

Evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento en concretos asfálticos de granulometría abierta

Assessment of susceptibility to cracking in open-graded asphalt concrete.

Maribel Trujillo & Alexandra Ossa

Vías Terrestres, Instituto de Ingeniería UNAM, México, MTrujilloV@ingen.unam.mx

RESUMEN: El daño por agrietamiento es una de las principales fallas en los pavimentos asfálticos de granulometría abierta (OGFC). Esta falla consiste en grietas longitudinales que inician en la superficie del pavimento, cerca de la trayectoria de la rueda, y se propagan hacia la capa inferior. Este fenómeno tiende a incrementarse debido a la presencia de agentes oxidativos en el ambiente a los cuales está expuesto un pavimento durante su vida útil, deteriorando el funcionamiento de las mezclas OGFC.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar la susceptibilidad al agrietamiento de concretos asfálticos de granulometría abierta, acondicionados por periodos de 6, 12 y 18 meses de envejecimiento natural, es decir, expuestos al medio ambiente. Se analizó la influencia del aire, agua y radiación UV en el fenómeno de agrietamiento.

Para el análisis de daño por agrietamiento se fabricaron concretos asfálticos tipo OGFC, tomando en cuenta el factor evolutivo de la edad de envejecimiento de los especímenes. Se evaluó la energía de falla a partir de los resultados de las curvas de carga vs desplazamiento medido (el área bajo la curva de desplazamiento de la carga vs la línea de carga) por el área de la sección transversal del espécimen (el producto del diámetro D y el espesor t del espécimen).

KEYWORDS: Agrietamiento, OGFC, intemperismo, envejecimiento.

1 INTRODUCCIÓN.

Los concretos asfálticos de grado abierto (OGFC, por sus siglas en inglés) se caracterizan por su granulometría abierta, constituida principalmente por agregados de tamaño grueso y una pequeña proporción de finos. Los OGFC presentan un porcentaje de vacíos de aire cercano al 20%, lo cual permite la eliminación eficiente del agua de la superficie del pavimento. Esta característica no solo disminuye el riesgo de hidropilaje, sino que también elimina las salpicaduras generadas por los neumáticos, mejorando así la seguridad de la conducción en condiciones de lluvia (Watson, et al., 2018).

Además, los OGFC proporcionan una superficie rugosa, incrementando el contacto entre los neumáticos y la carpeta asfáltica en comparación con el concreto asfáltico denso. Un estudio realizado en Estados Unidos señaló que las capas de fricción porosas pueden reducir eficazmente la incidencia de accidentes, garantizando la seguridad de los usuarios (De Fortier and Prozzi, 2013). Asimismo, estas capas pueden absorber el ruido del tránsito causado por la interacción entre los neumáticos y la carpeta asfáltica (Ahammed and Tighe et al., 2008).

Investigaciones realizadas por el Departamento de Transporte de California indicaron que las mezclas de clasificación abierta disminuyeron el ruido neumático/pavimento en casi 2 decibelios ponderados (dBA) en comparación con las mezclas densas (Ongel et al., 2008). Liu et al. (2016) aplicaron pavimento asfáltico poroso en calles urbanas, logrando una reducción significativa del ruido producido por el tránsito. Debido a estas ventajas, el pavimento OGFC se presenta como una de las opciones más favorables para la pavimentación de superficies carreteras.

No obstante, el pavimento OGFC presenta un problema

recurrente: su durabilidad insuficiente, atribuida a la débil unión entre los agregados, lo que provoca el deterioro de la carpeta. Esta fragilidad se intensifica debido al elevado contenido de vacíos de aire en la mezcla OGFC, haciéndola más susceptible a las tensiones ambientales externas, tales como el envejecimiento oxidativo y ultravioleta, así como la exposición a la humedad (Apostolidis et al., 2020).

El envejecimiento del cemento asfáltico podría acelerar el deterioro por agrietamiento de los concretos OGFC, incrementando la presencia de grietas originadas por los esfuerzos de tensión generados por la interacción neumático-pavimento (Liu et al., 2020; Lv et al., 2020; Gu et al., 2015). Por lo tanto, es crucial evaluar cómo diversas condiciones de envejecimiento pueden afectar la resistencia al agrietamiento de los pavimentos OGFC.

