

IAG65-01-2013
EVALUACIÓN DE ADHESIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN COSTA RICA MEDIANTE ENSAYOS BBS Y DE ÁNGULO DE CONTACTO UTILIZANDO MATERIAIS DE RESÍDUOS COMO MODIFICADORES DE ASFALTO NA COSTA RICA

José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Jorge Salazar Delgado
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jorge.salazardelgado@ucr.ac.cr

Rafael Ernesto Villegas Villegas
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

Elie Y. Hajj, Ph.D.
University of Nevada
Reno, USA
elieh@unr.edu

Alejandro Navas Carro, M.Sc.
LanammeUCR, Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandro.navas@ucr.ac.cr

Resumen

Dada la ubicación geográfica de Costa Rica, el país se ve sometido a muy altos niveles de precipitación. Por tanto, es de esperar que el daño por humedad sea el modo de falla más común en el país. Sin embargo, a pesar de lo anterior, poca investigación se ha realizado para cuantificar la afinidad del asfalto a los agregados que se usan nacionalmente.

El estudio consiste en un esfuerzo para caracterizar la fuerza de ligue entre el asfalto usado localmente y distintos agregados obtenidos de distintas fuentes del país (1 caliza y 4 gravas de río de distintas ubicaciones). Adicionalmente, el asfalto se modificó con un SBR comercial de uso común en el país pues se supone promueve la adhesión. Para evaluar la fuerza de ligue del asfalto con los agregados de distintas fuentes se usó el Ensayo de Adherencia del Bitumen (BBS). Los

resultados se verificaron adicionalmente mediante goniometría que permite medir el ángulo de contacto entre el asfalto y la superficie del agregado, lo que corresponde con una medida de humectabilidad. Finalmente, un subconjunto de las combinaciones de asfalto – agregado fueron utilizadas en la preparación de mezcla asfáltica y se evaluaron mediante la Rueda de Hamburgo. Los resultados del BBS muestran diferencias en la fuerza de ligue debido al efecto de la humedad, cuando se varía la fuente de agregado. Además, dependiendo del tipo de agregado, distintos tipos de falla se observan: cohesiva versus adhesiva. Un decrecimiento en la fuerza de ligue se observó cuando se incorporó SBR. Sin embargo, cuando se utiliza el modificante, el efecto de la humedad disminuyó. Los resultados del BBS son consistentes con las mediciones de ángulo de contacto y con los resultados de la Rueda de Hamburgo, indicando que el ensayo se puede implementar como herramienta de aceptación.

Resumo

Dada a localização geográfica da Costa Rica, o país está sujeito a níveis muito elevados de precipitação. Por isto, espera-se que o dano por umidade seja o modo mais comum de falha no país. No entanto, apesar disso, pouca investigação há sido feita para quantificar a afinidade do asfalto com os agregados usados no país.

Este trabalho é um esforço para caracterizar a força de adesividade entre o asfalto usado localmente e diferentes agregados obtidos de diferentes fontes do país (um calcário e quatro agregados de rios de locais diferentes). Além disso, o asfalto foi modificado com um SBR comercial comumente usado no país, uma vez que é assumido promove a adesão. Para avaliar a força do ligante asfáltico com os agregados de fontes diferentes uso-se o ensaio de Capacidade Ligante do Asfalto (BBS). Os resultados foram ainda verificados por goniometria a qual permite medir o ângulo de contacto entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, o que corresponde a uma medida de humectabilidade. Finalmente, um subconjunto das combinações de asfalto-agregado foram utilizadas na preparação de misturas asfálticas e avaliadas no ensaio Hamburg wheel tracking.

Os resultados del ensaio BBS mostraram diferenças na força de união devido ao efeito da umidade, quando há uma variação da fonte de agregado. Também, dependendo do tipo de agregado, foram observados vários tipos de falhas: coesivo versus adesivo. Observou-se uma diminuição da força de adesividade quando o SBR foi adicionado. No entanto, quando o modificador é usado, o efeito da umidade também foi menor. Os resultados do ensaio BBS foram consistentes com as medições do ângulo de contacto e com os resultados do ensaio Hamburg wheel tracking, indicando que a prova pode ser implementada como uma ferramenta para a recepção.

