

## **Primeras experiencias en el ahuellamiento y fisuración refleja, en pavimentos de hormigón con refuerzo asfáltico, utilizando materiales geosintéticos.**

Autor: Dr. Ing. Héctor L. Delbono; LEMaC – Centro de Investigaciones Viales de la UTN-Facultad Regional La Plata. Calle Av. 60 y 124 (1900) Tel/fax: +54-0221-4890413. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Email: [delbonoluis@hotmail.com](mailto:delbonoluis@hotmail.com)

### **Resumen**

El ahuellamiento es un defecto que se produce en los pavimentos asfálticos como consecuencia del paso de los vehículos y las altas temperaturas de servicio; consiste en una depresión producida en correspondencia con la huella de circulación del tránsito.

El problema existente para este fenómeno es encontrar una solución que equilibre la resistencia de la mezcla en cuanto a las deformaciones permanentes (ahuellamiento) y la fatiga (fisuración).

Se realizaron experiencias en laboratorio utilizando el equipo Wheel tracking Test, buscando alargar la vida útil de un pavimento deteriorado, rehabilitado con refuerzo asfáltico, interponiendo diferentes materiales geosintéticos. Se evidenció que los geosintéticos reducen el potencial ahuellamiento que indefectiblemente se manifiesta en los refuerzos asfálticos conjuntamente con una reducción significativa de la fisuración ascendente.

Queda a futuro del trabajo, unificar criterios de ensayo y normas de aplicación que permitan cuantificar el comportamiento de los geosintéticos ante el ahuellamiento.

**Palabras Claves:** Pavimento, Ahuellamiento, Reflejo de fisura, Geosintético

## **First experiences in rutting and cracking reflex, in concrete pavement with asphalt reinforcement using geosynthetic materials.**

### **Abstract**

Rutting is a defect that occurs in asphalt pavements due to the traffic of vehicles and high operating temperatures; a depression is produced in correspondence with the track of traffic flow.

The existing problem for this phenomenon is to find a solution that balances the resistance of the mixture in terms of permanent deformation (rutting) and fatigue (crack).

Laboratory experiments were conducted using the Wheel Tracking Test equipment, seeking to extend the life of a deteriorated pavement, rehabilitated with asphalt reinforcement and inserting different geosynthetics. It was evident that geosynthetics reduce rutting potential that inevitably occurs in asphalt reinforcements together with a significant reduction in cracking up.

Future work needs to unify test criteria and standards applicable to quantify the behavior of geosynthetics to rutting.

**Keywords:** Pavement, Rutting, Crack reflex, Geosynthetic

## 1. INTRODUCCIÓN

Un pavimento asfáltico está sometido a diferentes acciones que disminuyen su vida útil a lo largo del tiempo. Estas acciones son, entre otras, el tránsito y el clima.

Como consecuencia de esas acciones, surgen en el pavimento asfáltico fallas identificadas como deformaciones permanentes (ahuellamiento), fisuras por fatiga y/o temperatura, las cuales están asociadas a las características de la mezcla (I).

Una de las fallas de difícil solución actualmente es el ahuellamiento, fenómeno que consiste en una depresión canalizada en correspondencia con la huella de circulación de los vehículos, Figura 1.

Se produce en pavimentos asfálticos sometidos a una combinación de elevados niveles de tránsito, tránsito pesado y/o lento y altas temperaturas de servicio (II).

Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, afectando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad (III).



Figura 1. Ahuellamiento en pavimentos asfálticos.

### 1.1 Deformación permanente en mezclas asfálticas.

Cuando una rueda cargada se desplaza sobre una superficie asfáltica, un elemento diferencial ubicado en el entorno de la rueda se encuentra, en cualquier punto de la superficie asfáltica, sometido a un estado de tensiones verticales, horizontales y de corte, Figura 2.