Los investigadores han realizado diversas pruebas de laboratorio para evaluar el potencial de agrietamiento de las mezclas asfálticas, destacando la prueba de resistencia al agrietamiento por tensión indirecta en mezclas asfálticas (IDEAL-CT). Se ha demostrado que la resistencia al agrietamiento de las mezclas asfálticas, determinada mediante el IDEAL-CT, guarda una fuerte correlación con el rendimiento en campo en términos de fatiga, reflexión y agrietamiento térmico (Zhou et al., 2017).

En consecuencia, este estudio evaluará concretos asfálticos tipo OGFC expuestos a distintos periodos de envejecimiento por intemperismo, sometiéndolos a variaciones de humedad, radiación UV y diversas temperaturas. El propósito principal es analizar cómo estos factores influyen en la resistencia al agrietamiento de los pavimentos.

2 MATERIALES Y DISEÑO DE LA MEZCLA

Para realizar esta investigación, se fabricaron una serie de especímenes de concreto asfáltico de grado abierto utilizando cemento asfáltico convencional. Los especímenes se expusieron a la intemperie para reproducir las condiciones reales de envejecimiento a las que se somete el pavimento asfáltico durante su vida útil, con el fin de evaluar posteriormente su susceptibilidad al agrietamiento.

2.1 Materiales

2.1.2 Cemento asfáltico y proceso de modificación

En esta investigación, se utilizó cemento asfáltico convencional con una clasificación PG 64-22. Posteriormente, el cemento asfáltico fue sometido a una caracterización detallada basada en su viscosidad (ASTM D2171) y grado de rendimiento (ASTM D6373). Se realizaron mediciones tanto en el estado original del cemento asfáltico como después de someterlo a procesos de envejecimiento a corto y largo plazo, utilizando el horno de envejecimiento a presión (RTFO) y la vasija a presión (PAV), respectivamente. Los detalles específicos de esta evaluación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización del cemento asfáltico.

Prueba	Convencional	Norma ASTM
Cemento asfáltico sin envejecimiento		
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo	68	D-2170
Viscosidad Saybol-Furol a 135° C; s, mínimo.	120	4402
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo.	280	D-92
Punto de reblandecimiento; °C.	55	D-1525
Cemento asfáltico envejecido por RTFO		
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo.	41	D-2170
Punto de reblandecimiento; °C.	63	D-1525
Cemento asfáltico envejecido por PAV		
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo.	25	D-2170
Punto de reblandecimiento; °C.	75	D-1525

2.1.3 Agregado pétreo

En el presente estudio, se empleó basalto como agregado pétreo, con un tamaño máximo nominal de 13 mm de gradación OGFC. Para su caracterización, se llevaron a cabo pruebas de origen y consenso, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Pruebas de origen y consenso del agregado pétreo.

Prueba	Norma	Resultados	Especificación
Equivalente de arena (%)	ASTM D5821	68.63	45 min
Angularidad del agregado grueso (%)	ASTM D5821	100/100	95/90 min
Angularidad del agregado fino (%)	ASTM C1252	47.37	45 min
Forma de partícula	ASTM D4791	2	10 máx.
Desgaste los Angeles (%)	ASTM C131	13.38	35 máx.
Intemperismo acelerado	ASTM C128	4.76	10 máx.

2.2 Diseño de la mezcla

En la elaboración de las mezclas, se aplicó una distribución granulométrica abierta, representada en la Figura 1, y se estableció un objetivo de vacíos de aire promedio del 21%. La proporción óptima de contenido de cemento asfáltico se fijó en un 5%, en relación al peso total del agregado. El proceso de fabricación de las mezclas siguió la práctica estándar para OGFC (ASTM D7064).

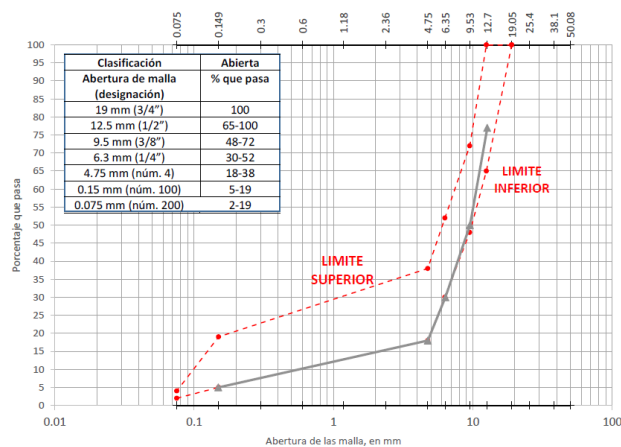


Figura 1. Granulometría de estudio.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El agrietamiento en pavimentos asfálticos tipo OGFC es inducido por las cargas cíclicas de los vehículos y efectos ambientales (Moreno-Navarro and Rubio-Gámez, 2016). Los daños por agrietamiento afectan el rendimiento general y la comodidad de conducción durante el servicio a largo plazo. Por ello, resulta imperativo realizar una evaluación exhaustiva de concretos OGFC sometidos a la intemperie, con el fin de estudiar el impacto del envejecimiento en el fenómeno de agrietamiento a lo de la vida útil del pavimento.

