

REFLEJO DE GRIETAS EN PAVIMENTOS REFORZADOS CON GEOSINTÉTICOS

Paulina Leiva Padilla¹, Luis Guillermo Loria Salazar²,
José Pablo Aguiar Moya³, Fabricio Leiva Villacorta⁴

¹ Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr

² Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

³ Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, jose.aguiar@ucr.ac.cr

⁴ Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, fabricio.leiva @ucr.ac.cr

Resumen

La adecuada gestión de una red carretera, involucra la planificación apropiada de los mantenimientos, las rehabilitaciones y las reconstrucciones necesarias que permitan garantizar su adecuado desempeño, tanto durante la puesta en servicio como durante la vida de diseño.

La rehabilitación con sobrecapas asfálticas, es una de las metodologías más comúnmente utilizadas en esta rama. El principal problema asociado a esta tecnología es el fenómeno de reflejo de las grietas existentes a la nueva capa, que constituye uno de los factores más significativos en el deterioro de los pavimentos.

Con la finalidad de aplazar los efectos que este problema genera, se han utilizado sistemas intercapa de alivio de esfuerzos, cuya funcionalidad pretende absorber parte de la energía generada en las discontinuidades de la grieta, de manera que se alargue la vida de la técnica de rehabilitación aplicada.

El presente documento recopila los resultados obtenidos de la aplicación del ensayo de evaluación de sobrecapas, propuesto en 1970 por Claros y Lytton [1] en Texas, a núcleos extraídos de un tramo de prueba experimental anti-reflejo de grietas, construido por una sobrecapa asfáltica de 5 cm de espesor colocada sobre un geotextil no tejido como sistema intercapa entre esta capa y la superficie inmediata inferior de mezcla asfáltica de 7 cm de espesor. Todo el sistema anterior se encuentra sobre una capa de 10 cm de base granular, seguida por 15 cm de subbase granular y finalmente el suelo natural que actúa como subrasante.

De la investigación se verifica que, cuando se colocan este tipo de materiales, ocurre un incremento en la vida a fatiga del sistema, con un patrón de agrietamiento que se extiende a lo largo de la interfaz geotextil-mezcla asfáltica en la mayoría de los casos, propagándose finalmente hacia la superficie.

Palabras clave: reflejo de grietas, geosintéticos, pavimento, sobrecapa

1 Introducción

Para una gestión adecuada de una red carretera, el mantenimiento, la rehabilitación y la reconstrucción son tareas imprescindibles que permiten garantizar su adecuada funcionalidad y capacidad estructural. Existen varias técnicas para determinar la funcionalidad de una carretera tales como el Índice de Serviceabilidad Presente (PSI por sus siglas en inglés) desarrollado por la AASHTO a finales de los años 50, el Índice de Condición Presente (PCI por sus siglas en inglés) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, o la metodología del VIZIR, muy aplicada por los franceses.

El agrietamiento por fatiga en la capa asfáltica es uno de los deterioros más comunes de los pavimentos flexibles; éste se ve agravado en Costa Rica por las condiciones de humedad características tanto de los materiales granulares como las inducidas adicionalmente por el daño por humedad. Esto, porque al estar los materiales granulares en condiciones de saturación parcial elevadas en buena parte del año, las deformaciones y esfuerzos a tensión en las fibras inferiores de las capas asfálticas son mayores, asimismo, la pérdida de adhesión y cohesión de la capa de mezcla asfáltica, provoca un efecto similar. Por lo tanto, la adecuada caracterización del fenómeno de reflejo de grietas, su consideración en el diseño estructural de pavimentos así como el diseño de materiales que mitiguen la propensión a este fenómeno, es fundamental para que las sobrecapas asfálticas tengan una vida útil mayor y que se optimice el uso de los recursos destinados a dicha tecnología.

El perfilado de la capa asfáltica y la colocación de una nueva sobrecapa, incluyendo el uso de materiales geosintéticos como medio para retardar el reflejo de las grietas existentes, es una de las metodologías alternas y de mayor aplicación, para la reparación de este deterioro y proveer la extensión de la vida útil de todo el pavimento

Las investigaciones en este campo aún requieren un mayor desarrollo para definir con exactitud las metodologías de diseño estructural, de diseño de materiales, técnicas constructivas y los tipos de geosintéticos apropiados para cada caso en particular. En este sentido debe indicarse que a pesar de extensos estudios de laboratorio y campo que han buscado generar metodologías estándar para el diseño de capas de alivio de esfuerzos o anti-reflejo de grietas que usen geosintéticos, aún no hay consenso en la comunidad ingenieril sobre qué método es el más adecuado. Por lo tanto, hay una buena fundamentación en realizar nuevas investigaciones que permitan analizar de una manera integral, el funcionamiento de estos materiales al ser utilizados en la rehabilitación de pavimentos.

El presente documento muestra los resultados obtenidos de la ejecución del ensayo para sobrecapas asfálticas del Departamento de Transportes de Texas, normado a través del procedimiento Tex-248-F; a núcleos extraídos de un tramo de prueba en campo, donde se colocaron 7 cm de capa asfáltica, sobre un geotextil no tejido como sistema contra el reflejo de las grietas existentes en la capa asfáltica inmediata inferior, cuyo espesor es 7 cm, y que se encuentra colocada sobre una base granular de 10 cm, una subbase de 15 cm y finalmente el suelo natural de subrasante de 35 MPa de módulo. Adicionalmente, para cuantificar la propagación de la grieta durante el ensayo, se realizaron observaciones visuales mediante el uso de cámara de alta definición a los especímenes previamente pintados y cuadrículados.