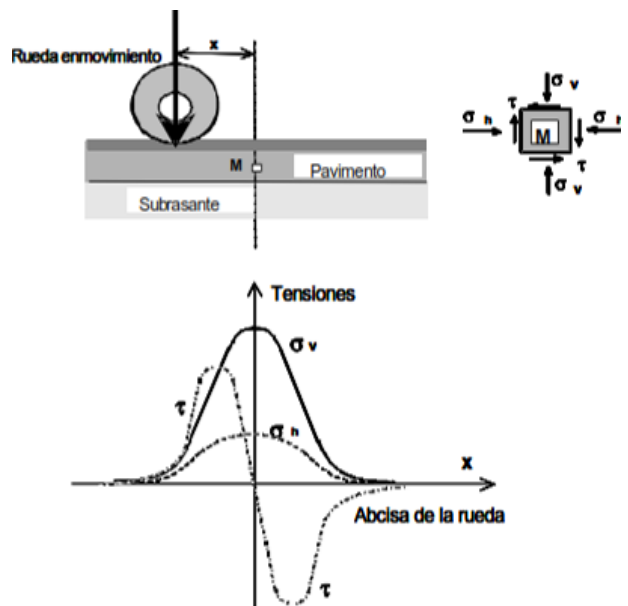


Figura 2. Esquema de distribución de tensiones.

El diseño estructural de los pavimentos está orientado a establecer valores límites de tensiones y deformaciones con el fin de valorar en el tiempo, bajo ciertas características de sollicitación, profundidades de huellas compatibles al nivel de servicio proyectado o esperado. (IV).

### 1.2 Fenómeno de fisuración refleja

Se denomina como fisuración refleja al fenómeno por el cual se propagan las fisuras pre existentes en capas inferiores o en coincidencia con movimiento de juntas de un pavimento envejecido, hacia la nueva capa colocada como refuerzo, por

efecto del tránsito y/o de las solicitaciones medioambientales calcando la patología de las mismas (V).

La reflexión de una fisura a la capa superior esta ligada al hecho que, bajo el efecto de solicitaciones diversas, los bordes de la fisura existente se mueven creando concentración de tensiones y transfieren ese movimiento a la capa superior; por fatiga de la capa de refuerzo asfáltico se inicia una fisura que crece rápidamente en dirección a la superficie (VI).

Estos efectos o movimientos originan tensiones de tracción en la fibra inferior o corte en la capa de refuerzo que pueden ser elevadas, tornándose mayores a las admisibles de corte y tracción del concreto asfáltico, causando el surgimiento de la fisura en la capa de refuerzo (VII), Figura 3.

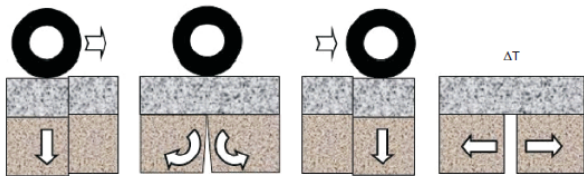


Figura 3. Solicitaciones sobre un pavimento.

En pavimentos de hormigón, reforzado con una capa de mezcla asfáltica, la adherencia entre las capas, como la temperatura y la frecuencia de carga, juegan un rol esencial en el comportamiento de la mezcla asfáltica colocada, condicionando el comportamiento en servicio.

El presente trabajo se desprende de una Tesis Doctoral donde se plantea la rehabilitación de un pavimento de hormigón mediante refuerzo asfáltico, utilizando diferentes materiales geosintéticos en pos de alargar la vida útil de la estructura. En este caso se desarrolla el

comportamiento de los materiales geosintéticos ante el potencial ahuellamiento y el fenómeno de fisuración refleja que se produce en los pavimentos.

Mediante los ensayos de caracterización de los materiales geosintéticos, se conocen las propiedades de los mismos y las bondades de su utilización en la rehabilitación de pavimentos. A tales fines, el investigador Robert Koerner (VIII) en su publicación "Designing with Geosynthetics" considera el aporte de la incorporación de geosintéticos en rehabilitaciones, a través del coeficiente de efectividad del material FEF ("Fabric Effectiveness Factor"). Este coeficiente es determinado como la relación entre el número de ciclos que provocan la falla en especímenes con geosintético dividido el número de ciclos que provocan la falla en especímenes sin geosintético.

