO, PAV).

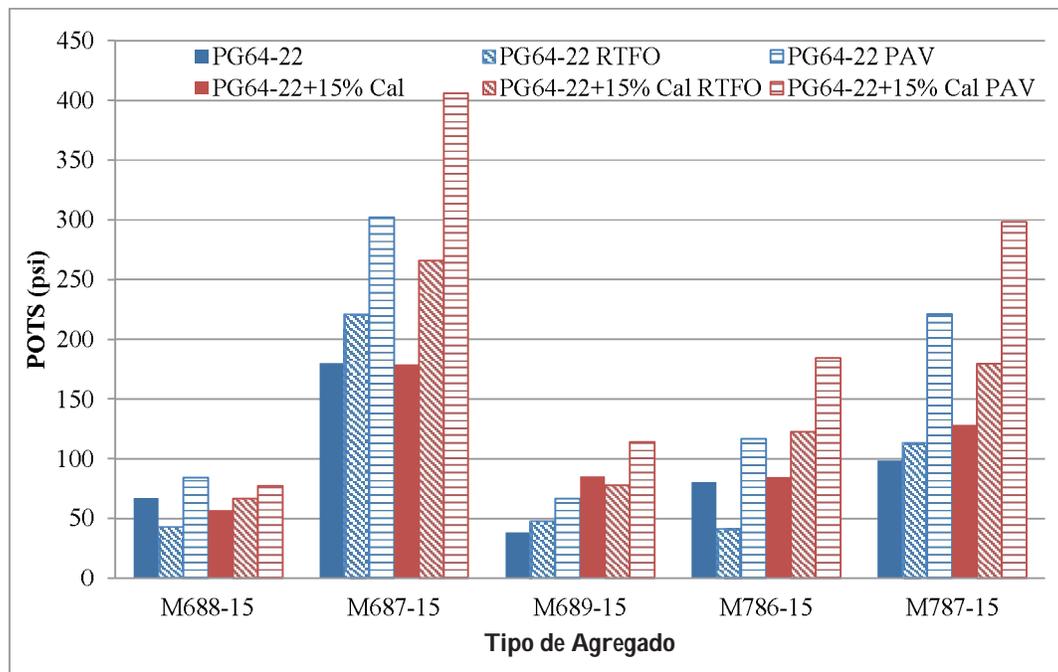


Figura 4 Resultados Fuerza de Enlace del Asfalto (ABS) en condición húmeda

Para el caso condicionado se revierte la tendencia observada en el caso seco en lo que respecta al efecto del envejecimiento. A pesar que se observó un incremento en el POTS del

68% al envejecer el asfalto original en RTFO+PAV, se observó un incremento aún mayor en la resistencia cuando se utilizó cal: se registraron resistencias promedio después del envejecimiento del 89%. Las fallas en su mayoría fueron por cohesión; únicamente las combinaciones con los agregados M688-15 y M689-15 presentaron fallas por adhesión. Nótese además que los agregados M687-15 y M787-15 que previamente presentaron fallas por adhesión, en presencia con agua y modificados con cal fallan por cohesión.

7.2 Ángulo de Contacto

Se realizaron ensayos de medición del ángulo de contacto para caracterizar la humectabilidad de la superficie del agregado por parte del asfalto. Los ensayos se realizaron con el propósito de cuantificar que tan fuerte es la interacción entre las moléculas del asfalto y el agregado, relativo a la interacción intermolecular de cada material. Las mediciones del ángulo de contacto se realizaron con un goniómetro a ($22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

El goniómetro consiste en un equipo óptico capaz de capturar el perfil de un asfalto sobre un agregado, y se basa en el principio de la gota sésil. El equipo usa una cámara de alta resolución y software de procesamiento de imágenes para capturar y analizar el ángulo de contacto. Las muestras se preparan de una manera muy similar a las del ABS pero difieren en que el asfalto es aplicado directamente a la superficie del agregado. Un mínimo de 6 réplicas de cada combinación de materiales fueron medidas para estimar el θ_c , mediante una jeringa con sistema de calentamiento y control de temperatura de colocan gotas del ligante asfáltico a una altura de 2,54 cm, el ángulo de contacto se mide dentro de los primeros 45 segundos de colocada la gota de ligante asfáltico sobre el sustrato.