2 El fenómeno del reflejo de grietas en pavimentos

De acuerdo con las investigaciones de Youm [2] en el tema de la reducción del reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas se remontan a la década de los 30. Algunas de las recomendaciones de esa época proponían incrementos en el espesor de la sobrecapa, el uso de aditivos, antiadherentes en las juntas y el uso de sistemas intercapas absorbentes de esfuerzos. Sin embargo; a pesar de estos más de 80 años de investigación, aún no se ha establecido una solución universalmente aceptada para el tratamiento de este fenómeno [3].

El desarrollo del reflejo de grietas en sobrecapas asfálticas en general, está asociado con la proyección de las grietas presentes en la capa superficial del pavimento existente, hacia esta nueva capa, producto de los movimientos generados por cargas de tráfico y cambios medioambientales. El fenómeno puede ocurrir debido a agrietamientos presentes en las capas de mezcla asfáltica en caliente existentes -foco de esta investigación-, agrietamientos producto de la retracción térmica de bases estabilizadas con cemento y por reflejo de las juntas de losas de concreto cuando se coloca una capa de mezcla asfáltica como tratamiento de rehabilitación en un pavimento rígido.

Según la teoría de la mecánica de la fractura, las grietas pueden ser clasificadas de acuerdo a tres modos de carga: abertura (modo I), cuando la carga se aplica en dirección normal al plano de la grieta; cizalladura (modo II), cuando la carga se aplica en dirección cortante al plano de la

grieta y tiende a deslizar una cara sobre la otra (junto con el modo I, pueden representar adecuadamente el efecto por las cargas de tráfico); y desgarre (modo III), cuando la carga se aplica fuera del plano de cortante, las superficies de la grieta se mueven paralelas a su plano en ambas direcciones y regresan a su estado original [4,5].

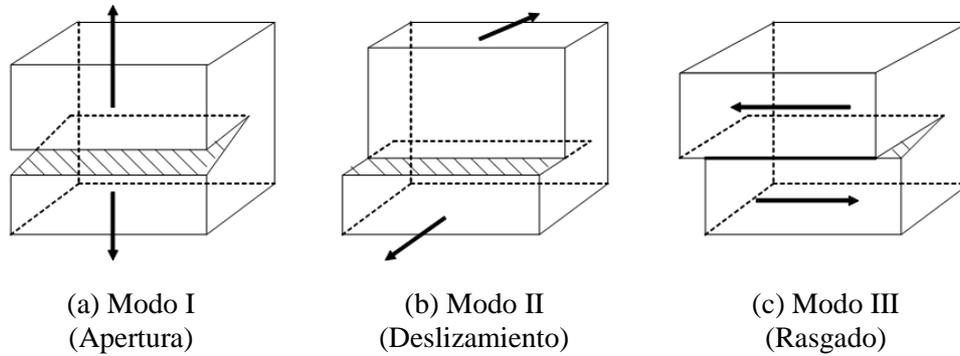


Figura 1 Modos de propagación de la grieta [4]

De acuerdo con Caltabiano [3] y Leford et al. [6], Goacolou y Marchand en 1997 comentan que la progresión de la grieta a través de la sobrecapa se puede describir visualmente según la dirección de proyección y el sistema de adherencia, para la definición de tres tipos de estructuras: agrietada con interfaz unida, agrietada con interfaz separada y separada con traslación de la grieta.

3 Fundamentos de la energía disipada

El concepto de la energía disipada empezó a utilizarse en 1975 cuando Van Dijk encontró una relación matemática entre la energía acumulada y el punto de falla. Esta relación se considera única, ya que no depende del modo de carga, el nivel de esfuerzos, la frecuencia o el período de descanso [7].

Matemáticamente, el cálculo de la energía utilizada durante la ejecución de un ensayo de carga dinámica, se puede determinar como el área bajo la curva esfuerzo-deformación obtenida (Ecuación 1). Para materiales lineal-elásticos, estas curvas coinciden, ya que el material no almacena energía; mientras que en materiales viscoelásticos, se convierten en ciclos histeréticos donde, el área contenida dentro de cada ciclo corresponde a la energía disipada. Esta energía puede ser transferida en forma de calor o daño [8].

$$\text{Energía disipada} = \pi \sigma_i \varepsilon_i \text{sen } \phi_i \quad (1)$$

donde, σ_i es la amplitud del esfuerzo en el ciclo i , ε_i es la amplitud de la deformación en el ciclo i , y ϕ_i es el ángulo de fase entre el esfuerzo y la deformación en el ciclo i .

Para el análisis de fatiga en las mezclas asfálticas, Shen y Carpenter [8] mencionan el estudio de Ghuzlan y Carpenter del 2000, donde se utiliza el término del cambio en el valor de la energía disipada para definir el daño y el desempeño a la falla del espécimen (RDEC).

El RDEC, según se muestra en la Ecuación 2, se refiere a la razón entre el cambio de la energía disipada entre el ciclo i y el ciclo $i+1$ (ΔDE) y la energía disipada en el ciclo original (DE en el ciclo i) [9].

$$RDEC_a = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a * (b - a)} \quad (2)$$

donde, $RDEC_a$ es el cambio de la energía promedio al ciclo a , y; DE_a , DE_b es la energía disipada en el ciclo a y b .

Durante el ensayo, el valor de RDEC descende, debido a un reajuste microestructural interno del material, hasta que llega a un punto donde mantiene un valor constante (conocido como Plateau Value, Ecuación 3), por la acumulación del daño. Tal como se muestra en la Figura 2, una vez que el espécimen ha fallado (cuando se sobrepasa el número de ciclos que llevan a una reducción del 50% de la rigidez), este valor vuelve a incrementar.