El mismo adopta valores mayores de 1 si el material brinda un mejoramiento en el refuerzo, y valores menores a la unidad si no posee un aporte sobre el sistema de referencia. El tránsito a utilizar en el cálculo del refuerzo es minorado por dicho coeficiente FEF; en ese caso, los valores de espesores del refuerzo resultan menores que en el caso de la no aplicación del geosintético, según el material utilizado.

Visto en fórmulas matemáticas, los conceptos de Koerner son:

$$FEF = N_r/N_n$$

donde:

FEF = coeficiente de efectividad del geosintético.

Nr = número de ciclos de carga que generan la falla en probetas con geosintético.

$N_n$  = número de ciclos de carga que generan la falla en probetas sin geosintético "Referencia".

## 2. EXPERIMENTAL

Los materiales geosintéticos utilizados, Figura 4, corresponden a materiales importados, denominados HSK PET y MAC PET, conformados por fibras en poliéster unidas a una manta en polipropileno con abertura de malla de 40x40 mm.; otros dos son de desarrollo local (FM PP, conformado por una membrana asfáltica adosada a un geotextil tejido en polipropileno y RBK PET conformado por fibras en poliéster distribuidas aleatoriamente en la masa de una membrana asfáltica), estos dos últimos materiales fueron desarrollados a nivel Nacional, siendo un significativo aporte al crecimiento tecnológico de Argentina.



Figura 4. Materiales; Arriba izq. HSK PET, derecha MAC PET; Abajo izq. FM PP, derecha RBK PET.

### 2.1 Equipo Wheel Tracking Test.

El ensayo de Wheel Tracking Test (WTT) surgió como una metodología para estudiar las deformaciones plásticas (ahuellamiento) en pavimentos asfálticos; el mismo se caracteriza por

aplicar una carga dinámica a través de una rueda, la que simula las condiciones de tránsito, sobre una probeta prismática de 300x300 mm y 50 mm de espesor. El ensayo registra las deformaciones verticales sufridas por la mezcla a lo largo de 10.000 ciclos de carga; dicho ensayo se efectúa a 60 °C.

La carga de la rueda es de 700 Newton, la cual se aplica con una frecuencia de movimiento de 26,5 ciclos por minuto. Las características de la rueda están dadas por su diámetro 200 mm, su ancho 50 mm, el espesor de la cubierta 20 mm y la dureza de la cubierta 80 IRHD (International Rubber Hardness Degrees). Bajo estas características cumple con el Método BS EN 12697-22.

Dada la tipología del ensayo dinámico, junto con la manera de aplicar la carga a través de una rueda, constituye un modelo normalizado de carga dinámica sobre la estructura del pavimento, Figura 5.



Figura 5. Equipo de rueda cargada, Wheel Tracking Test.

Se decide utilizar dicho equipamiento, diseñando el sistema de apoyo, Figura 6, para evaluar las cualidades que puede llegar a brindar un material geosintético ante el ahuellamiento y la fisuración ascendente.

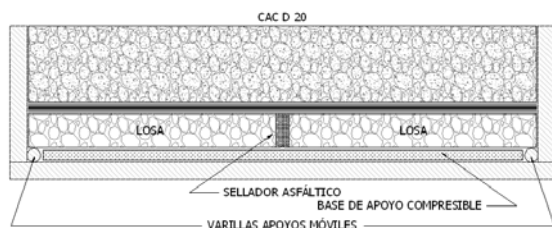


Figura 6. Esquema de apoyo de la probeta.

### 2.1.1 Confección de probetas

Las probetas son confeccionadas de la siguiente manera: dos placas de hormigón de 20 mm de espesor separadas 0,5 cm, cuyo espacio se completa con telgopor o sellador con objeto de simular una junta real del pavimento de hormigón, Figura 7.



Figura 7. Confección de probetas.

Sobre las losas de hormigón, con la junta intermedia, se ejecuta el riego con emulsión asfáltica modificada con polímero SBS de acuerdo a la circunstancia de obra; según los datos de la bibliografía y la recomendación del Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad (bajo el título de tratamiento bituminoso superficial de sellado: Sección D.III), se adopta una dotación de  $0,9 \text{ l/m}^2$ . Una vez curada la emulsión (40 minutos aproximadamente bajo las condiciones de laboratorio) se coloca, sobre la película formada, el material geosintético, dando una leve compactación (cuidando que no queden arrugas)

de la mezcla asfáltica convencional en caliente del tipo CAC D20 a  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , Figura 8.