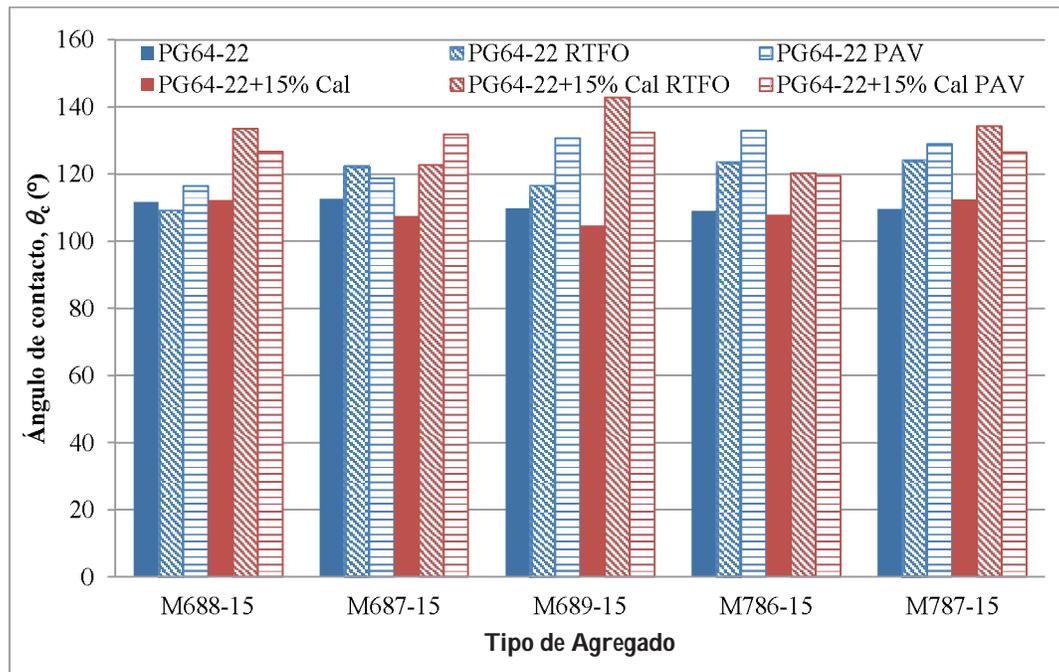


Figura 5. Ángulos de contacto para combinaciones asfalto-agregado

Los resultados de ángulo de contacto entre asfalto-agregado se muestran en la Figura 5. Es interesante notar que el ángulo de contacto entre el asfalto y cada fuente de agregado se incrementó con el envejecimiento. A pesar que esto pareciera ser inconsistente con lo medido mediante ABS, nótese que el ángulo de contacto mide únicamente la adhesión y no la cohesión interna del asfalto ó mastic asfáltico.

Lo anterior podría relacionarse más a la resistencia a la humedad: con el ABS se observa que existe una pérdida en capacidad del 29 % cuando el asfalto es condicionado en estado original, del 79 % condicionado en RTFO y 74 % en PAV. Se observa una reducción con el envejecimiento a largo plazo; esto es consistente con el incremento inicial del ángulo de contacto en el RTFO y decrecimiento con el PAV. Lo anterior reafirma el cambio en polaridad del asfalto con el envejecimiento.

Se resalta adicionalmente que las combinaciones de asfalto con agregado (ej. M689-15) que presentaron fallas por adhesión en el ABS corresponde a las combinaciones asfalto-agregado que presentan mayor θ_c . Esto se relaciona a la menor mojabilidad del agregado por parte del asfalto.

7.3 Trabajo de Adhesión

Para evaluar los componentes de la energía superficial libre (según ecuación (1)) de los agregados y el asfalto se utilizaron 4 líquidos puros de referencia (con componentes de energía superficial según teoría Ácido-Base conocidos) para medir los ángulos de contacto que se forman con el asfalto o el agregado con el goniómetro [16]. Los líquidos utilizados fueron agua des-ionizada MilliQ tipo II, etelinglicol ACS, formamida ACS y glicerina ACS. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Componentes de energía superficial libre de asfalto y agregados.

Agregado	γ^{Tot}		γ^{LW}		γ^i		γ	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
M647-15	24.5	2.6	17.4	0.2	27.5	3.7	0.5	0.4
M688-15	22.3	1.3	14.2	0.1	31.7	1.9	0.5	0.2
M689-15	22.8	1.3	11.8	0.1	35.6	1.9	0.8	0.2
M786-15	29.2	6.8	3.9	0.6	44.3	9.8	3.6	1.0
M787-15	22.4	0.0	21.6	0.0	38.7	0.0	0.0	0.0
Asfalto	γ^{Tot}		γ^{LW}		γ^i		γ	
	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.	Promedio	Desv. Est.
PG64-22	22.5	3.1	20.5	0.7	24.8	11.8	0.0	0.1
PG64-22 RTFO	22.2	3.5	19.9	0.7	25.1	12.4	0.1	0.2
PG64-22 PAV	23.4	3.7	21.2	0.9	26.6	14.7	0.0	0.1
PG64-22+15% Cal	22.9	1.1	22.3	0.5	25.8	8.7	0.0	0.0
PG64-22+15% Cal RTFO	23.5	3.9	21.2	0.9	28.0	15.1	0.0	0.1
PG64-22+15% Cal PAV	22.1	3.5	19.7	0.7	26.2	12.5	0.1	0.2

En general se observa que los agregados evaluados presentan energías superficiales bajas, donde predomina el componente dispersivo (no polar) y el polar básico. A pesar de lo anterior, no puede concluirse que los agregados (con excepción de la caliza M786-15) sean polares.