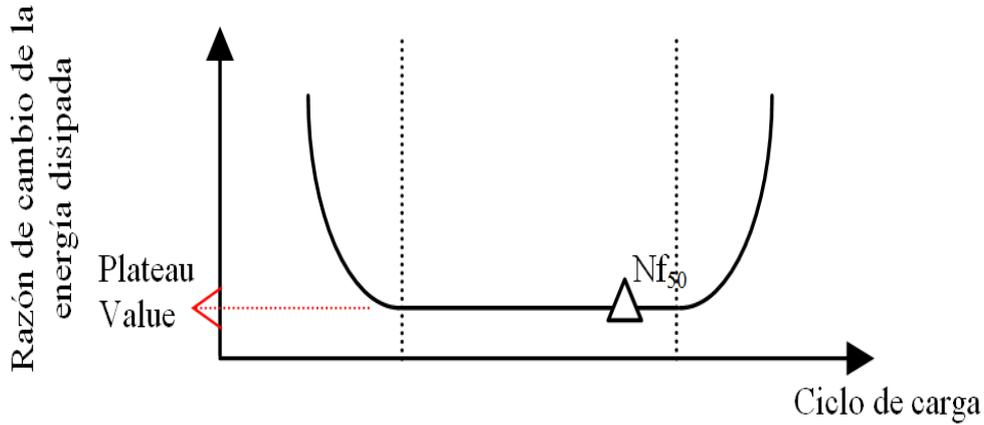


Figura 2 Relación entre RDEC y No. de ciclos

$$Plateau\ Value = \left[1 - \left(1 + 100/N_{f50} \right)^f \right] / 100 \quad (3)$$

donde, N_{f50} es el número de ciclos a una reducción del 50% de la rigidez; y, f es la pendiente de regresión de la relación entre el DE y el número de ciclos sobre el N_{f50} .

4 Ensayo de fatiga para sobrecapas de Texas

De acuerdo con [10] el primer ensayo para sobrecapas fue diseñado en 1970 por Claros y Lytton. Como se muestra en la Figura 3, el sistema consiste en pegar con resina un espécimen rectangular con extremos redondeados, construido a partir de un cilindro de 150 mm de diámetro y 62 mm de altura; sobre dos placas de acero separadas 2 mm entre sí. Con la finalidad de simular el efecto de abertura y cierre de las grietas en los sistemas de sobrecapa asfáltica en fatiga, la separación entre placas se incrementará hasta los 6.35 mm para luego regresar a los 2 mm en períodos de carga y descarga de 5 segundos.

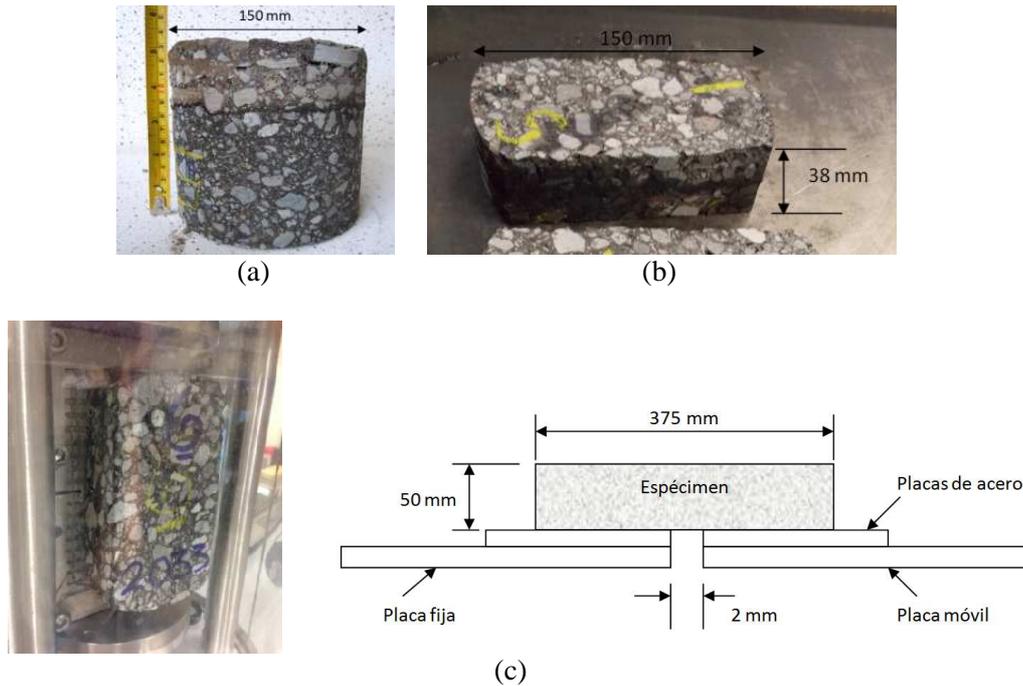


Figura 3 Espécimen y sistema de ensayo (a) Espécimen original, (b) Espécimen final y (c) Sistema completo

Durante la realización del ensayo, según Zhou y Scullion [11], se identifican tres fases que describen el comportamiento de la grieta en el sistema:

Fase I: Iniciación de la grieta y propagación temprana

A lo largo de esta fase, la carga aplicada y el desplazamiento tienen formas similares a lo largo del tiempo, ocurriendo primero un incremento en la carga al aumentar el desplazamiento; posteriormente, se espera una disminución rápida de la carga, conforme la grieta empieza a propagarse a través del espécimen. Generalmente esta fase dura solamente 2 ciclos y la carga máxima se da unos segundos previos a la aplicación del desplazamiento máximo.