Figura 8. Riego y colocación del geosintético.

En el caso del geosintético compuesto por una membrana polimérica y un geotextil tejido en polipropileno (FM PP), antes de la colocación de la capa asfáltica, se realiza una nueva aplicación de emulsión; luego del curado (30 min aproximadamente) en condiciones de laboratorio, se compacta la mezcla asfáltica convencional tipo CAC D20.

Procediendo al moldeo de la mezcla asfáltica, se utiliza el equipo Roller Compact Modelo STCX-2; el equipo se acondicionó a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  efectuando 24 pasadas, Figura 9.

Se deja enfriar la probeta durante 24 horas procediendo a ensayarlo con el equipo de Wheel Tracking Test acondicionando la muestra durante 4 horas a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Queda así conformada una probeta de dimensiones 300 mm por 300 mm, con 50 mm de espesor de mezcla asfáltica sobre los 20 mm de espesor de las losas de hormigón.



Figura 9. Compactación de la mezcla asfáltica mediante el equipo Roller Compact.

Los ensayos fueron realizados de dos maneras, debido a que uno de ellos fue realizado simultáneamente para ver la progresión de fisuras en correspondencia con la junta del hormigón:

Método 1: según el método BS EN 12697-22, con las cuatro caras confinadas de la probeta, Figura 10.

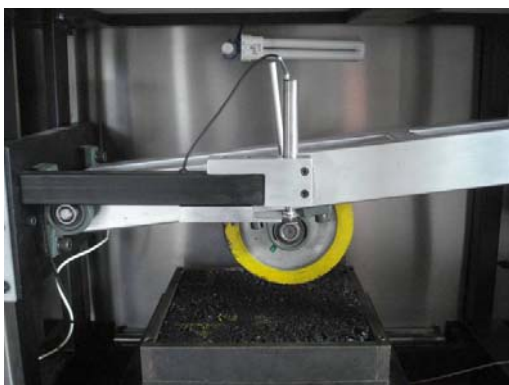


Figura 10. Ensayo con caras confinadas para el material FM PP.

Método 2: según el método BS EN 12697-22, con la cara frontal de la probeta descubierta, Figura 11.



Figura 11. Ensayo con cara descubierta para el material FM PP.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Determinación de ahuellamiento

Se registro la deformación vertical de los sistemas propuestos, a través del software de registro continuo, obteniéndose los siguientes resultados:

Método 1: caras confinadas

Tabla 1: Ahuellamiento con caras confinadas

Material	Ahuellamiento (mm)
Sin geosintético	2,13
RBK PET	1,91
FM PP	1,64
MAC PET	1,40
HSK PET	1,31

La Figura 12 y Figura 13 presentan las curvas de ahuellamiento para los diferentes sistemas propuestos.

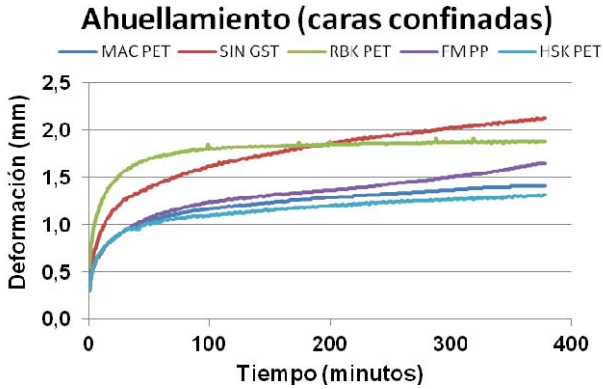


Figura 12. Curvas de ahuellamiento para el método con caras confinadas.