INTRODUCCIÓN

El daño por humedad es considerado como la principal causa de deterioro a la que se ven sometidos los pavimentos en Costa Rica. El daño por humedad, resultado de una reducción en la adhesión del asfalto y la superficie del agregado, o por falla cohesiva en la estructura interna del mastic asfáltico, depende de varias variables que incluyen: tipo de mezcla asfáltica, propiedades del asfalto y el agregado, características del tráfico y el ambiente, técnicas constructivas y el uso de aditivos (Tarrer y Wagh, 1991). Sin embargo, la presencia de humedad en los poros del agregado y en el interfaz entre el asfalto y el agregado es el factor principal en los problemas relacionados al "stripping" o desnudamiento.

Para asegurar una adecuada resistencia al daño por humedad, las especificaciones nacionales requieren que la resistencia a la tensión diametral retenida (AASHTO T283) sea superior a 85% para todas las mezclas asfálticas (MOPT,2010; AASHTO, 2011a). Sin embargo, aunque casi todas las mezclas utilizadas a nivel nacional cumplen este requisito con facilidad, el deterioro por humedad puede ser observado hasta pocos meses después de construido un tramo de carretera. Por tanto, en algunos proyectos se requiere del uso de aditivos antidesnudantes o cal para. Adicionalmente, la implementación de otros ensayos como la Rueda de Hamburgo (HWTd por sus siglas en inglés) están siendo evaluados como alternativa o complemento al ensayo AASHTO T283.

Consecuentemente, la necesidad de entender a fondo las características de adhesión entre las fuentes de agregado típicas y el asfalto que se distribuye a nivel nacional es muy real. Para este propósito, se ha iniciado un estudio en el LanammeUCR para caracterizar el posible daño por humedad en mezclas asfálticas con materiales nacionales. El estudio incluye un asfalto PG64-22 mezclado con agregados de 5 distintas fuentes: 1 agregado calizo del centro del país y 4 gravas de río de distintas ubicaciones. El estudio se enfocó en la medición de propiedades de cohesión y adhesión del asfalto con las distintas fuentes de agregado mediante el Ensayo de Adherencia del Bitumen (BBS por sus siglas en inglés), el ángulo de contacto entre el asfalto y el agregado utilizando el goniómetro y el HWTd.

MARCO TEÓRICO

El daño por humedad puede ocurrir en el interfaz entre el mastic (mezcla de asfalto y relleno mineral) y la superficie del agregado (falla por adhesión) o dentro de la estructura del mastic (falla por cohesión). El tipo de falla que puede ocurrir depende de las propiedades del mastic. Sin embargo, hay otros factores que también producen un efecto en la susceptibilidad a la humedad como lo son la adición de aditivos modificantes del asfalto, agente antidesnudantes, o cal hidratada (Howson et al., 2007). También se ha reportado que un incremento en el pH del agua en el interfaz asfalto-agregado genera un efecto importante en la reducción del enlace de adhesión entre los dos materiales (Scott, 1982).

Una revisión literaria por Tarre y Wagh (1991) mostró que existen al menos 5 mecanismos de falla asociados al daño por humedad y desnudamiento, los cuales pueden ocurrir individual o simultáneamente: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poro y socavación hidráulica. El desprendimiento ocurre cuando una capa delgada de agua desplaza completamente la película de asfalto de la superficie del agregado. Esto es el resultado de menor energía superficial del agua en comparación con el asfalto, lo que resulta en mayor humectabilidad del agregado (Majidzadra, 1968).

El desplazamiento se diferencia del desprendimiento en que el agua penetra la superficie del agregado por una fractura en la película de asfalto generada por mal recubrimiento del mismo (Scott, 1982; Fromm, 1974). La emulsificación espontánea resulta cuando el agua y el asfalto se combinan para formar una emulsión, fenómeno que se puede amplificar con la presencia de emulsificantes como arcillas minerales y aditivos para el asfalto (Scott, 1982; Fromm, 1974). La presión de poso también puede generar daño por humedad en mezclas asfálticas con altos contenidos de vacíos, lo que típicamente ocurre en mezclas de graduación abierta donde el agua puede circular por poros interconectados. El problema se empeora cuando el agua está atrapada en poros impermeables (AI, 1981). Socavación hidráulica ocurre en la superficie del pavimento y es el resultado del efecto de las llantas sobre superficies húmedas las cuales generan altas presiones en frente de la llanta y succión detrás de la misma (AI, 1981).