3.1 Ambientación por intemperismo

Con el objetivo de evaluar el impacto del envejecimiento en el concreto asfáltico tipo OGF bajo condiciones ambientales, se llevó a cabo una simulación de envejecimiento a corto plazo y parcialmente a largo plazo. Los especímenes de concreto asfáltico fueron dispuestos en un espacio al aire libre durante periodos de 6, 12 y 18 meses, como se muestra en la Figura 2. Se registró diariamente la radiación UV a la que estuvieron expuestos los especímenes. Además, la Tabla 3 presenta las condiciones ambientales, incluyendo temperatura máxima, precipitación y velocidad del aire, a las que fueron sometidos durante el estudio; estos datos fueron recopilados del servicio meteorológico de la Ciudad de México.



Figura 2. Probetas de concreto asfáltico expuestas al intemperismo.

Tabla 3. Condiciones ambientales durante los 6 meses de envejecimiento.

Intemperismo	Estaciones	Temperatura Promedio (°C)	Precipitación promedio (mm)	Vel. del aire promedio (km/h)
6 meses	Verano, otoño e invierno	24	73	11
Jul 2016				
Dic 2016				
Rangos		14-28	9-455	10 a 25

3.2 Prueba IDEAL-CT

El ensayo IDEAL-CT se llevó a cabo siguiendo el método de prueba estándar ASTM D8225 (2019). Las muestras fueron fabricadas en un compactador giratorio, con un diámetro de 150 mm y un espesor de 62 mm. Se empleó un dispositivo de carga servohidráulico para aplicar una velocidad de desplazamiento constante de la línea de carga de 50 mm/min a una temperatura de 25 °C. Para cada mezcla, se realizaron tres réplicas del IDEAL-CT para medir el índice de tolerancia al agrietamiento (CTindex). La ecuación 1 se utilizó para calcular el CTindex a partir de las curvas de carga versus desplazamiento de la línea de carga.

$$CT_{index} = \frac{t}{62} * \frac{l_{75}}{D} * \frac{G_f}{|m_{75}|} * 10^6 \quad (1)$$

donde G_f es la energía de falla, calculada dividiendo el trabajo de fractura (el área bajo la curva de carga versus desplazamiento de la línea de carga) por el área de la sección transversal de la muestra (el producto del diámetro D y el espesor t de la muestra). l_{75} es el desplazamiento al 75 % de la carga máxima después del

pico, y m_{75} es la pendiente de la zona tangencial alrededor del punto de carga máxima del 75 % después del pico, como se ilustra en la Figura 3.

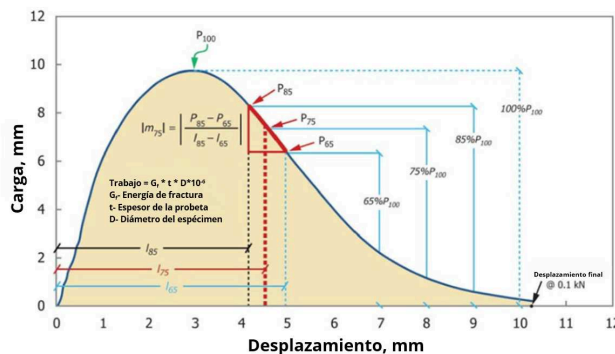


Figura 3. Curva carga-desplazamiento típica de la prueba IDEAL-CT (Yang et al., 2023).