**Método 2: cara frontal descubierta**

Al no evidenciar diferencias importantes en los ensayos, se procedió a realizar el ensayo dejando la cara frontal descubierta. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 2: Ahuellamiento con cara descubierta

Material	Ahuellamiento (mm)
Sin geosintético	8,18
RBK PET	5,65
FM PP	5,15
MAC PET	3,41
HSK PET	3,06

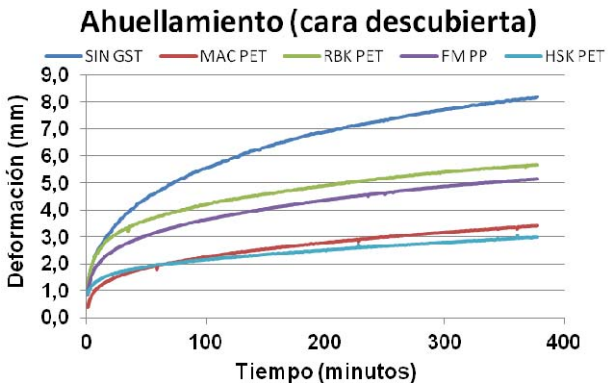


Figura 13. Curvas de ahuellamiento para método con cara descubierta.

La Figura 14 muestra el desplazamiento sufrido por la mezcla de refuerzo para el caso donde no se consideró la interposición de un material geosintético.

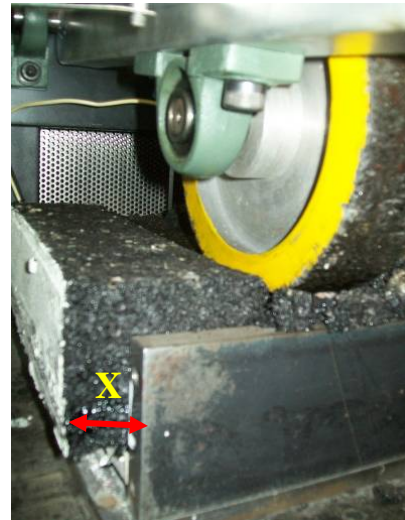


Figura 14. Desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica de refuerzo.

En los casos en donde se considera la interposición de un material geosintético, el desplazamiento lateral de la mezcla no resulta de importancia como si se evidenció para el caso sin geosintético, Figura 15.



Figura 15. Ahuellamiento sobre probeta utilizando el material HSK PET.

### 3.2 Determinación de propagación de fisuras

Se realiza el ensayo sobre el sistema que no considera la interposición de un material geosintético al cual denominamos “Blanco” en el trabajo, y sobre los sistemas que involucran un material geosintético en la interfase entre capas, dejando transcurrir los 10000 ciclos que dura el ensayo.

Se describe en la Tabla 3 la cantidad de ciclos para la cual la fisura se genera y la altura que alcanza transcurridos los 10000 ciclos.

La Figura 16 presenta la evolución de fisuras para los diferentes sistemas.

Tabla 3. WTT a 60 °C

Material	Tiempo de aparición de fisura (min.)	Cant. de ciclos (n°)	hfisura final (mm)	Cant. de ciclos (n°)
Blanco	5	132	50	1058
HSK PET	57	1510	7	10000
MAC PET	27	714	10	10000
FM PP	15	396	15	10000
RBK PET	13	343	17	10000

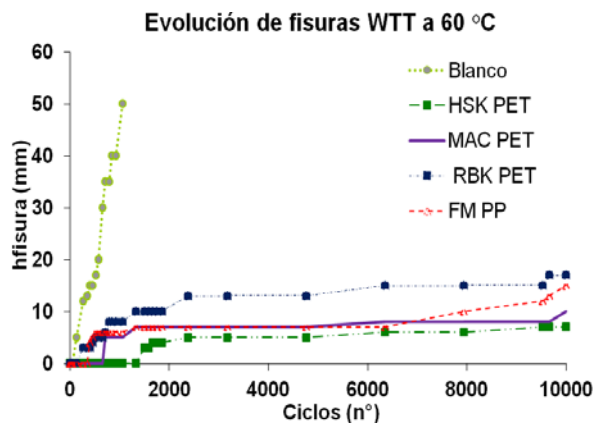


Figura 16. Evolución de fisuras para los diferentes sistemas a 60 °C.



