



## CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA LA CORRECTA EVALUACION DEL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFALTICAS

Luis Enrique Ramirez Soto<sup>1</sup>, Raúl Terán Orozco<sup>2</sup>,  
Raymundo Benitez Lopez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Quimi-Kao S.A. de C.V., El Salto, Jalisco, México, lramirez@kao.com

<sup>2</sup> Quimi-Kao S.A. de C.V., El Salto, Jalisco, México, rteran@kao.com

<sup>3</sup> Quimi-Kao S.A. de C.V., El Salto, Jalisco, México, rbenitez@kao.com

### Resumen

El daño de humedad del pavimento asfáltico es un problema que la mayoría de las agencias de carreteras estatales y federales están experimentando. Este daño se conoce comúnmente como "stripping". La consecuencia más grave es la pérdida de fuerza e integridad del pavimento. El stripping ó desprendimiento de una mezcla de concreto asfáltico tiene lugar cuando se pierde adherencia entre la superficie del agregado y el cemento asfáltico. La pérdida de adhesión se debe principalmente a la acción de la humedad, ocasionando los principales modos de falla como desprendimiento, deformación y agrietamiento.

Una de las pruebas más populares utilizadas para caracterización en la evaluación de las mezclas asfálticas es la prueba de tensión indirecta que ha sido ampliamente utilizada desde la década de 1960.

La intención de este trabajo es ejemplificar que una dependencia en la relación del TSR como parámetro de evaluación de la resistencia de las mezclas asfálticas al daño producido por humedad puede afectar otros factores como lo son la resistencia a la rodera y la disminución del módulo dinámico  $E^*$ , por lo que es necesario revisar de igual manera las magnitudes del esfuerzo a tensión indirecta, y no solo la relación expresada en porcentaje.

**Palabras-clave:** TSR, Daño, Humedad, Mezclas, Desprendimiento.

### 1 Introducción

La susceptibilidad a la humedad es una de las causas de las fallas prematuras en los pavimentos (grietas, desmoronamiento en el borde, roderas, etc.), sobretodo en pavimentos asfálticos, sin embargo sus causas no han sido claramente identificadas, ya que sólo se han estudiado cuidadosamente propiedades en el diseño de mezclas asfálticas la permeabilidad, relación de vacíos y contenido de asfalto; algunas investigaciones han asociado, principalmente, mayores daños en las mezclas debido a la humedad, con incrementos en el tráfico, cambios en la calidad del agregado, características del método de diseño de mezclas y el pobre control de calidad. No hay investigaciones que evalúen el

efecto del espesor de la película de asfalto en el daño por humedad en mezclas asfálticas en caliente

Se han desarrollado varias pruebas de laboratorio para evaluar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Las pruebas de laboratorio no simulan por completo las condiciones de campo; sin embargo, nos pueden proporcionar información útil. Estas pruebas se desarrollaron para la evaluación de daños por humedad o bien evaluar el desprendimiento del asfalto de la superficie del agregado o la pérdida de la resistencia de los especímenes compactados.

La literatura define la adhesividad como la capacidad de un Asfalto residual para quedar fijo en el agregado, al que recubre sin peligro de desplazamiento, incluso en presencia de agua, tráfico y cambios bruscos de temperatura. Es normal considerar otra serie de propiedades intrínsecas a los Asfaltos, a partir de las cuales se puede deducir su comportamiento mecánico, tales como viscosidad, penetración, ductilidad y otras. Sin embargo, en este estudio se pretende evaluar solo esta propiedad relativa, ya que el Asfalto presenta buena o mala adhesividad según el tipo de árido que se utilice en la obra.

La primera condición para que exista adherencia entre dos materiales es que estén en contacto, por lo que es muy importante que el Asfalto quede distribuido en toda la superficie específica del agregado, es decir, que el asfalto moje el agregado, esto lo logramos al calentar el asfalto y el agregado para poder cubrirlo; la segunda condición es que la unión asfalto agregado sea resistente a la humedad y los cambios bruscos de temperatura, esto lo logramos reduciendo la tensión interfacial que se genera entre el asfalto y el agregado.

La adherencia es un fenómeno que se produce en las superficies en contacto, dependerá de las características de ambas superficies. Y, por lo tanto, hay que estudiarlas ambas para poder deducir su comportamiento cuando se produce el contacto.

Consideremos en la siguiente figura 1, como en una gota de asfalto esta unidas sus moléculas:

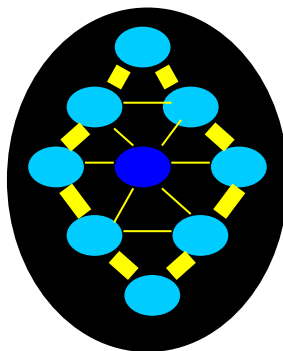


Figura 1. Gota de asfalto (se apreciar cómo se encuentran unidas sus moléculas).