4 RESULTADOS

Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas de carga-desplazamiento de la prueba IDEAL-CT de concretos asfálticos tipo OGFC con un contenido de cemento asfáltico del 5% en condiciones sin acondicionamiento (s/ac) y acondicionados (ac) a distintos periodos de intemperismo. Los concreto asfálticos s/ac mostraron valores de carga máxima mayores, así como un desplazamiento máximo menor, en comparación con los concretos asfálticos ac. Esto se debe a un comportamiento más rígido, resultando en una mayor

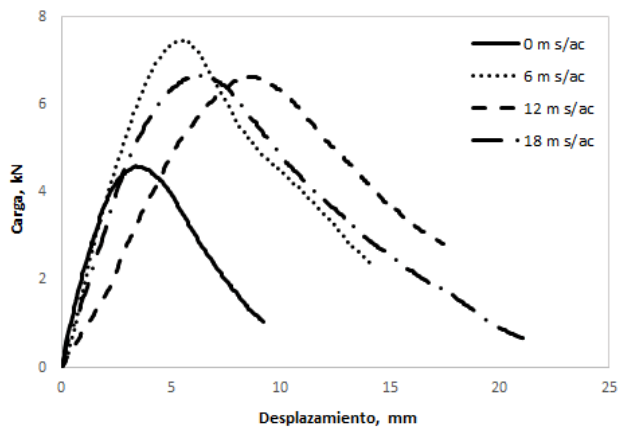


Figura 4. Las curvas carga-desplazamiento del ensayo IDEAL-CT de concretos asfálticos s/ac.

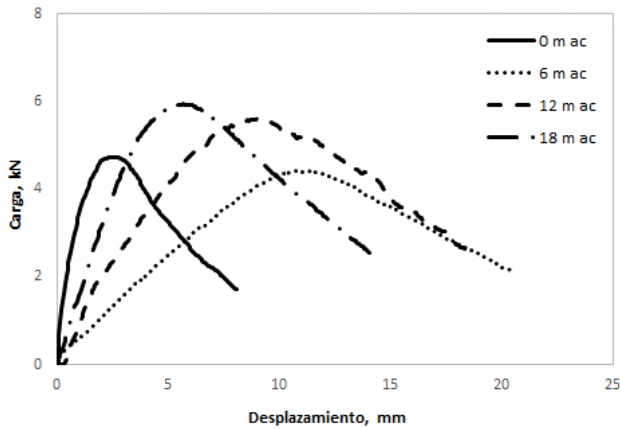


Figura 5. Las curvas carga-desplazamiento del ensayo IDEAL-CT de concretos asfálticos ac.

El valor $|m_{75}|$ se representa en la Figura 6, caracterizándose por ser la tasa de propagación de la fractura de los concretos asfálticos. A medida que aumentaba el tiempo de intemperismo, los resultados de $|m_{75}|$ disminuyeron en comparación con la condición sin envejecimiento, mostrando que la tasa de propagación de la fractura se mitigaba en cierta medida. Sin embargo, en los casos de 12 y 18 meses de intemperismo de los concretos asfálticos ac, el valor de $|m_{75}|$ aumento, indicando que la tasa de propagación de la fractura se aceleraba significativamente. Esto se atribuyó principalmente a que un mayor nivel de envejecimiento volvía las mezclas más quebradizas o frágiles; en consecuencia, la resistencia a la deformación de las mezclas era relativamente pobre y la tasa de propagación de la fractura era más rápida.

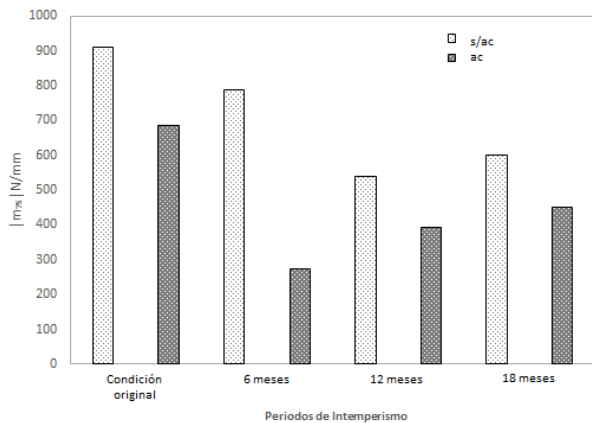


Figura 6. Valores de pendiente de la zona tangencial adel punto de carga máxima al 75 % después del pico.

El valor G_f representa la energía que los concretos asfálticos requieren absorber durante la aparición y propagación de la fractura. Los resultados de G_f , observados en la Figura 7, muestran que los concretos asfálticos s/ac, presentan un

incremento en el valor de G_f respecto al periodo de intemperismo. En los concretos asfálticos ac, se observa la misma tendencia, a excepción del periodo de 18 meses, donde se presentó una disminución del valor de G_f . Esto indica que los concretos asfálticos con mayor tiempo de intemperismo generalmente exhiben una velocidad de propagación de fractura más lenta, por lo que la fractura completa de las mezclas requiere más energía.