El asfalto analizado es dispersivo (no polar) también, a pesar de presentar un componente polar básico considerable en comparación con el componente no polar. Adicionalmente, a pesar que la cal es polar en naturaleza, se observó una reducción en la polaridad al adicionar cal (aumento en componente no polar). No obstante, dicha reducción se deja de percibir con el envejeciendo del asfalto. Este comportamiento ha sido reportado previamente [18].

Adicionalmente, se observa que el envejecimiento genera cambios químicos que afectan la energía superficial libre del material. Para el asfalto original se observa que conforme aumenta el envejecimiento se presenta un incremento en la energía superficial del material, debido principalmente a un incremento en el componente polar básico. Esto va asociado a un incremento en la compatibilidad con el agregado, así como con la cohesión interna del material.

Esta tendencia cambia al adicionar cal pues se evidencia en este caso que el envejecimiento reduce el componente no polar. No obstante, esto se ve compensado por un incremento en el componente polar básico, resultado en cambios poco perceptibles en la energía superficial libre total.

Con base en las energías superficiales y la teoría Ácido-Base, es posible calcular el trabajo de adhesión (W_{AB}) entre el asfalto y el agregado de la siguiente manera [19],

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

Lo anterior representa la fuerza necesaria para separar los dos materiales en el interface bajo condiciones de vacío. W_{AB} se presenta en la Figura 6.

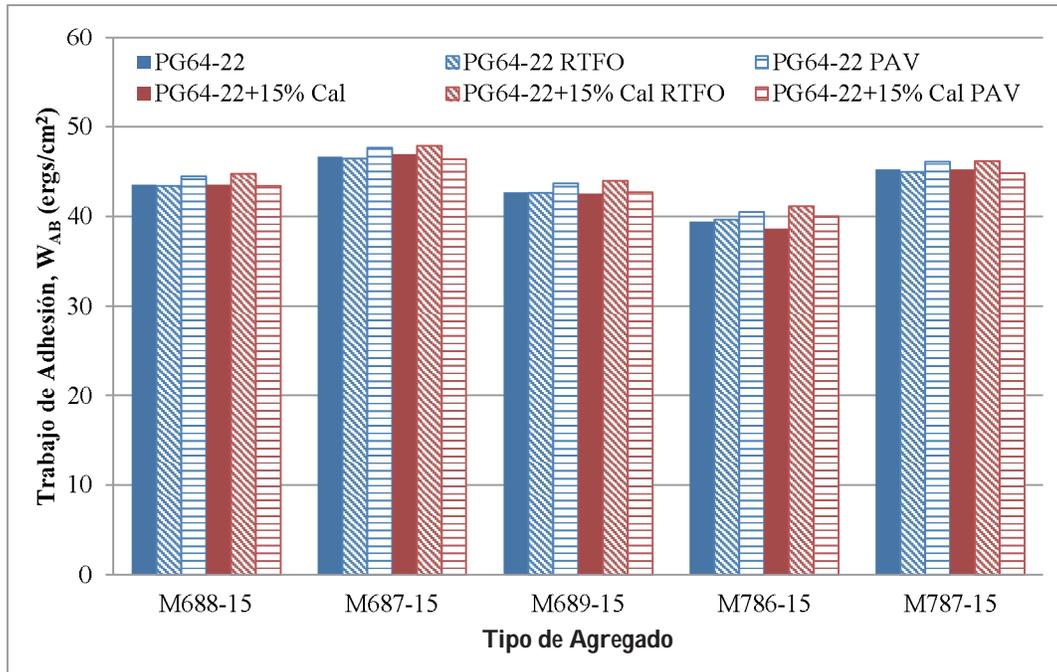


Figura 6 Trabajo de adhesión para combinaciones asfalto-agregado analizadas.

El trabajo de adhesión es consistente con lo observado en las mediciones de ángulo de contacto asfalto-agregado (Figura 5). Para el asfalto original se observó un incremento en el trabajo de adhesión conforme aumenta el envejecimiento. Esto también es consistente también con lo observado en el ABS. Consistentemente, este incremento es mayor cuando se utiliza un agregado polar como lo es el calizo (M786-15).

Cuando se incluye la cal, se presenta un incremento marcado el trabajo de adhesión en el corto plazo (RTFO), no obstante, al continuar el envejecimiento (PAV) el beneficio aportado inicialmente se reduce. Lo anterior concuerda con lo observado en el ABS realizado en condición seca. A pesar de esto, la cohesión del asfalto modificado con cal incrementa su cohesión interna ($2\gamma_L^{Tot}$) con respecto al asfalto sin modificar.