Como podemos observar las moléculas del asfalto se encuentran unidas con una determinada energía de enlace que se encuentra en equilibrio, pero las moléculas que se encuentran en el exterior tienden a estar unidas con una energía mayor debido a que no tienen contacto con otra molécula similar formando la gota de asfalto.

Al depositar esta gota de asfalto sobre la superficie de un agregado, se podrían, teóricamente, dar dos casos extremos y toda una serie continua de intermedios, de acuerdo a la siguiente figura 2 :

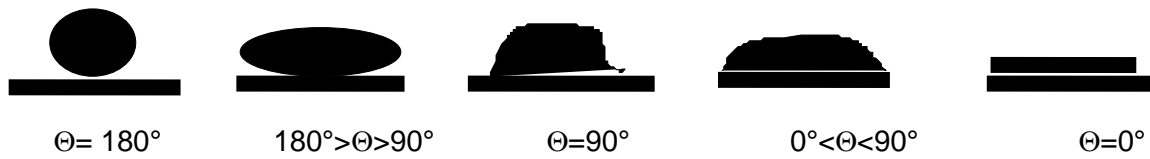


Figura 2. Casos en los que una gota de asfalto tiene contacto con el agregado.

La experiencia muestra que el caso real que se produce entre el asfalto y el agregado esta comprendido entre 90 y 180°, lo que indica que el agua tiende a desplazarle y que la adhesividad solamente puede basarse en circunstancias mecánicas, tales como son la textura superficial del agregado, la porosidad del mismo, la ausencia de humedad, etc.. Solamente cuando el ángulo de contacto es menor de 90° el ligante desplaza al agua, por lo que mediante el uso de aditivos disminuimos la tensión interfacial entre asfalto y el agua reduciendo así este ángulo de contacto, es decir, si logramos que la energía de unión de las moléculas que se encuentran en el exterior de la gota de asfalto sean similares a las energías de unión de las moléculas del agregado podremos lograr ángulos de contacto menores a 90°. Las sustancias que reducen o modifican las energías de enlace en el exterior de la gota de asfalto son los llamados aditivos mejoradores de adhesión ó Tensoactivos, esto lo podemos apreciar en la siguiente figura 3:

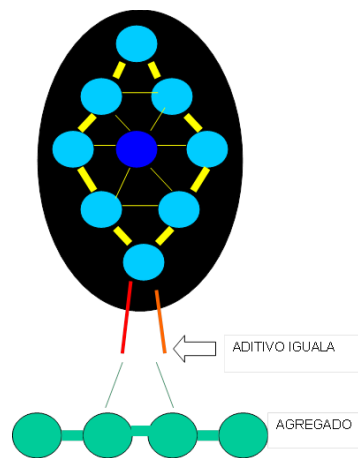


Figura 3. Reducción de la tensión superficial del asfalto debido a la acción del aditivo

El aditivo modifica la energía de enlace de las moléculas que se encuentran en el exterior de la gota de asfalto debido que este consta de una molécula que está formada por una parte que es compatible con el asfalto y por otra que es compatible con el agregado, reduciendo la diferencia de energía de enlace entre el asfalto y el agregado logrando humedecer el material. La siguiente figura 4 nos muestra la función del aditivo:

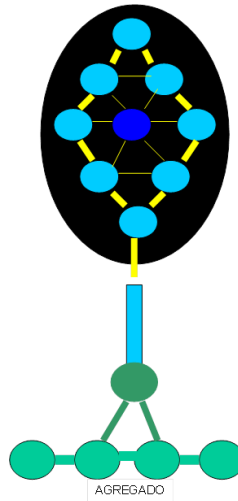
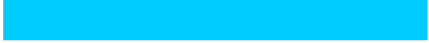



Figura 4. Estructura química de la molécula del aditivo mejorador de adherencia.

Como ya lo habíamos mencionado anteriormente, los dos factores para lograr la adhesión asfalto agregado son que el asfalto cubra el agregado y el otro es que la unión asfalto agregado sea resistente la humedad y los cambios de temperatura; el aditivo como ya lo mencionamos moja el material pero además tiene la función de reforzar la unión asfalto agregado debido a que la parte compatible con el agregado contiene un grupo químico capaz de reaccionar con el grupo químico del agregado logrando una unión asfalto agregado muy resistente.

La siguiente tabla 1, nos muestra los diversos grupos químicos que podemos utilizar en una molécula promotora de adhesión entre el asfalto y el agregado:

Tabla 1. Estructuras químicas de los diferentes aditivos mejoradores de adherencia.