Fase II: Propagación tardía

Esta fase se caracteriza por un lento descenso en el valor de la carga máxima aplicada. Tanto el desplazamiento aplicado como la carga necesaria para lograrlo aún se encuentran en fase durante esta etapa.

Fase III: Falla

En esta parte del ensayo, la grieta se ha extendido completamente a lo largo de todo el espécimen y la carga requerida experimenta saltos en la curva durante su aplicación.

Según el protocolo de ensayo Tex-248-F, el criterio de falla de este ensayo se establece al alcanzar el 93% de la reducción de la carga inicial aplicada, que es el momento donde se espera que la grieta haya alcanzado todo el espesor del espécimen.

Para analizar la falla a fatiga del ensayo, Ma [7] propone el uso de la norma ASTM D7460: Método estándar para la determinación de la falla a fatiga de concreto asfáltico sujeto a flexión repetida. Esta norma establece que el punto de falla a fatiga se como el pico máximo de la curva obtenida de graficar la carga normalizada contra el número de ciclos (Figura 4).

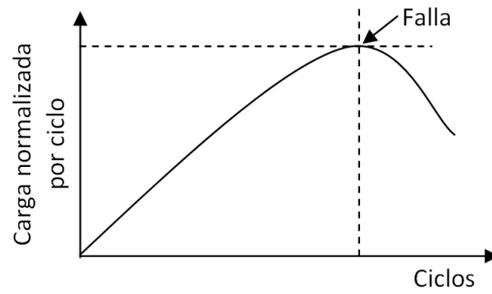


Figura 4 Curva carga normalizada por número de ciclos

Donde la carga normalizada se determina mediante la Ecuación 4.

$$NLC = \frac{P_i N_i}{P_1 N_1} \quad (4)$$

donde, NCL es la carga normalizada por ciclo (kN/kN) (siglas en inglés), P_i es la carga pico en el ciclo número i (kN), P_1 es la carga pico en el primer ciclo (kN), N_i es el ciclo número i , y N_1 es el número de ciclo al cual P_1 es estimado.

5 Metodología

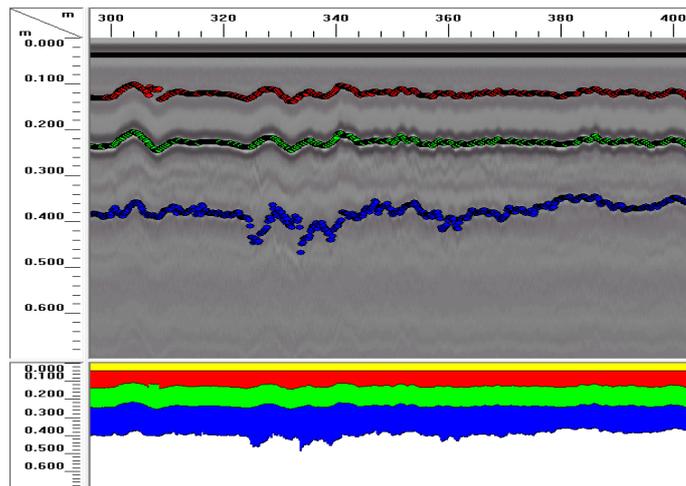
La investigación consistió en la realización del ensayo de sobrecapas, normado por el Departamento de Transporte de Texas bajo la norma Tex-248-F, a nueve núcleos extraídos de un tramo de prueba en campo, donde se colocó una sobrecapa asfáltica de 7 cm de espesor, sobre un geotextil no tejido como estrategia para el retardo del reflejo de las grietas presentes en la capa asfáltica superficial existente de 7 cm. Todo el sistema anterior se encuentra sobre una base granular de 10 cm, una subbase de 15 cm y finalmente el suelo de subrasante de 35 MPa de módulo. La Figura 5 muestra el material geotextil colocado, los especímenes extraídos de campo y las dimensiones del paquete estructural.



(a) Geotextil no tejido



(b) Núcleo extraídos del tramo de prueba



(c) Estructura del tramo obtenida con el Georadar de Penetración

Figura 5 Tramo de prueba

Con la finalidad de analizar el fenómeno de reflejo de la grieta de la carpeta existente a la nueva, seis de los nueve especímenes de ensayo se prepararon de manera que el geotextil quedara colocado a la altura media del espécimen, dejando parte de la carpeta antigua en el inferior, y parte de la carpeta asfáltica nueva en la superficie. Es importante mencionar que los

primeros tres de estos especímenes fueron extraídos en el mes de abril del año 2014 y los tres restantes en enero del 2015, de manera que se pudiese caracterizar el efecto del tiempo en el desempeño del sistema.

Como complemento a lo anterior, y para lograr caracterizar por separado el desempeño del nuevo sistema, los restantes tres especímenes extraídos en abril del 2014, fueron confeccionados de manera que el material geotextil quedó adherido directamente a las placas, dejando únicamente la capa nueva en la superficie.

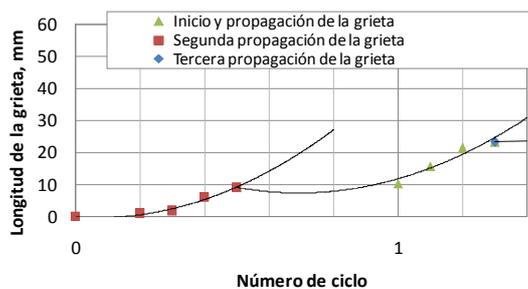
Para los especímenes extraídos en abril del 2014, el ensayo fue realizado siguiendo los lineamientos establecidos en la norma Tex-248-F, que estipula la aplicación de 1200 ciclos de desplazamiento, buscando una reducción del 93% de la carga inicial requerida mediante la fatiga del espécimen.