Figura 17. Evolución de fisura para el material FM PP

Debido a la temperatura de ensayo de 60 °C, la cual permita cierta deformación de la mezcla asfáltica al no tener la cara frontal confinada, se realizaron los ensayos a 25 °C para poder visualizar el camino ascendente de la fisura.

Para este caso cambian las dimensiones de la probeta, siendo esta de 300 mm de largo por 100 mm de ancho, con 50 mm de espesor de mezcla asfáltica sobre 20 mm de espesor de las losas de hormigón.

Se describe en la Tabla 4 la cantidad de ciclos para la cual la fisura se genera y la altura que alcanza sobre la capa asfáltica de refuerzo.

Tabla 4. WTT a 25 °C

Material	Tiempo de aparición de fisura (min.)	Cant. de ciclos (n°)	hfisura final (mm)	Cant. de ciclos (n°)
Blanco	10	264	40	9656
HSK PET	1296	34280	25	286350
MAC PET	908	24020	35	256580
FM PP	106	2804	40	41690
RBK PET	95	2513	40	34280



Nota: los ciclos totales corresponden al instante en que la capa de refuerzo asfáltico se fisura completamente, los resultados de h fisura (altura que alcanza la fisura en su propagación) varían de acuerdo a que en algunos casos se generan microfisuras en la masa de la mezcla asfáltica, uniéndose hasta alcanzar la superficie.

La Figura 18 presenta la evolución de fisuras para los diferentes sistemas, mientras que la Figura 16 presenta una probeta ensayada a 25 °C

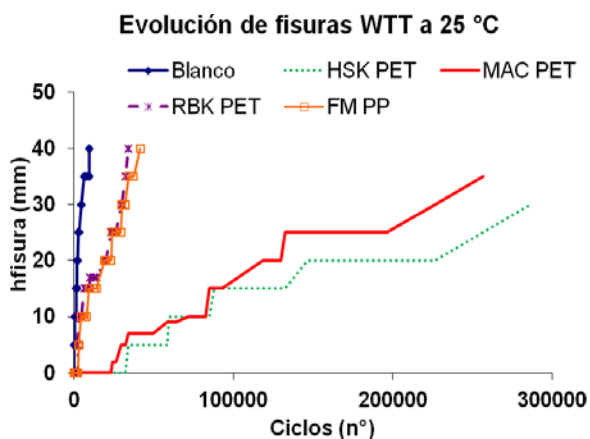


Figura 18. Evolución de fisuras para los diferentes sistemas a 25 °C.

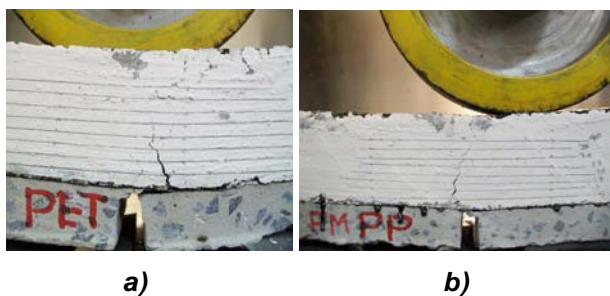


Figura 19. Evolución de fisura para el material MAC PET (a) y FM PP (b).

La Tabla 5 presenta el factor de efectividad (FEF) que los materiales geosintéticos ofrecen cuando se introducen entre capas de un pavimento con el fin de retardar el fenómeno de reflejo de fisura.

Tabla 5. Factor de efectividad (FEF) para los ensayos realizados a 25 °C

Material	Numero de ciclos (nº)	FEF (Nr/Nn)
Blanco	9656	1,0
HSK PET	286350	29,6
MAC PET	256580	26,6
FM PP	41690	4,3
RBK PET	34280	3,5

Nr: nº de ciclos que genera la falla en la probeta con material geosintético

Nn: nº de ciclos que genera la falla en la probeta sin material geosintético

Para el ensayo a 60 °C el factor de efectividad FEF fue difícil de determinar debido a que no se manifiesta claramente el desarrollo de la fisura.