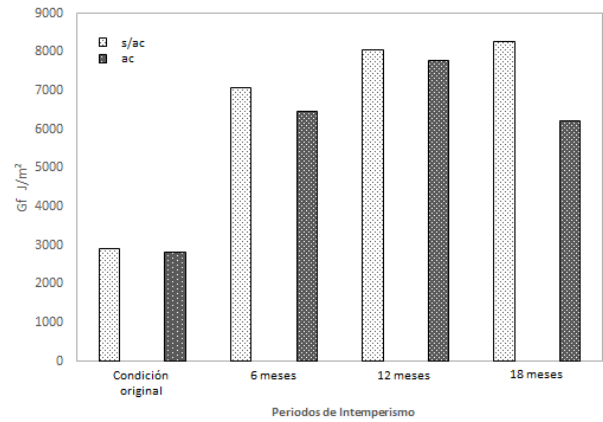


Figura 7. Resultado de la energía de fractura a la falla (G_f).

El indicador del índice CT se calculó a partir de $|m_{75}|$ y resultados G_f . De acuerdo a la ecuación (1), un valor menor de $|m_{75}|$ y un valor mayor de G_f generalmente resulta en un índice CT mayor, lo que indica una mejor resistencia a la fractura. Los resultados del gráfico en la Figura 8 representan los valores de índice CT, mostrando un incremento en relación con el periodo de intemperismo en comparación con la condición original. La condición ac a 6 meses presento el mejor comportamiento frente al agrietamiento. Para los concretos asfáltico s/ac, se observaron resultados de índice CT menor, lo que indica una menor resistencia a la fractura. Esto se debe a la relación de $|m_{75}|$ y resultados G_f , que representa la ductilidad o fragilidad relativa de una mezcla asfáltica. Por lo tanto, un aumento de G_f y $|m_{75}|$ produciría valores más altos del índice CT, resultando en un concreto asfáltico con mejor resistencia al agrietamiento.

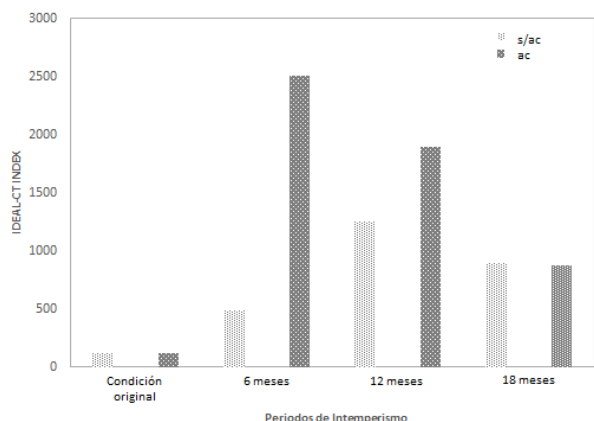


Figura 8. Valores de CT Index

5 CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó la influencia del envejecimiento por intemperismo en la susceptibilidad al agrietamiento de concretos asfálticos tipo OGFC mediante la prueba IDEAL-CT. Los especímenes fueron expuestos a distintas condiciones ambientales.

A continuación, se mencionan las conclusiones más relevantes de las pruebas experimentales:

-El valor $|m_{75}|$, que representa la tasa de propagación de la fractura en los concretos asfálticos, disminuyó con el tiempo de intemperismo, indicando una mitigación en la velocidad de propagación de la fractura. Sin embargo, en los casos de 12 y 18 meses de intemperismo, el valor de $|m_{75}|$ aumentó, sugiriendo una aceleración significativa en la tasa de propagación de la fractura, atribuida a la mayor fragilidad de las mezclas debido al envejecimiento.

-El valor G_f , que representa la energía necesaria para la aparición y propagación de la fractura, mostró un aumento en los concretos asfálticos s/ac con el tiempo de intemperismo, indicando una mayor resistencia a la fractura. En los concretos asfálticos ac, hubo una tendencia similar, excepto para el periodo de 18 meses, donde se observó una disminución en el valor de G_f , sugiriendo una menor resistencia a la fractura en esa condición específica.

-El índice CT, calculado a partir de $|m_{75}|$ y los resultados de G_f , mostró un incremento con el tiempo de intemperismo en comparación con la condición original, indicando una mejora en la resistencia a la fractura. La condición ac a 6 meses demostró el mejor comportamiento frente al agrietamiento, según los valores de índice CT. En los concretos asfálticos s/ac, se observaron valores de índice CT más bajos, indicando una menor resistencia a la fractura, posiblemente debido a la mayor fragilidad de las mezclas.