Debido a que al completar los 1200 ciclos de carga el espécimen aún no había fallado, se decidió modificar la norma y aplicar 2000 ciclos al 99% de la reducción de la carga inicial máxima a los tres especímenes restantes.

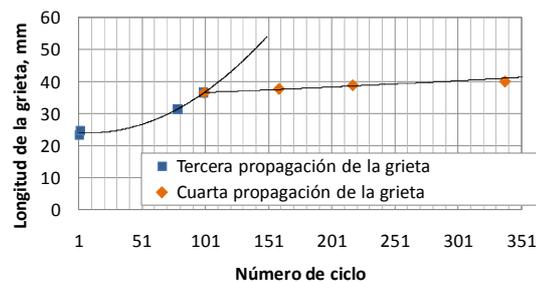
Con la finalidad de analizar el comportamiento a fatiga de los especímenes, se utilizó el concepto de la energía disipada, en conjunto con observaciones visuales del crecimiento de la grieta, mediante el uso de videos de alta resolución de la ejecución del ensayo. Los correspondientes resultados se discutirán en la siguiente sección.

6 Resultados

Partiendo de la observación visual realizada por medio de la grabación en cámara de video de alta definición, en la Figura 6 se muestra el crecimiento de la grieta con respecto al número de ciclos. De estos resultados se puede observar una primera fase de propagación que ocurre hasta que la grieta llega a la interfaz con el geotextil, posteriormente, se da un período donde esta tiende a seguir la línea de la interfaz mezcla asfáltica-geotextil, siendo este último el que asume la mayoría de la carga aplicada, hasta un punto donde se puede observar nuevamente la propagación de la grieta hacia la superficie, que corresponde a la pérdida de adherencia entre el geosintético y la mezcla asfáltica, que ocurre de esta forma por las dimensiones del espécimen de ensayo, ya que en campo se espera que el geosintético siga tomando carga hasta su "rasgado" y por tanto, la finalización de su aporte estructural.



(a) 0 a 1.4 ciclos de carga



(b) 1.4 a 351 ciclos de carga

Figura 6 Crecimiento de la grieta, Especímen 1, 2000 ciclos al 99% de reducción de la carga

De acuerdo con Lytton (1989) el modo de falla determina el tipo de material que se colocó en la sobrecapa, con lo que pueden distinguirse tres tipos comunes de falla: Modo I. La grieta en la capa existente continúa propagándose hacia la superficie; Modo II. La grieta en la capa existente llega a la interfaz inferior con el geosintético y sigue propagándose paralelamente, de manera que se genera un plano de deslizamiento en esta localidad; y Modo III. La grieta en la capa existente llega a la interfaz con el geosintético, luego inicia un nuevo proceso de agrietamiento en la superficie, que se propaga hacia el interior.

Si el material sigue los modos I y III, va a actuar como una capa de alivio de esfuerzos, mientras que si sigue el modo II, va a funcionar como un refuerzo, esto solamente ocurre, si su

módulo es más grande que el del material que lo rodea. Los resultados obtenidos durante el ensayo, muestran una mezcla entre los modos I y II, siendo el modo II el más influyente, por lo que podría decirse que el geotextil está trabajando principalmente como un sistema de refuerzo. La Figura 7 muestra la condición de los especímenes una vez ejecutado el ensayo; en todas las condiciones, predomina la proyección de la grieta en la interfaz, y con una postergada propagación hacia la superficie.



(a) 1200 ciclos al 93% de reducción de la carga, geotextil a la altura media



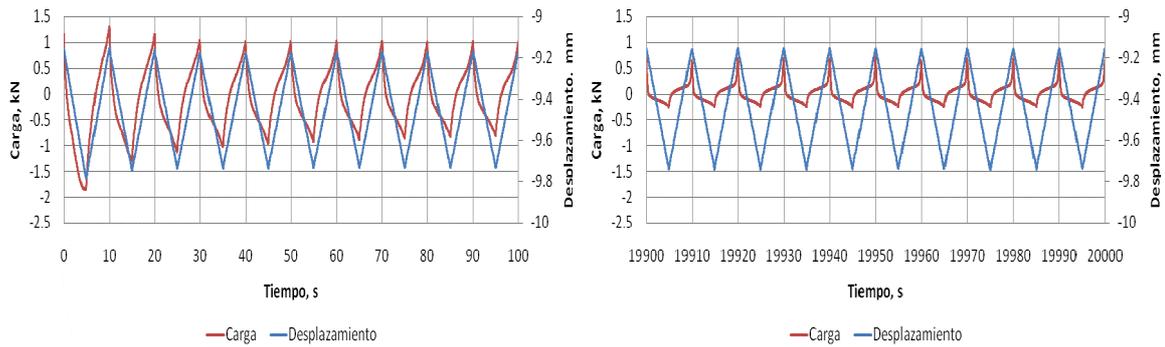
(b) 1200 ciclos al 93% de reducción de la carga, geotextil en el inferior



(c) 2000 ciclos al 99% de reducción de la carga, geotextil a la altura media

Figura 7 Especímenes fallados

Evaluando la carga requerida durante el ensayo para mantener el desplazamiento requerido de la prueba (6.35 mm entre placas, partiendo de los 2 mm establecidos para el ensayo), la Figura 8 permite determinar que no ocurre la falla total del espécimen, ya que no se dan saltos en la curva de carga aplicada que indiquen que el sistema ha perdido capacidad para resistirla.