En la literatura se pueden encontrar varios métodos para caracterizar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. La mayoría de los ensayos son empíricos puesto que buscan caracterizar la resistencia de la mezcla al daño por humedad, sin necesariamente diferenciar entre los distintos mecanismos de daño. Ejemplos de ensayos para evaluar la susceptibilidad de una mezcla a la humedad son: ensayo de ebullición (ASTM D3625), ensayo de ebullición de Texas (Tex-530-C), ensayo de inmersión estático (AASHTO T182), ensayo Lottman, ensayo Lottman modificado (AASHTO T283), ensayo de acondicionamiento de Tunnicliff y Root (1984), ensayo de inmersión-compresión (AASHTO T165), ensayo de congelamiento de Texas, ensayo con la Rueda de Hamburgo ó HWTD (AASHTO T 324) y los ensayos de desempeño de Superpave (creep estático, deformación permanente a carga repetida y módulo dinámico) con una sistema de acondicionamiento ambiental.

Adicional a los ensayos anteriores, existen enfoques de termodinámica para cuantificar la afinidad del agregado al asfalto. Este tipo de análisis evalúa los micromecanismos asociados a la falla por adhesión o cohesión y requieren de la medición de la energía superficial libre del asfalto y el agregado. La energía superficial libre corresponde al incremento de energía (trabajo) requerido para crear una unidad de área superficial de cualquier tipo de material. La energía superficial libre puede ser clasificada con base en la fuente de las fuerzas intermoleculares que la generan en: γ^+ (monopolar ácido), γ^- (monopolar básico) y γ_{LW} (apolar ó Lifshitz-van der Waals) (Solaimanian et al., 2007; Hunter y Ksaibati, 2001; Hansen, 2004). La energía libre superficial total es una combinación de estos componentes y puede ser utilizada para calcular el trabajo de adhesión si los componentes individuales se conocen para el asfalto y el agregado. Este tipo de análisis generalmente involucra el uso de un Equipo de Absorción-Adsorción Universal (USD por sus siglas en inglés) para medir la energía superficial libre del agregado y un Plato de Wilhelmy para medir la del asfalto. Esta es una limitación del método pues equipos como el USD son muy especializados y normalmente no se pueden conseguir de un distribuidor comercial de equipos.

Sin embargo, recientemente una modificación al instrumento neumático para la medición de adhesión por tracción (PATTI por sus siglas en inglés) fue propuesto por investigadores de la Universidad de Wisconsin–Madison: Ensayo de Adherencia del Bitumen (BBS) (Moraes et al., 2011). Este tipo de análisis es muy útil en identificar si la falla a ocurrir se debe a la adhesión entre el agregado y el asfalto, o por la resistencia cohesiva del asfalto y el mastic (Howson et al., 2007). Adicionalmente, el ensayo ha sido reportado como reproducible y capaz de capturar diferencias asociadas al uso de aditivos o exposición a la humedad.

OBJETIVO

Los objetivos principales del estudio son: 1) investigar la afinidad de las distintas fuentes de agregado al asfalto usado en Costa Rica y 2) caracterizar el efecto del uso de aditivos en la susceptibilidad al daño por humedad. El ensayo BBS fue utilizado para evaluar la adhesión del asfalto-agregado y la cohesión interna del asfalto. Mediciones del ángulo de contacto también se realizaron en las combinaciones de asfalto-agregado mediante el goniómetro. Adicionalmente, el ensayo del HWTD se realizó en un conjunto reducido de combinaciones de mezcla asfáltica, considerando variables adicionales como variación en la temperatura e incorporación de cal o aditivo antidesnudente líquido. Los resultados se utilizaron para cuantificar la fuerza de adhesión entre el asfalto y las distintas fuentes de agregado.

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 un aditivo Estireno-Butadieno-Caucho (SBR). El asfalto modificado con SBR ha sido utilizado en proyectos reciente como un mejorador de adherencia. El SBR fue introducido mediante cortante de baja frecuencia a una temperatura de 150 °C. El asfalto modificado presenta un grado de desempeño resultante de PG70-22.

Las fuentes de agregado seleccionadas corresponden a las de mayor uso en el país. 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 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.

La resistencia al daño por humedad de las mezclas seleccionadas fue evaluado mediante el HWTD usando cal hidratada y aditivo antidesnudante UP, siguiendo las recomendaciones del vendedor. El aditivo se introdujo al agregado antes de mezclar a una concentración de 1,0% por peso de agregado. Solo los agregados identificados como Grava Río 1 y 2, así como el asfalto original (PG64-22) fueron utilizados. Las mezclas se diseñaron siguiendo la metodología Superpave con Nd = 100 giros. Las graduaciones seleccionadas corresponden a graduaciones típicas de planta. El tamaño máximo nominal (NMAS) fue de 12,5 mm. El contenido de asfalto de diseño fue 6,2% y 6,1% para las mezclas con agregados Grava Río 1 y Grava Río 2, respectivamente.