Parte compatible con Asfalto	Parte compatible con el Agregado
	
Cadena de 20 carbonos (R20)	Aminas
Cadena de 20 carbonos (R18)	Carbonilos
Cadena de 20 carbonos (R12)	Oxidrilos
Cadena de 20 carbonos (R10)	Imidazolinias
Mezclas de los anteriores	Amidas

Cuando usamos aditivos cuya parte compatible con el agrado es una amina ocurren una serie de reacciones químicas con el agregado que en su naturaleza química extrema puede ser calizo o silicoso.

Si se trata de un material calizo, estaremos ante una agrupación de moléculas de carbonato de calcio con una disposición más o menos geométrica, que dependerá del proceso de formación de la roca, pero siempre se tienen superficies minerales que, en presencia de humedad, se ionizan en el Ion Carbonato ( $\text{CO}_3^-$ ) con dos cargas negativas y el Ion Calcio  $\text{Ca}^{++}$  con dos cargas positivas.

Al usar este tipo de aditivos sobre un pétreo calizo, lo primero que ocurre es un ataque al material calizo por los glóbulos de asfalto, es decir, los aniones Carbonato (cargados negativamente al existir pequeñas cantidades de agua) sobre la superficie del pétreo atraen al asfalto cargado positivamente debido a la presencia del aditivo formándose una unión química (asfalto--agregado) acompañada de una gran adhesividad debido a la formación del carbonato de amina

En el caso de los materiales Silicosos ó ácidos están formados por átomos de Silicio tetravalente, rodeado de grupos de oxígeno y cationes metálicos, por tanto en presencia de humedad estos agregados también se ionizan cargándose negativamente. Al usar este tipo de aditivos sobre un pétreo Siliceo, los glóbulos de asfalto cargados positivamente son atraídos por los aniones del agregado ( $\text{SiO}_4^{--}$ ), formándose una unión muy resistente mediante el compuesto químico llamado Silicato de Amina, el cual proporciona una gran adherencia y resistencia a la presencia de agua y a los cambios térmicos.

La siguiente figura 5 nos muestra la reacción química entre el agregado y el aditivo cuya parte compatible con el agregado es el grupo químico funcional base amina

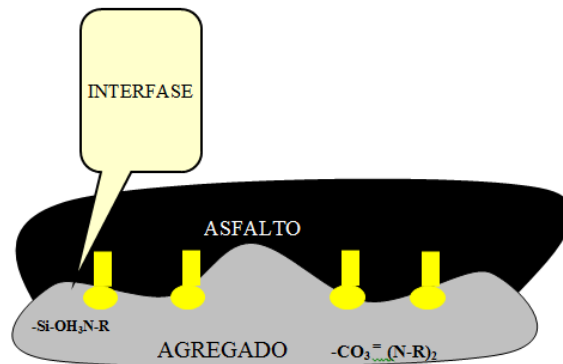


Figura 5. Enlace químico entre los agregados y un aditivo base amina.

## 2 Desarrollo experimental

### 2.1 Generalidades

En este estudio se utilizan 5 aditivos mejoradores de adherencia de estructura química diferente y con cada uno de ellos se evaluaron desde las pruebas de afinidad Boiling test ASTM D3625 Prueba por desprendimiento por fricción Recomendación AMAAC RA-08, Resistencia al desprendimiento del asfalto de los materiales pétreos en las mezclas asfálticas por acción del agua Recomendación AMAAC RA-07 así como las pruebas a las mezclas asfálticas Tensile Strength Ratio AASHTO T283 y la rueda cargada de Hamburgo AASHTO T324

Propiedades del material pétreo Protocolo AMAAC.

### 2.2 Caracterización del material nuevo.

Las muestras de materiales pétreos evaluadas fueron de origen basáltico del banco Lagos de Moreno, localizado en el estado de Jalisco, del cual se evaluaron los siguientes materiales en base a las especificaciones del protocolo AMAAC PA-MA 01/2011.



Tabla 2. Caracterización agregado fino.

Característica	Norma	Valor	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	57.6 %	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	42 %	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	AMAAC RA-05/2010	15 mg/gr	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

La muestra analizada presenta gravedad específica bruta de 2.609 y absorción de agua de 2.84 %.

Tabla 3. Caracterización agregado Grueso.

Característica	Norma	Valor	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	17.5 %	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO T327 / ASTM D6928	5.9%	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104 /ASTM C88	6.5%	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	97%	90 mín.
Partículas planas y alargadas, %	ASTM D 4791	7.5 %	5 a 1 %, 10 máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	AMAAC RA-08/2010	96%	90 mín.

La muestra analizada presenta gravedad específica bruta de 2.666 y absorción de agua de 1.48 %.



### 2.3 Diseño de la mezcla.

El diseño de la mezcla asfáltica se realizó conforme al protocolo de diseño de mezclas asfálticas de alto módulo de la Asociación Mexicana del Asfalto PA MA-01-2011.