(a) Fase inicial

(b) Fase final

Figura 8 Respuestas desplazamiento - Carga, 2000 ciclos al 99% de reducción de la carga

Tomando en cuenta el procedimiento establecido en la norma ASTM D7460, para la determinación de la carga normalizada por ciclos, de acuerdo a lo que se puede observar en la Figura 9, no se encuentra evidencia de falla total del espécimen, ya que solo se muestran las fases I y II del ensayo, correspondientes al descenso importante y brusco de la rigidez, asociado a efectos no lineales como por ejemplo el reacomodo de las partículas, seguido por una fase cuasi estacionaria, donde el módulo decrece en forma lineal. La fase III no está presente, ya que como se verificó en la ejecución del ensayo, corresponde a la interconexión de las macrogrietas y el fallo total de la probeta, que por la presencia del material geosintético no llega a darse.

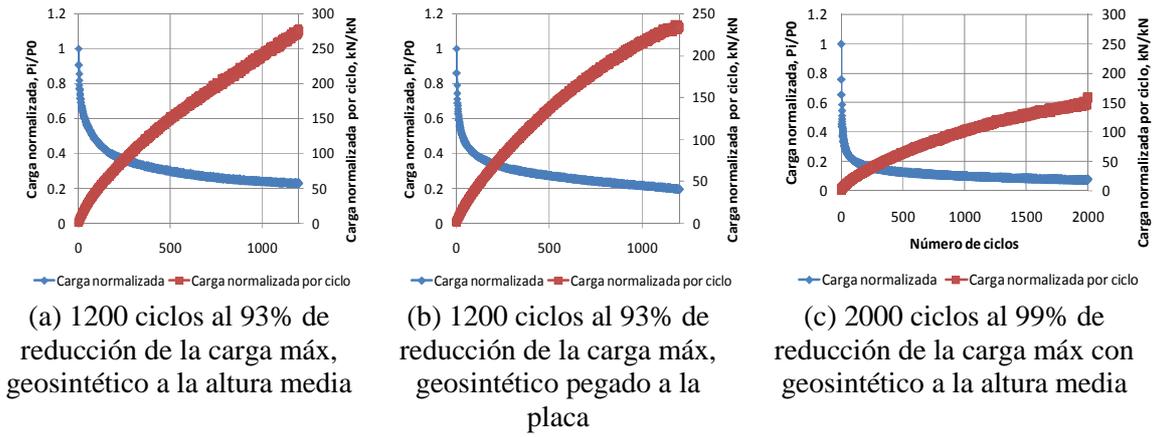


Figura 9 Ciclos a la falla

Complementariamente, considerando el enfoque de la energía disipada, la Figura 10 muestra los ciclos histeréticos obtenidos a los 1, 10, 100, 1000 y 1200 o ciclos para cada espécimen ensayado. La distorsión de estos círculos, evidencian el daño y las deformaciones plásticas ocurridas, por la pérdida de energía por parte de la mezcla (disipación de energía), lo cual se reitera en la Figura 11.