Tabla 1: Resumen de Materiales Utilizados

Factor	Niveles	Descripción
Asfalto	2	PG64-22
		PG64-22 + 2.5% SBR (PG70-22)
Fuente Agregado	5	Caliza – Valle Central
		Grava Río 1 –Caribe Central
		Grava Río 2 – Pacífico Central
		Grava Río 3 –Pacífico Sur
		Grava Río 4 – Pacífico Sur
Agente Antidesnudante (*)	2	Cal (1,5% por peso agregado)
		Anti-Strip Líquido (1,0% por peso agregado)

(*) Utilizados únicamente para evaluación de desempeño mediante ensayo HWTD

DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE ENSAYO

La primera parte del estudio consistió en caracterizar la fuerza de adhesión entre el asfalto y las diferentes fuentes agregado usando el BBS. Los ensayos se realizaron según la norma AASHTO TP-91 (2011). El ensayo del BBS se realizó utilizando el equipo PATTI (ASTM, 2011) que es típicamente utilizado por la industria de pintura y sellado (Figura 1). Las muestras de agregado son pulidas inicialmente utilizando un silicio de carburo y limpiadas en un baño ultrasónico previo a la aplicación del asfalto de manera que no exista entrapamiento mecánico entre las superficies. Posteriormente, una muestra de asfalto de (0.4g ± 0.05g) 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.

Figura 1: Equipo PATTI

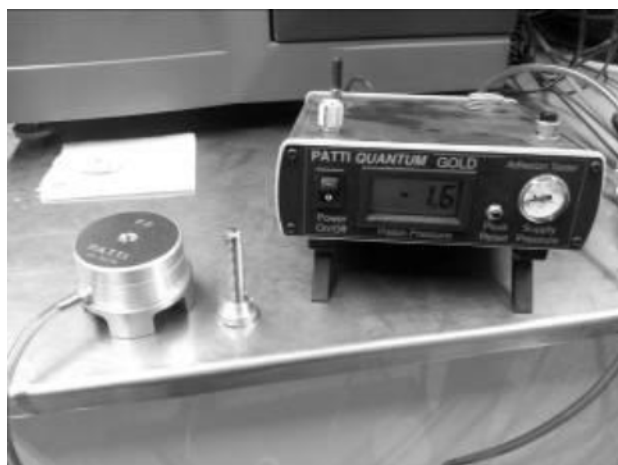


Figura 2: Goniómetro

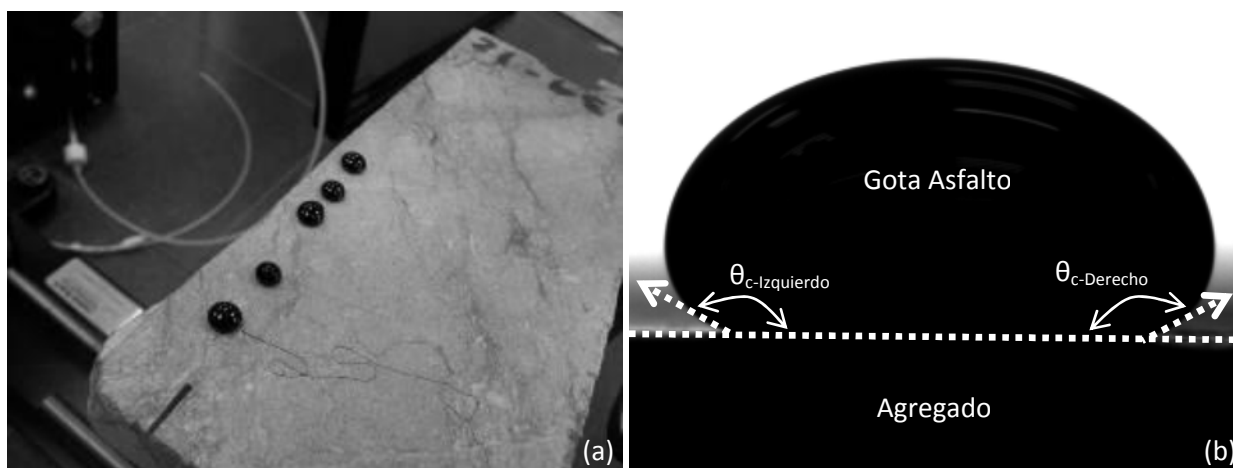


El ensayo de resistencia a la tensión (POTS) bajo dos condiciones de acondicionamiento (24 y 96 horas) se determina mediante el ensayo BBS. 4 réplicas fueron realizadas para cada combinación de material.