8 Conclusiones

Los ensayos realizados con el ensayo ABS permiten cuantificar diferencias entre distintas fuentes de agregado, tipos de asfalto y condiciones de humedad. Se observó adicionalmente que aun cuando la mineralogía y los procesos de formación del agregado sean similares, pueden existir diferencias considerables en la fuerza de adhesión entre el asfalto y el agregado. Esto se corroboró con las mediciones de energía superficial libre de los materiales.

Se observó en general que bajo condiciones de humedad, la adición de cal resulta en un incremento en la fuerza necesaria para generar una falla adhesiva entre el asfalto y el agregado o

cohesiva entre la estructura interna del asfalto. Bajo condiciones secas el efecto de la cal no es significativo.

El envejecimiento también genera un cambio importante en el comportamiento en la cohesión interna del asfalto, así como con la adhesión con las distintas fuentes de agregado. Se observó que al envejecerse el asfalto, se presenta un leve aumento en la energía superficial libre del material, tanto en el componente dispersivo, así como en el polar básico. Esto permite incrementar el trabajo de adhesión entre los dos materiales: se incrementa la fuerza necesaria para separar los dos materiales. En el caso del asfalto modificado con cal, se observa el efecto previo principalmente con el envejecimiento a corto plazo. Al largo plazo no se observan cambios importantes en el trabajo de adhesión. A pesar de esto, y como era de esperar, la cal aumenta la cohesión interna del asfalto, efecto que reduce la difusión de agua por el material y la generación de grietas en el mismo, retardando así el proceso de daño por humedad.

9 Referencias

- [1] Terrel, R. L. and S. Al-Swailmi. "Water Sensitivity of Asphalt–Aggregate Mixes: Test Selection. SHRP Report A-403". SHRP, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
- [2] Rice, J. M. "Relationship of Aggregate Characteristics to the Effect of Water on Bituminous Paving Mixtures". Symposium on Effect of Water on Bituminous Paving Mixtures, ASTM STP 240, 1958.
- [3] Jeon, W., Curtis, C., and Kiggundu, B. "Adsorption Behavior of Asphalt Functionalities on Dry and Moist Silica", 1988.
- [4] Robertson, R. E. "Transportation Research Circular 499: Chemical Properties of Asphalts and Their Effects on Pavement Performance." TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1988.
- [5] Plancher, H., S. Dorrence, and J. C. Petersen. "Identification of Chemical Types in Asphalts Strongly Absorbed at the Asphalt–Aggregate Interface and Their Relative Displacement by Water". Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977.
- [6] Scott, J. A. N. "Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance". Proc., Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 47, 1978.
- [7] Kim, Y. R., Lee, H. and Little, D. "Fatigue Characterization of Asphalt Concrete Using Viscoelasticity and Continuum Damage Mechanics". Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, 1997.
- [8] Cheng, D., Little, D., Lytton, R. and Holste, J. "Surface Energy Measurement of Asphalt and Its Application to Predicting Fatigue and Healing in Asphalt Mixtures". Journal of the Transportation Research Board, No. 1810, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002.
- [9] Tarrer, A. R., and Wagh, V. "The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding". SHRP, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
- [10] Thelen, E. "Surface Energy and Adhesion Properties in Asphalt–Aggregate Systems". Bulletin 192, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1958.
- [11] Branthacer, J and Robertson, R. "Interaction of Asphalt Films with Aggregate Surfaces in the Presence of Water". Road Materials and Pavement Design, 2002.
- [12] Fromm, H. J. "The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces". Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43, 1974.
- [13] Castan, M. "Rising of Binder to the Surface of an Open-Graded Bituminous Mix". Bulletin de liaison des laboratoires routiers, No. 33, 1968.
- [14] Curtis, C. W., Lytton, R. and Brannan, J. "Influence of Aggregate Chemistry on the Adsorption and Desorption of Asphalt". TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1992.
- [15] Van Oss, C.J, Chaudrhury, M.K and Good, R.J. "Interfacial Lifshitz- Van der Waals and polar interactions in macroscopic systems". Chem. Rev. Washington, D.C., 1998.
- [16] Hefer, A; Bhasin, A; Little, D. "Bitumen Surface Energy Characterization Using a contact angle approach". Journal of materials in civil engineering. 2006.
- [17] Jakarni, F. "Adhesion of Asphalt Mixtures". Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. 2002
- [18] Aguiar, J., Baldi, A., Leiva, F., Loria, L. and Salazar, J. "Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures Using Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests". Transportation Research Board 94th Annual Meeting, 2015.
- [19] Little, D., Bhasin, A. "Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavements". Web-only Document 104. NCHRP Project 9-37.