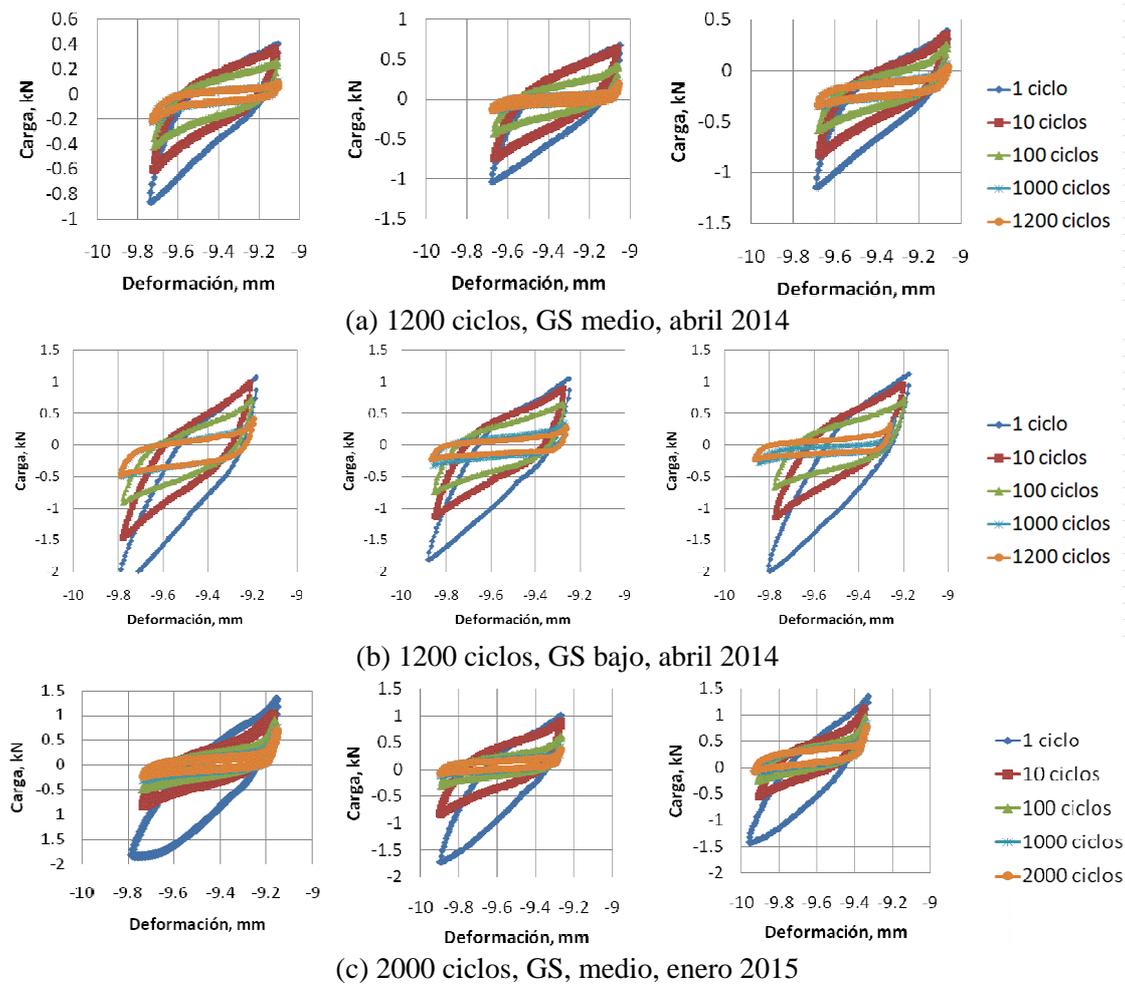
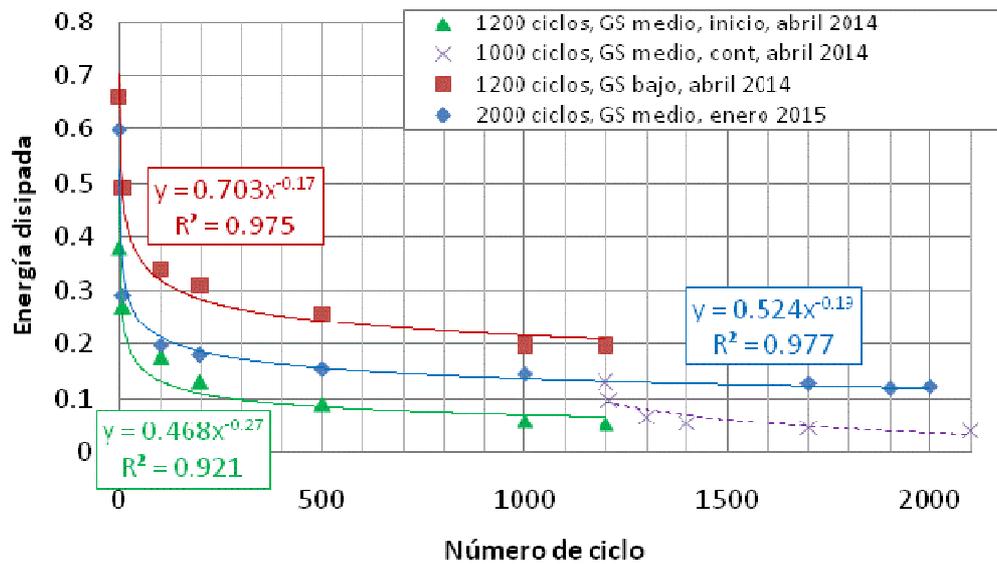


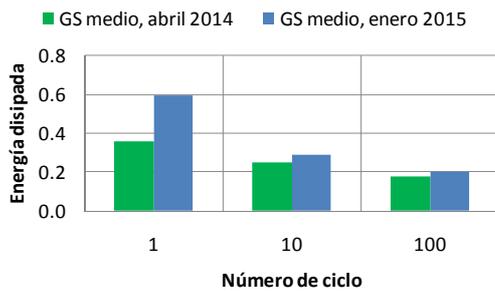
Figura 10 Ciclos histeréticos

Adicionalmente, de la Figura 11 es posible observar un aumento en la resistencia a la fatiga con el tiempo del sistema sobrecapa con geosintético, debido a la menor pérdida de energía de estos especímenes durante el ensayo, representada en el desplazamiento hacia arriba de la curva azul con marcadores de rombo, -correspondientes a los especímenes extraídos y ensayados en abril del 2014-, con respecto a la curva verde con marcadores de triángulo -correspondientes a los especímenes extraídos y ensayados en enero del 2015-. Estos resultados pueden ser debidos a la compactación del mezcla con el tráfico durante los primeros meses y los procesos tempranos de envejecimiento del material.

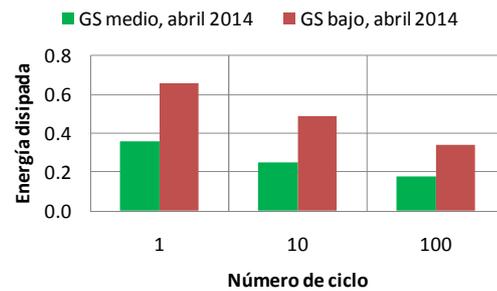
El mismo desplazamiento de la curva sucede con el desempeño del sistema cuando se considera solamente el geotextil y el material nuevo superior; sin embargo, es importante mencionar que en este caso, la adherencia del epóxico entre la placa y el geotextil es mayor que la que podría darse realmente en campo, lo que podría estar influenciando en la diferencia de los resultados (Figura 11).



(a) Curva energía disipada



(b) Influencia del tiempo en la energía disipada



(c) Sistema a la altura media y en el inferior del espécimen

Figura 11 Energía disipada

Seguidamente, con base en los resultados anteriores, se determinó la curva de la razón de la energía disipada que se muestra en la Figura 12. Nuevamente, no se puede dar evidencia de la falla total del espécimen; sin embargo, se puede mostrar un PV muy bajo -cercano a cero-, que según [12], implica el desarrollo de menor daño por ciclo, que se traduce finalmente en una larga vida a fatiga del sistema.