Adicionalmente, 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 25 °C. El goniómetro utilizado para este estudio se muestra en la Figura 2.

El goniómetro consiste en un equipo óptico capaz de capturar el perfil de un líquido (asfalto) sobre un sustrato sólido (agregado), y se basa en el principio de la gota sésil (Kwok et al., 1997). El ángulo de contacto (θ_c) es el que se forma entre el interfaz líquido/sólido y líquido/gas. 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 BBS pero difieren en que el asfalto es aplicado directamente a la superficie del agregado (Figure 3). Cuatro réplicas de cada combinación de materiales fueron medidas para estimar el θ_c .

Figura 3: (a) Muestras para medición de θ_c y (b) imágenes de θ_c medidas



Por último, se realizaron ensayos de HWTB en las muestras de mezcla asfáltica. HWTB se realizó a 2 temperaturas de ensayo: 40 °C y 50 °C. Los ensayos se realizaron siguiendo la norma AASHTO T-324, para un total de 20,000 repeticiones de la rueda cargada (AASHTO, 2011). 6 réplicas de cada mezcla asfáltica se prepararon para cada condición de análisis (un total de 72 especímenes: 2 fuentes de agregado x 2 tipos de asfalto x 3 condiciones de aditivo antidesnudente x 6 repeticiones). Todas las muestras fueron compactadas en el compactador giratorio Superpave a un contenido de vacíos de $7,0\% \pm 1,0\%$.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Ensayo de Adherencia del Bitumen (BBS)

El parámetro que es directamente medido por el BBS es la resistencia a la tensión (POTS). La Figura 4 muestra los resultados para los asfaltos originales y los asfaltos modificados con SBR, bajo dos distintos escenarios de acondicionamiento (las barras de error representan una desviación estándar). Los resultados indican que para la condición seca, la combinación de asfalto sin modificante y agregado calizo requirieron de la menor fuerza para producir la falla. Nótese también que la desviación estándar para esta fuente de agregado fue mayor que para los demás agregados. Esto se puede atribuir a la falla de la roca: durante el ensayo, parte del agregado fue arrancado. Sin embargo, cuando se utilizó el SBR, el efecto de las distintas fuentes de agregado se redujo. Específicamente para la condición seca, todas las combinaciones de agregado y asfalto modificado con SBR mostraron resistencias similares. Además, se observó que el valor de POTS para el asfalto original fue consistentemente más alto que para el asfalto modificado. Esto no se esperaba, pero se considera puede estar asociado con la rigidez del asfalto para cada condición dado que el asfalto original puede envejecerse un poco durante el proceso de modificación. Adicionalmente, se considera que las partículas de SBR dentro de la matriz asfáltica pueden resultar en áreas donde la fuerza de adhesión puede ser ligeramente menor debido a la alta rigidez del estireno, y menor adhesividad del mismo.

Figura 4: Resistencia a la Tensión, POTS

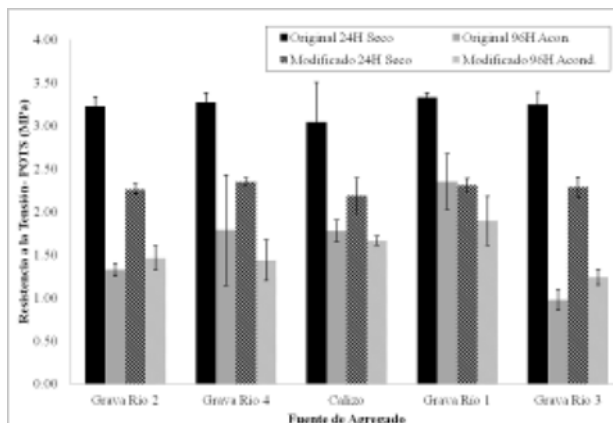


Tabla 2: Estadísticos Análisis de Regresión

Parámetro	Valor	t	p
Intercepto	2,179	82,67	< 0,001
Calizo	-0,003	-0,06	0,950
Grava Río 1	0,300	5,72	< 0,001
Grava Río 2	-0,102	-1,94	0,057
Grava Río 3	-0,235	-4,48	< 0,001
Seco	0,580	22,10	< 0,001
Calizo*Seco	-0,133	-2,53	0,014
Grava Río 1*Seco	0,231	-4,40	< 0,001
Grava Río 2*Seco	0,094	1,80	0,077
Grava Río 3*Seco	0,245	4,76	< 0,001
PG64-22	0,261	9,96	< 0,001
Calizo*PG64-22	-0,021	-0,39	0,695
Grava Río 1*PG64-22	0,107	2,04	0,046
Grava Río 2*PG64-22	-0,055	-1,04	0,300
Grava Río 3*PG64-22	-0,089	-1,70	0,095
Seco*PG64-22	0,210	8,01	< 0,001
R ² Ajustado			0,902