Propuesta granulométrica:

- Arena 1/4 - 23%
- Arena 3/16 - 27%
- Grava 1/2 - 50%

Tabla 4. Granulometría de diseño.

Tamaño de la malla		
mm	US	Mez
25	1"	100.
19	3/4"	100.
12.5	1/2"	92.4
9.5	3/8"	85.8
4.75	#4	64.5
2.36	#8	38.6
1.18	#16	22.6
0.6	#30	14.6
0.3	#50	11.2
0.15	#100	6.8
0.075	#200	4.2

Resumen del diseño:

- Proporciónamiento de agregados en peso: 50% de grava 1/2 + 23% de arena 1/4 + 27% arena 3/16. Contenido de asfalto: 6.1 % base peso de la mezcla.
- Temperatura de mezclado: 155 a 160°C. Temperatura de compactación: 145 a 150°C
- Gravedad específica de la mezcla compactada: 2.324
- Gravedad específica máxima teórica de la mezcla sin compactar: 2.421  
Vacíos de aire de la mezcla compactada: 4.0%.
- Vacíos en el agregado mineral: 15.9
- Vacíos llenos de asfalto: 77.6
- Relación de filler/asfalto : 0.91

## 3 Resultados

### 3.1 Ebullición ASTM D3625

Método para evaluar el efecto del agua sobre agregados con recubrimiento asfáltico usando agua hervida. Este método es muy práctico y rápidamente nos proporciona



información si nuestra muestra asfáltica será resistente a la acción del agua, y también nos proporciona información sobre el comportamiento de los aditivos de adherencia respecto a la dosis y tipo. Este método es utilizando en los países de Perú y Estados Unidos.

La siguiente figura 6, nos muestra el diagrama de flujo de este método.

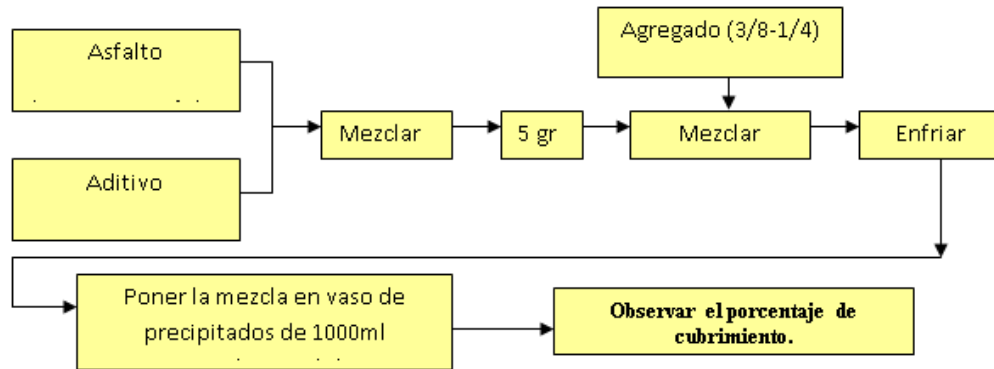


Figura 6 Diagrama de flujo del método ASTM D-3625.

Tabla 5. Resultados de las prueba ASTM D-3525

ADITIVO	RESULTADO
<b>A (referencia)</b>	100%
<b>B</b>	100%
<b>C</b>	100%
<b>D</b>	100%
<b>E</b>	100%
<b>F</b>	100%

Como se observa en la tabla anterior para este material pétreo y este asfalto no se presentan variaciones en el resultado dando desde un inicio 100% de cubrimiento con el asfalto convencional (sin aditivos mejoradores de adherencia).

### 3.2 Desprendimiento por fricción RA-08.

Método para evaluar el efecto del agua sobre agregados con recubrimiento asfáltico usando fricción. Este método es muy parecido a la prueba de transporte de las emulsiones asfálticas, y también nos proporciona información sobre el comportamiento de los aditivos de adherencia respecto a la dosis y tipo. Este método es utilizando México.

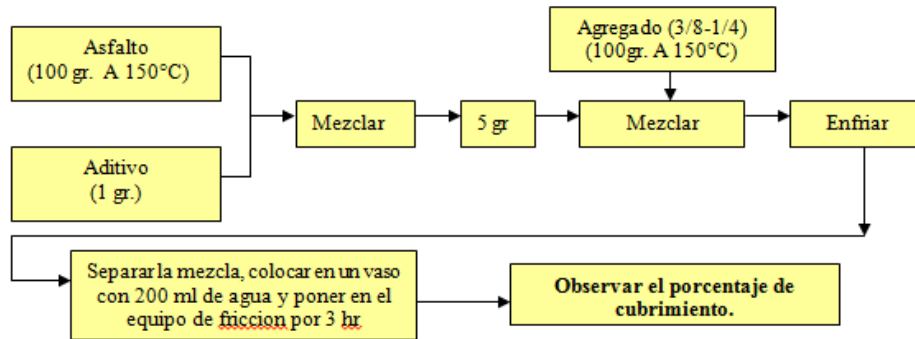


Figura 7 Diagrama de flujo del método RA-08.