### 3.3 Análisis y Discusión de Resultados

Considerando el deterioro de un pavimento de hormigón y su inminente restauración, se busco representar las condiciones reales de sollicitación y lograr, mediante la interposición de materiales de diferente composición química y conformación estructural, fortalecer el refuerzo de mezcla asfáltica colocada como refuerzo, ayudando a disminuir el progreso de deterioro de un pavimento de hormigón rehabilitado con mezcla asfáltica.

Mediante el equipo Wheel Tracking Test se pueden representar la condición de carga que sufre un pavimento al paso del tránsito sobre probetas con y sin interposición de un material geosintético, con el fin de observar el comportamiento de la mezcla asfáltica de rodamiento ante el ahuecamiento y la fisuración ascendente.

Considerando el método 1 con la cara frontal descubierta, y para el caso de no utilizar un material geosintético entre capas “blanco”, la capa asfáltica de refuerzo manifestó cierto desplazamiento lateral como consecuencia de las condiciones de borde del ensayo: temperatura de 60 °C, cara sin confinamiento y carga de rueda, como pudo observarse en la Figura 14.

Los materiales FM PP y RBK PET presentan una conformación plana (Figura 4), donde las fibras están dispuestas en la estructura del material, esto favorece el desplazamiento de la mezcla asfáltica a diferencia de los materiales MAC PET y HSK PET donde la estructura de malla abierta permite confinar el esqueleto granular, ofreciendo restricción al desplazamiento de la mezcla asfáltica, Figura 20.

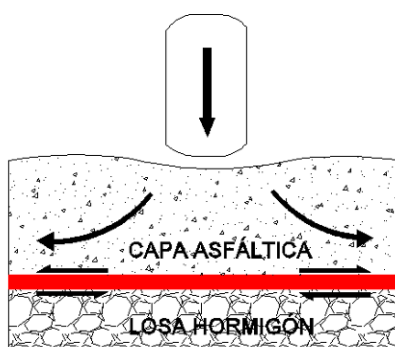


Figura 20. Esquema de funcionamiento del material geosintético ante el potencial ahuellamiento.

Para que este esquema de funcionamiento tenga validez es imprescindible que exista buena adherencia entre los materiales que conforman el sistema.

Si bien el ensayo con las caras confinadas difiere del ensayo que deja la cara frontal expuesta, permitiendo el desplazamiento de la mezcla, los

valores de deformación vertical se condicionan según la estructura de los materiales utilizados.

En cuanto a los ensayos de propagación de fisuras, la Figura 16 y Figura 18 permiten observar el comportamiento de la fisura conforme incrementan los ciclos de carga.

Se observa para el sistema de referencia “Blanco” que la fisura crece sin restricción alguna para ambas temperaturas, iniciándose sobre la capa asfáltica pasados los 132 ciclos cuando se considera el ensayo a 60 °C, mientras que a 25 °C los ciclos necesarios para que se inicie son 264.

Se observa que los materiales geosintéticos trabajan efectivamente. Para el ensayo de WTT a 60 °C cuando se utilizan materiales de malla abierta (MAC PET y HSK PET), la fisura alcanza una altura de 8,5 mm. en promedio sobre la capa asfáltica, y una altura de 16 mm. cuando se consideran materiales compuestos que cubren toda la superficie (FM PP y RBK PET).

Para el ensayo realizado a 25 °C, la fisura alcanza una altura de 30 mm en promedio sobre la capa asfáltica y una altura de 40 mm cuando se consideran los materiales compuestos.

Los ciclos necesarios para que la fisura alcance la superficie de la capa de refuerzo fueron mayores en los ensayos realizados a 25 °C de temperatura.

Es importante comentar que la progresión de la fisura esta estrechamente ligada con la conformación del esqueleto granular de la mezcla asfáltica ya que la fisura recorre la interfase entre agregado y mástic asfáltico.