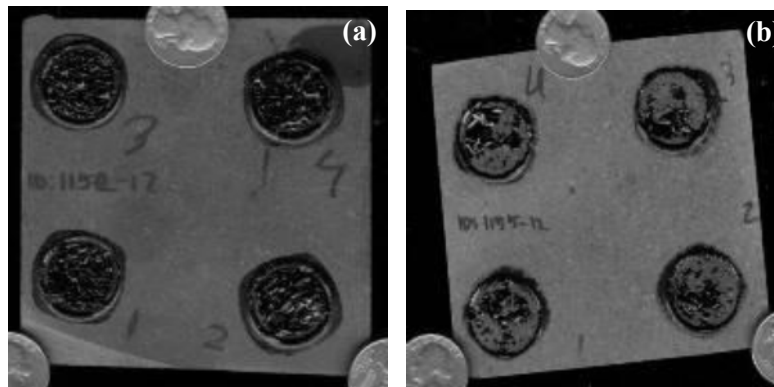
Para poder comprender el efecto de los distintos factores y sus interacciones en el POTS, se realizó un análisis de regresión. Los resultados se muestran en la Tabla 2. Los datos indican que

la mayoría de las variables independientes (fuente de agregado, asfalto y acondicionamiento) tienen un efecto significativo en POTS a cualquier nivel de confianza ($p < 0,001$). Además, la significancia conjunta de los parámetros independientes y sus interacciones son altas ($p < 0,001$). Esto significa que a pesar que algunos factores individuales parecen no ser estadísticamente significativos a un nivel de confianza dado (ej. 90%), la significancia global de los parámetros con otros parámetros del modelo es alta. Tal es el caso del agregado de fuente caliza que por sí solo pareciera ser estadísticamente equivalente a la Grava de Río 4. Sin embargo, cuando se evalúa en conjunto con otros parámetros como el grado de acondicionamiento, resulta ser significativa y no debería eliminarse del modelo.

Es importante notar que el análisis confirma la superioridad de la Grava de Río 1. Por otro lado, la Grava de Río 3 muestra el peor desempeño en POTS. Los análisis indican que en promedio, ejecutar el ensayo en condiciones secas resulta en valores de POTS de 580 kPa por encima de los ensayos realizados en condiciones saturadas. De la misma forma, se puede cuantificar que el modificar el asfalto con SBR redujo el valor de POTS en aproximadamente 260 kPa.

También es importante resaltar el tipo de falla que se presenta durante el ensayo BBS. En general, bajo condiciones secas, se observó falla cohesiva para todos los casos. Esto también fue la tendencia para los ensayos realizados en condición saturada, con la excepción de las Gravas de Río 2 y 3, las cuales mostraron falla por adhesión entre el asfalto y la superficie del agregado. La Figura 5 muestra ejemplos de los tipos de falla que se presentaron (si más del 50% del área del agregado está expuesta se considera falla por adhesión; de lo contrario se considera que la falla se debe a cohesión del asfalto).

Figura 5: (a) Falla por cohesión (Grava Río 1) y (b) falla por adhesión (Grava Río 3)



Ángulo de Contacto

Las mediciones del ángulo de contacto se realizaron para medir la humectabilidad del asfalto sobre diferentes fuentes de agregado, y para ver cómo correlaciona dicho valor con los resultados de BBS. El ángulo de contacto fue medido sobre una gota de asfalto colocada sobre la superficie del agregado, 1 minuto después de su colocación, a temperatura ambiente. Cada gota fue medida 10 veces en intervalos de 1 s. 4 gotas fueron medidas sobre cada superficie de agregado. Los resultados se muestran en la Figura 6. Es interesante notar que el ángulo de contacto entre el asfalto y cada fuente de agregado se incrementó cuando se utilizó asfalto modificado (Gravas de Río 2 y 4). Esto es consistente con la reducción en POTS que también fue observada, lo que indica que la modificación con SBR reduce la humectabilidad del asfalto a la superficie del agregado. Los materiales restantes mostraron una reducción en el ángulo de contacto cuando se

modificó el asfalto. Esto corresponde a una mejora en la humectabilidad y por tanto en la resistencia a la humedad.