Tabla 6. Resultados de las prueba RA-08

ADITIVO	RESULTADO
A	85%
B	93%
C	90%
D	93%
E	85%
F	90%

En esta prueba observamos una condición similar a la anterior, se presentan resultados de buena afinidad teniendo un 85% de cubrimiento con el asfalto natural pero mejorándose con el uso de algunos tipos de aditivos mejoradores de adherencia.

### 3.3 Desprendimiento la acción del agua RA-07.

Este método mide la resistencia de adhesión del asfalto sobre el agregado en presencia de agua siendo utilizado en Australia. Este método proporciona resultados muy claros de adhesión entre el asfalto y el agregado sin utilizar y utilizando diferentes dosis y tipos de aditivos de adherencia.

Este método consiste en depositar agregado de 3/8 sobre una placa de Aluminio con un área de 15.2X15.2cm<sup>2</sup> y un espesor de 3cm conteniendo 30 gramos de asfalto con y sin aditivo para después calentarlos por 24 horas a 60°C, después colocar el plato en un baño de agua a 50°C por 4 días y observar el porcentaje de cubrimiento.



Tabla 7. Resultados de las prueba RA-07

ADITIVO	RESULTADO
A	90%
B	100%
C	100%
D	95%
E	100%
F	100%

En la tercer prueba de adherencia los resultados que se presentan son similares a los anteriores en los cuales se observa que el material pétreo presenta buena adherencia y no se distingue diferencia en el tipo de aditivo usado.

### 3.4 Resistencia al daño por humedad (TSR AASTHO T-283).

La prueba tiene como objetivo principal medir los efectos de la saturación en mezclas compactadas y predecir una falta de adherencia del material pétreo y el asfalto, la mayor resistencia a la falla la ofrece la cohesión interna de la mezcla, tiene un valor recomendado de 80%.

Tabla 8 Resultados TSR

Resultados TSR								
Material	Aditivo	ACONDICIONAMIENTO			Va Promedio	% saturación	TSR (AGUA)	TSR (CONG)
		SECAS	AGUA (60°)	CONG				
M1	A	645.10	573.36	568.35	6.97	72.43	88.9%	88.1%
	B	580.30	563.38	560.11	6.99	73.34	97.1%	96.5%
	C	523.66	510.30	511.30	6.86	75.51	97.4%	97.6%
	D	599.52	573.79	580.30	6.95	74.79	95.7%	96.8%
	E	501.27	477.74	480.55	6.85	76.53	95.3%	95.9%
	F	680.30	629.44	619.85	6.98	76.33	92.5%	91.1%
M2	A	452.00	416.00	415.00	7.45	75.63	92.0%	91.8%
	F	484.80	478.00	476.55	7.30	76.30	98.6%	98.3%
	E	401.46	340.33	366.35	7.52	73.20	84.8%	91.3%