Se evidencia el trabajo efectivo realizado por los materiales geosintéticos, al presentar un escalón,

materializado por una detención de la propagación de la fisura con el aumento de los ciclos de carga. Esto se aprecia en los primeros ciclos, una vez que la fisura propaga hasta la ubicación del material y detiene su camino como consecuencia del trabajo del geosintético en absorber parte de la energía de propagación de la fisura. Una vez que la fisura crece por sobre la ubicación del material geosintético, esta lo hace con menor tasa de propagación debido a que el material geosintético sigue trabajando.

En los casos que consideran un material geosintético, la fisura manifiesta un re direccionamiento de la fisura hacia una horizontal para luego propagar verticalmente una vez superado la posición del material geosintético. Esto se puede observar en la Figura 19 (a), y se debe al efecto costura que el material geosintético ofrece.

La temperatura de ensayo ha sido un condicionante para el desarrollo y la visualización de la propagación de la fisura. A 25 °C la mezcla se comporta rígida favoreciendo la visualización del crecimiento de la fisura mientras que a 60 °C la deformación de la mezcla permite que la fisura se cierre por las deformaciones sufridas por el paso de la rueda de carga. Por lo tanto, la temperatura debe ser seleccionada de acuerdo a la región donde se apliquen los materiales con el fin de representar lo más real posible las condiciones de trabajo a la cual se verán sometidos.

#### **4. CONCLUSIONES**

Se constata que el ahuellamiento sufrido por el paso de una rueda de carga se ve reducido cuando se utiliza un material geosintético en

comparación con el sistema que no considera la interposición de estos materiales.

La interposición de un material geosintético mejora la resistencia de la carpeta asfáltica al ahuellamiento a través de la distribución de tensiones, mediante un anclaje mecánico, con mayor ventaja por parte de los materiales de malla abierta, producido entre el material geosintético y la masa asfáltica.

En cuanto a la propagación de fisuras, se concluye que los materiales geosintéticos aportan un notable beneficio, en mayor o menor medida dependiendo de su conformación química y estructural, cuando se los interpone con objeto de prevenir la progresión de una fisura que tiende a crecer hacia la superficie, logrando aumentar la vida útil de los pavimentos.

El factor de efectividad FEF determinado para los diferentes sistemas demuestra el beneficio de los materiales, siendo entre 25 y 30 veces superior en el caso de malla abierta (HSK PET y MAC PET) y 3 a 4 veces superior para los materiales compuestos (FM PP y RBK PET), en comparación con el sistema que no considera la interposición de un material geosintético "Blanco".

Se concluye que para el ensayo de rueda de carga (WTT) los materiales geosintéticos no eliminan el problema del reflejo de la fisura pero sí lo retardan considerablemente.

#### **5. REFERENCIAS**

- l) Romero Rojas Giomar Erick. Estudio Del ahuellamiento en la carretera IIRSA Norte, Tramo 6, Sector Óvalo Caceres-DV Sullana Piura, 165 p. (2012).

- II) Thenoux Z., Guillermo; Carrillo O., Héctor. Análisis de casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas chilenas. Santiago, Chile. (2002).
- III) Páez, Diego; Pereira, Henry. Estudio de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas. Universidad. De los Andes. Bogotá, Colombia (2001).
- IV) Angelone, Maria Silvia. Comportamiento de materiales viales. Diseño y control de mezclas asfálticas frente a la deformación permanente. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Rosario. Argentina. 150 p. (2013)
- V) Baek J.; Al-Qadi I. L.; Buttlar W. G. Effect of Field Condition Parameters on the Performance of Geosynthetic Based Interlayer Systems Used to Control Reflective Cracking in Hot-Mix Asphalt Overlays. Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1473–1476. (2010).
- VI) Laerte Guia Maroni. El uso de geotextiles en repavimentación asfáltica. Una experiencia resiente. Revista carreteras N° 140. Argentina. (1993).
- VII) Valnestraete A., Francken L. and Bondt H. Prevention of Reflective Cracking in Pavements. Modelling and structural desing of overlay system. 77-90. RILEM Report18. Published in 1997 by E & FN Spon, 2–6 Boundary Row, London SE1 8HN. ISBN 0-419-22950-7. (2005).
- VIII) Koerner, Robert. Desing with Geosynthetic. Fifth edition. ISBN: 0-13-145415-3. 818 p. (2005)