Figura 6: Resultados de θ_c

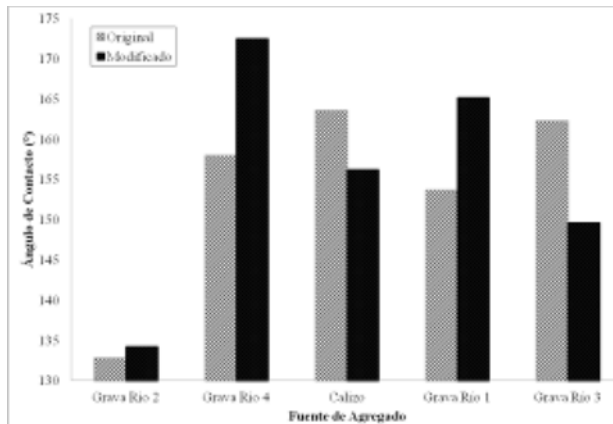
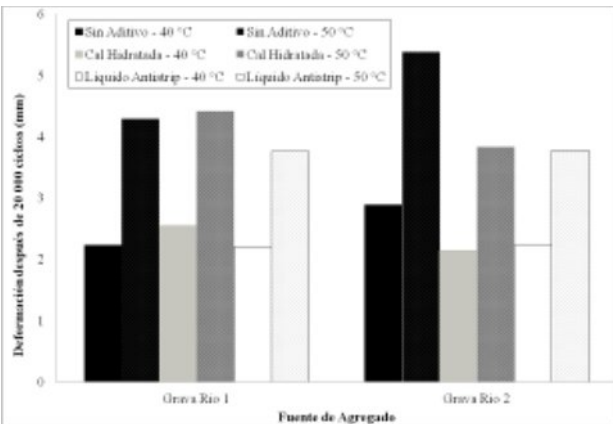


Figura 7: Resultados del HWTB



Es importante notar que el uso del goniómetro como instrumento de medición del ángulo de contacto entre el asfalto y el agregado es nuevo. Por tanto, aún no existe especificación para estandarizar las condiciones en que la gota de asfalto es colocada en la superficie del agregado. En este estudio, el asfalto se calentó a 150 °C y se colocó sobre una superficie de agregado a temperatura ambiente, lo que resulta en un diferencial térmico considerable entre ambos sustratos. Para evaluar este efecto, se repitió el análisis a varias temperaturas, lo que resultó en cambios en el ángulo de contacto. No obstante, las tendencias se mantuvieron (efecto del agregado y el asfalto) y por tanto lo importante es el orden de los factores y no necesariamente la magnitud de los mismos.

Rueda de Hamburgo (HWTB)

Para correlacionar el POTS con una medida estandarizada de desempeño, se realizaron ensayos del HWTB en el asfalto original y dos fuentes de agregado: Gravas Río 1 y 2. Estas fueron seleccionadas pues los resultados de adhesión mostrados fueron distintos entre sí (falla adhesiva vs falla cohesiva). Adicionalmente, para evaluar los requisitos nacionales se utilizaron agentes antidesnudantes (cal hidratada y antistrip líquido). Los resultados se muestran en la Figura 7.

Los datos indican que cuando no se usa un aditivo antidesnudante, las diferencias en desempeño entre ambas fuentes de agregado son más marcadas y consistentes con lo observado mediante el BBS o las mediciones de ángulo de contacto. Sin embargo, las deformaciones en general fueron bajas y cumplieron con el requisito máximo de 12,5 mm. La deformación permanente decreció cuando se utilizó cal hidratada o antistrip líquido. De la misma forma, las diferencias en las deformaciones decrecieron y ambas mezclas se comportaron de forma similar. Finalmente, ninguna de las muestras alcanzaron la fase terciaria de deterioro acelerado por humedad.

CONCLUSIONES

Los ensayos preliminares realizados con el ensayo BBS confirman que el mismo es capaz de diferenciar entre distintas fuentes de agregado, tipos de asfalto y condiciones de humedad. Se observó adicionalmente que aún 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. Adicionalmente, los ensayos del BBS correlacionaron adecuadamente con el ensayo de HWTB en la mezcla asfáltica.