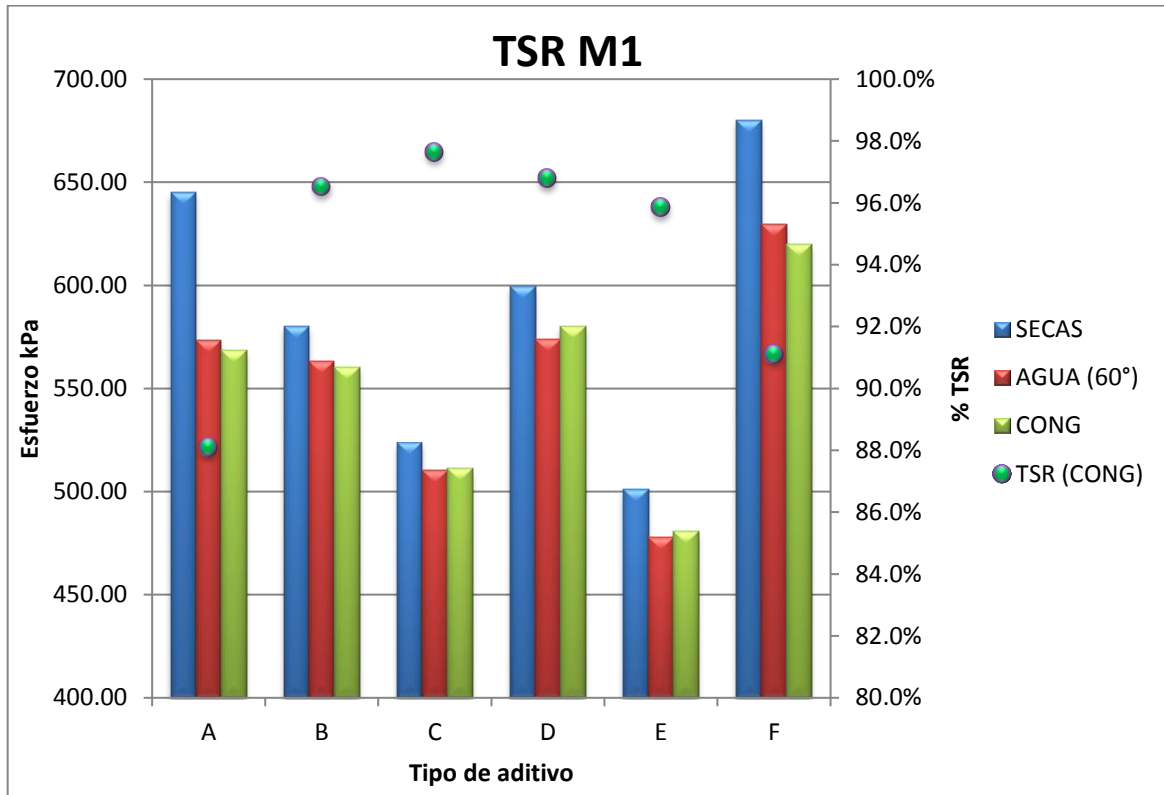


Figura 8. Resultados del TRS para el material pétreo 1

En la figura 8 se observa una relación similar en los valores de TSR pero teniendo diferencias significativas en la magnitud de los esfuerzos de ruptura por lo cual se considera que el aditivo esta influenciando de manera significativa en los valores de resistencia tanto en seco como acondicionados pudiendo considerarse como una solución a la relación de resistencias Acondicionada / Seca pero afectándolo en propiedades de perdida de cohesión de la mezcla asfáltica.

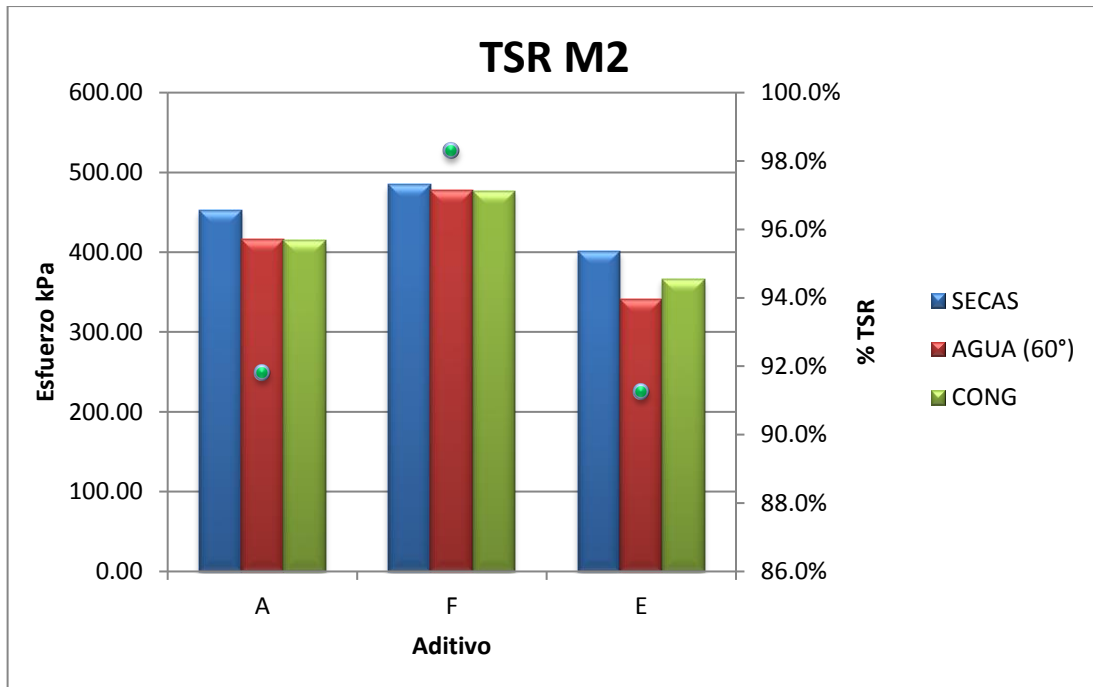


Figura 9 Resultados del TRS para el material pétreo 2

### 3.5 HWT (Rueda Cargada de Hamburgo).

La prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo trata de simular el deterioro de la mezcla asfáltica al someterla al paso intermitente de una rueda metálica con una masa constante además de las condiciones de humedad y temperatura.