-La relación entre $|m_{75}|$ y resultados G_f representa la ductilidad o fragilidad relativa de una mezcla asfáltica. Un aumento en G_f y $|m_{75}|$ resultaría en valores más altos del índice CT, lo que implica

una mejor resistencia al agrietamiento en los concretos asfálticos.

- La granulometría de las mezclas asfálticas tipo OGFC desempeña un papel crucial en la resistencia a la fractura del material. Una granulometría abierta, caracterizada por un menor contenido de finos y un mayor porcentaje de agregados gruesos, influye directamente en la estructura interna del concreto asfáltico. Este tipo de granulometría contribuye a la formación de una red de vacíos interconectados, que facilita el drenaje, pero también puede afectar la resistencia estructural del material.

La investigación mostró que las mezclas con granulometría abierta son más susceptibles a la fractura bajo condiciones de envejecimiento. La presencia de grandes vacíos puede aumentar la vulnerabilidad del material a las tensiones ambientales, como el envejecimiento oxidativo y la exposición a la radiación UV y la humedad. A medida que las mezclas envejecen, la unión entre los agregados puede debilitarse, incrementando la tasa de propagación de la fractura y reduciendo la energía necesaria para la aparición de grietas.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Vías Terrestres del Instituto de Ingeniería (II-UNAM) por el apoyo brindado durante la realización de las pruebas.

7 REFERENCIAS

- A. Ongel, J.T. Harvey, E. Kohler, Q. Lu, B.D. Steven. 2008. *Investigation of Noise, Durability, Permeability, and Friction Performance Trends for Asphaltic Pavement Surface Types: First and Second-Year Results*. UC Davis: University of California Pavement Research Center. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/4sh361xx>
- ASTM D8225. 2019. *Standard Test Method for Determination of Cracking Tolerance Index of Asphalt Mixture Using the Indirect Tensile Cracking Test at Intermediate Temperature*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- C. Liu, S. Lv, X. Peng, J. Zheng, M. Yu. 2020. *Analysis and comparison of different impacts of aging and loading frequency on fatigue characterization of asphalt concrete*. J. Mater. Civ. Eng. 32 (9): 04020240. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003317](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003317)
- D. Watson, N.H. Tran, C. Rodezno, A.J. Taylor, T.M. James. 2018. *Performance-based Mix Design of Porous Friction Courses*. TRB. 147P. <http://www.trb.org/Main/Blurbs/177748.aspx>
- F. Gu, X. Luo, Y. Zhang, R.L. Lytton. 2015. *Using overlay test to evaluate fracture properties of field-aged asphalt concrete*. Constr. Build. Mater. 101:1059-1068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.159>
- F. Moreno-Navarro, M.C. Rubio-Gámez. 2016. *A review of fatigue damage in bituminous mixtures: Understanding the phenomenon from a new perspective*. Constr. Build. Mater. 113: 927-938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.126>
- F. Zhou, S. Im, L. Sun, T. Scullion. 2017. *Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA*. J. Road Mater. Pavement Des. 18: 405-427. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389082>
- Kai Yang, Hongjun Cui, Xinwei Ma, Mingqing Zhu. 2023. *Understanding and characterizing the fatigue cracking resistance of asphalt binder at intermediate temperature: A literature review*. Constr. Build. Mater. 407:133432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133432>
- M. Liu, X. Huang, G. Xue. 2016. *Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction*. Int. J. Sustain. Built Environ. 5 (1): 183-196
- M.A. Ahammed, S.L. Tighe. 2008. *Quiet pavements: a sustainable and environmental friendly choice*, in: *Transportation-A Key to a Sustainable Future*. 2008 Annual Conference & Exhibition of the Transportation Association of Canada, pp. 21-24.
- P. Apostolidis, X. Liu, S. Erkens, A. Scarpas. 2020. *Use of epoxy asphalt as surfacing and tack coat material for roadway pavements*. Constr. Build. Mater. 250: 118936. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118936>
- S. Lv, X. Peng, C. Liu, D. Ge, M. Tang, J. Zheng. 2020. *Laboratory investigation of fatigue parameters characteristics of aging asphalt*

mixtures: a dissipated energy approach. Constr. Build. Mater., 230; 116972. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116972>
S.A. De Fortier, J.A. Prozzi. 2013. *Quantification of the reduction of wet weather accidents using porous friction courses (PFC)[J].* Proc.-Soc. Behav. Sci. 96; 2745-2755

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.