En general se observó que la modificación con SBR resultó en una reducción de la fuerza necesaria para separar el asfalto de la superficie del agregado. La causa de la reducción en la fuerza de adhesión se puede deber a dos factores: 1) rigidización de asfalto durante el proceso de modificación y 2) propiedades intrínsecas del SBR. El estireno es muy rígido y el caucho no es un material adhesivo, pero en general el SBR tiene alta resistencia al rompimiento y a la humedad. No obstante, a pesar de la reducción observada, el efecto de la humedad en la fuerza de adhesión se redujo cuando se utilizó el aditivo. Esta tendencia también se confirmó con las mediciones de ángulo de contacto entre el asfalto (original y modificado) y las distintas fuentes de agregado.

Finalmente, aunque existen diferencias significativas entre la fuerza de adhesión del asfalto y las distintas fuentes de agregado, en general la adhesión entre los dos materiales se considera adecuada según requisitos establecidos en la literatura: la tasa entre el $POTS_{seco}$ y $POTS_{húmedo}$ debe ser menor a 0,70 (Alavi et al., 2012). Por esta razón, se está ampliando el estudio para contemplar rangos de POTS más amplios y poder establecer un valor límite para las condiciones nacionales.

REFERENCIAS

- AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage." Designación AASHTO: T283-07. Washington, D.C., 31st edition, 2011a.
- AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. "Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)." Designación AASHTO: T324-11. AASHTO, Washington, D.C., 31st edition, 2011b.
- AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. "Standard Method of Test for Determining Asphalt Binder Bond Strength by Means of the Asphalt Bond Strength (ABS) Test." Designación AASHTO: TP91-11. AASHTO, Washington, D.C., 31st edition, 2011.
- AI. Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements, Educational Series No. 10, Asphalt Institute, College Park, MD, 1981.
- Alavi, M. Z., Hajj, E. Y., Hanz, A., Bahia, H. U. Evaluating Adhesion Properties and Moisture Damage Susceptibility of Warm Mix Asphalts Using Bitumen Bond Strength (BBS) and Dynamic Modulus Ratio (ESR) Tests. Transportation Research Board Annual Meeting 2012 Paper #12-4331. Washington, D.C., 2012.
- ASTM International Standards. "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers," Designación ASTM: D4541-09E01. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- Fromm, H.J. The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43, 1974, pp. 191-223.
- Hansen, F. K. The Measurement of surface energy of polymer by means of contact angles of liquids on solid surfaces. A short overview of frequently used methods. University of Oslo, Oslo, 2004.
- Howson, J., Masad, E. A., Bhasin, A., Castelo, V., Arambula, E., Lytton, R., Little, D. System for the Evaluation of Moisture Damage Using Fundamental Material Properties. Reporte FHWA/TX-07/0-4524-1. Texas, 2007.
- Hunter, E. R., Ksaibati, K. Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes. Reporte MPC02-138. Wyoming, 2001.

- Kanitpong, K., H. U. Bahia. Roles of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72, 2003.
- Kwok, D. Y. , Gietzelt, T., Grundke, K., Jacobasch, H. J., Neumann, A. W. Contact Angle Measurements and Contact Angle Interpretation. 1. Contact Angle Measurements by Axisymmetric Drop Shape Analysis and a Goniometer Sessile Drop Technique. *ACS Langmuir*, Vol. 13 (10), 1997, pp. 2880–2894.
- Majidzadra, K., Brovold, F.N. State of the Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures. Highway Research Board Special Rept. 98. Washington, D.C., 1968.
- MOPT Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes. “División 400. Pavimentos Asfálticos y Tratamientos Superficiales.” Designación MOPT: CR-2010. San José, Costa Rica, 2010.
- Moraes, R., Velasquez, R., Bahia, H. U. Measuring the Effect of Moisture on Asphalt–Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength Test. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No. 2209, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
- Scott, J. A. N. Adhesion and Disbonding Mechanisms of Asphalt Used in Highway Construction and Maintenance. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 47, pp 19-24 Minnesota, 1982.
- Solaimanian, M., Bonaquist, R. F., Tandon, V. Improved Conditioning and Testing Procedures for HMA Moisture Susceptibility. Reporte NCHRP 589. Washington, D.C., 2007.
- Tarrer, A. R., Wagh, V. The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding. Reporte SHRP-A/UIR-91-507. Washington, D.C., 1991.
- Tunnicliff, D., Root, R. Use of Antistripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures. NCHRP Report No. 274. Washington, D.C., 1984.