Las condiciones de la prueba son las siguientes:

- Pasadas de la rueda metálica 20,000.
- Carga sobre la rueda 71.89 Kg.
- Especímenes sumergidos en agua 50°C

Tabla 9 resultados de HWT a la falla

Aditivo	Pasadas
A	17740
B	13054
C	13336
E	10112
F	16392

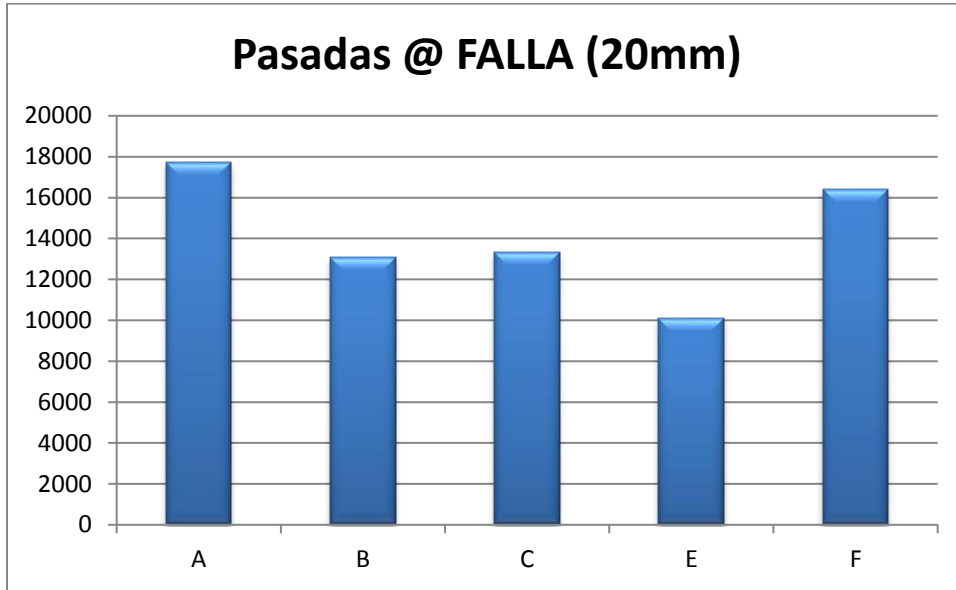


Figura 10 Resultados del número de pasadas a la falla 20 mm.

Tabla 10. Resultados de deformación HWT @ 20000 pasadas.

Additivo	Pasadas	Promedio
A	20000	23.61
B	20000	35.75
C	20000	28.19
E	20000	62.70
F	20000	18.48

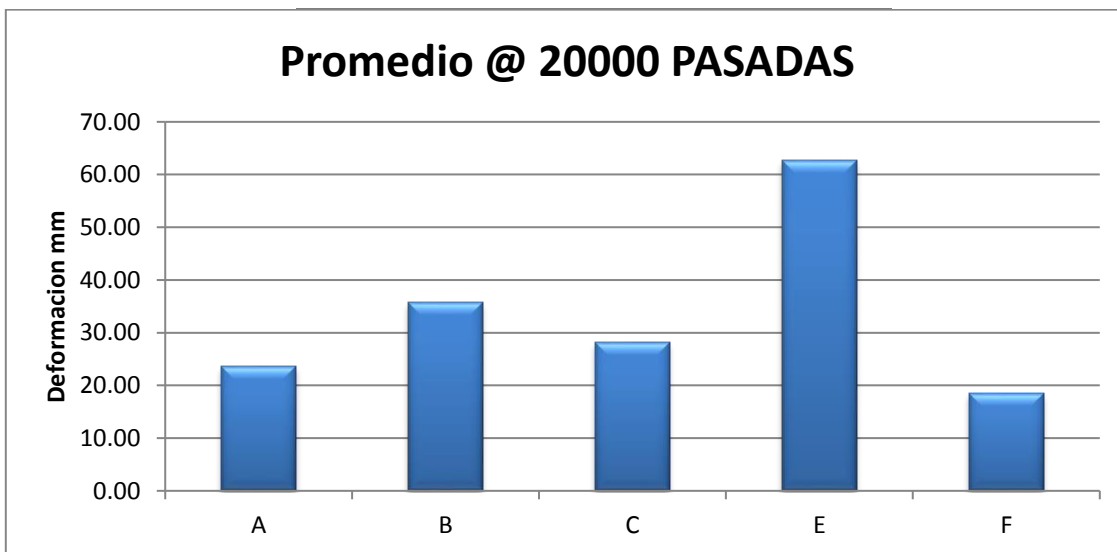


Figura 11 Deformación promedio a 20000 pasadas.