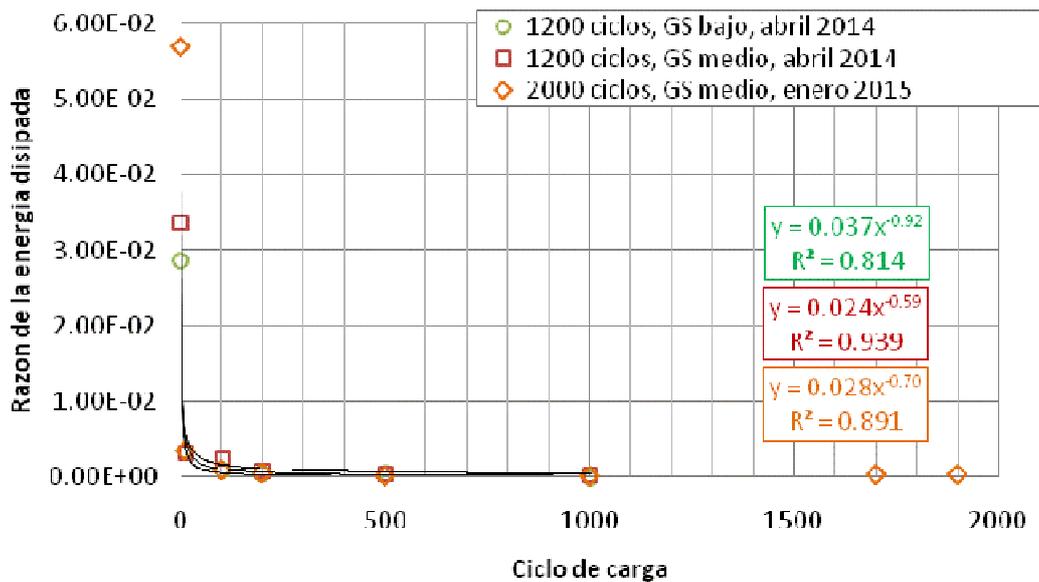


Figura 12. Razón de la energía disipada

7 Conclusiones y recomendaciones

De los resultados anteriores se determina que, el mecanismo de falla más común en los sistemas de sobrecapa asfáltica con uso de geotextiles en la interfaz tiende a dirigir la grieta a lo largo de la interfaz geosintético-capas asfáltica, muy correlacionada con el trabajo mecánico de refuerzo que le confiere al sistema este tipo de materiales, así como con la adherencia entre capas y por tanto, el tipo y dosificación de asfalto utilizada. En este sentido vale la pena recomendar el estudio de la influencia de diferentes dosificaciones de ligante y tipos de sistemas de adherencia para investigaciones posteriores.

Adicionalmente, considerando los comentarios de Ma [7] quien menciona que para mezclas fuertes se requieren 750 ciclos para la falla, y 300 ciclos en otros casos, es posible asegurar que la colocación de geotextiles en sistemas de sobrecapa asfáltica alarga la vida a fatiga de la estructura sobre el 260% de su valor ante el desarrollo de las condiciones reproducidas en este ensayo; sin embargo, es importante mencionar que es necesario complementar este estudio con ensayos adicionales que permitan estudiar el comportamiento del sistema en su totalidad.

Finalmente, el enfoque de la energía disipada es una herramienta de suma utilidad para el estudio del fenómeno de la fatiga en mezclas asfálticas. Durante esta investigación, esta metodología permitió comprender el comportamiento desarrollado por el sistema, de manera que finalmente se recomienda extender la investigación a la realización del mismo ensayo bajo una solicitud mayor de ciclos y una abertura mayor y ensayos similares donde se pueda magnificar el daño y considerar las demás condiciones del sistema, como por ejemplo, el modo II de falla asociado al corte, la ubicación del material geosintético, entre otros; de manera que se pueda predecir la falla total del espécimen y por tanto, el incremento real de la vida del sistema.

8 Referencias

- [1] Lytton, R. "Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete". Geotextiles and Geomembranes (Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, 217-237), 1989: Vol. 8, 217-237.
- [2] Youm, H. "Discrete Element Modeling of Geosynthetic Reinforcement in Pavement Overlays". A dissertation submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2012.
- [3] Caltabiano, M. "Reflection cracking in asphalt overlays". Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Master of Philosophy, 1990.

- [4] Loría, L. "Breve resumen sobre los conceptos más importantes de la mecánica de la fractura". San José, Costa Rica: Boletín técnico Vol. 4. No. 39. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, 2013.
- [5] Anderson, T. "Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications". Third Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [6] Lefort, M., D. Sicard, y P. Merrien. Techniques anti-remontée des fissures: Guide d'emploi en chaussées aéronautiques. Bonneuil-sur-Marne, France: Service technique des bases aériennes, 1999.
- [7] Ma, W. "Proposed Improvements to Overlay Test for Determining Cracking Resistance of Asphalt Mixtures". Auburn: Thesis submitted to obtain the Degree of Master of Science, 2014.
- [8] Shen, S., and S. Carpenter. "Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing". Illinois: Federal Highway Administration, 2007.
- [9] Vargas-Nordbeck, Adriana, Jose Aguiar-Moya, Fabricio Leiva-Villacorta, and Luis Loria-Salazar. "Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Mixes Through the Dissipated Energy Approach". 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2014.
- [10] Zhou, F., S. Hu, and T. Scullion. "Development and verification of the overlay tester based fatigue cracking prediction approach". Austin: Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office. Report 9-1502-01-8, 2007.
- [11] Zhou, F., and T. Scullion. "Upgraded overlay tester and its application to characterize reflection cracking resistance of asphalt mixtures". Austin: Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration. Report 0-4467-1, 2003.
- [12] Prowell, B., et al. "Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt. NCHRP Report 646." National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, 2010.