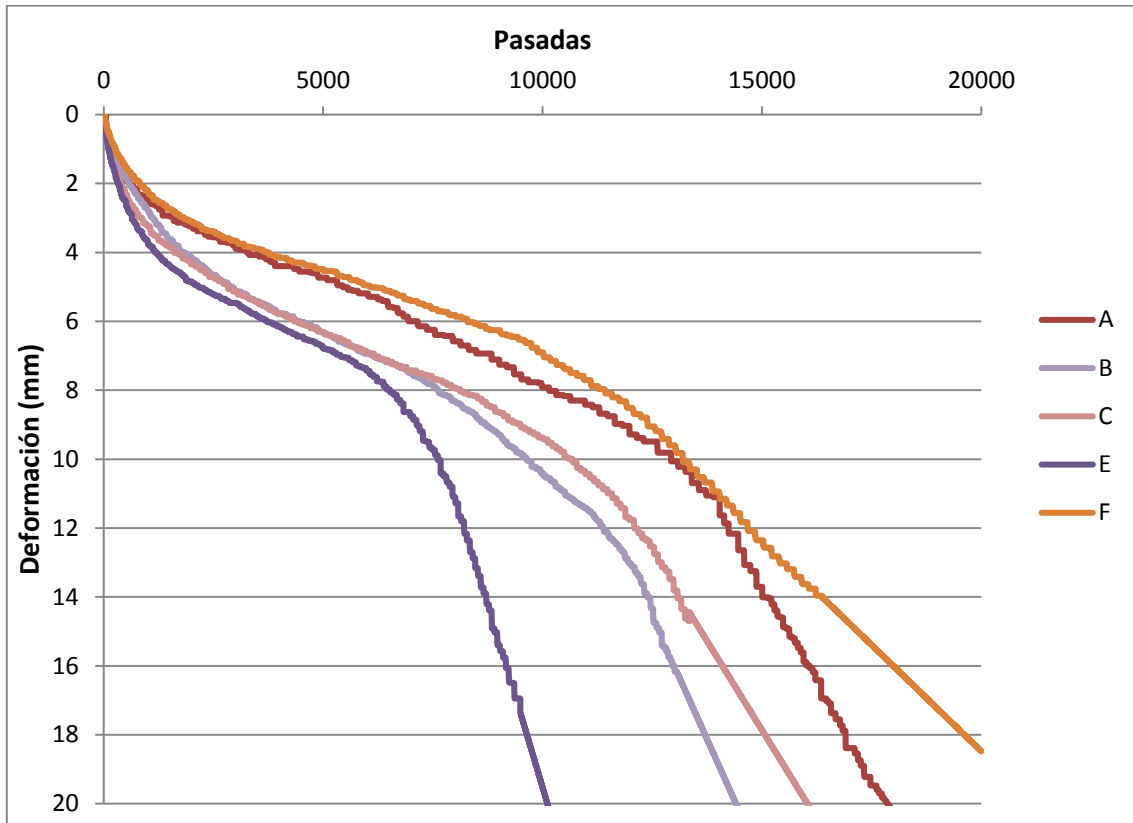


Figura 12 Comportamiento de las mezclas en la prueba de la rueda cargar a 20000 pasadas.

En la figura 12 se observa la disminución en la resistencia ante la deformación permanente de las mezclas asfálticas dependiendo del tipo de aditivo que se use.

#### 4 Conclusiones

- La evaluación de la adherencia no siempre viene dada de una manera sencilla, por todos los factores que involucran a esta, por lo cual siempre será necesario hacer evaluaciones que involucren a toda la mezcla asfáltica.
- Se observa que no existe aditivo universal que funcione en las mismas condiciones para cualquier material pétreo por lo que se recomienda realizar la evaluación a cada tipo de agregado.
- al realizar la evaluación de la prueba de Tensile Strength Ratio se observó un escaso daño por humedad en las mezclas asfálticas, siendo reducido al utilizar los diferentes tipos de aditivos, sin embargo, en la evaluación se observó que al usar algunos aditivos mejoradores de adherencia e incrementando el valor de TSR (%) disminuimos las magnitudes del esfuerzo de ruptura pudiendo generar mezclas inestables.
- Al incrementar la magnitud del esfuerzo de ruptura en TSR observamos que se incrementa la resistencia de las mezclas asfálticas ante la deformación permanente.
- Al depender de solo el valor de TSR podemos generar mezclas inestables, por lo que se recomienda evaluar el valor del esfuerzo de ruptura que no se vea afectado se utilizan aditivos mejoradores de adherencia.
- La correcta selección del aditivo mejorador de adherencia deberá ser con el que se cumplan todas las pruebas sin afectar el desempeño de la mezcla asfáltica.

#### 5 Bibliografía

[1] Asphalt Institute. "Antecedentes del Diseño y Análisis de mezclas Asfálticas de SUPERPAVE".

[2] Protocolo AMAAC PMA 01/2013 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.