



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN CEMENTOS ASFÁLTICOS PURIFICADORES DE AIRE SOMETIDOS A DIFERENTES NIVELES DE ESFUERZO

Maribel Trujillo¹, Alexandra Ossa López²

1 Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México, MTrujilloV@iingen.unam.mx

2 Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México, México, AOssaL@iingen.unam.mx

Resumen

El ahuellamiento es un fenómeno común en pavimentos asfálticos, caracterizado por la formación de roderas debido a las cargas repetitivas del tránsito. El cemento asfáltico juega un papel crucial en la resistencia a la deformación permanente de los concretos asfálticos, especialmente a altas temperaturas. Mejorar las propiedades reológicas del cemento asfáltico es esencial para abordar este problema y requiere una evaluación precisa antes de su implementación. Recientemente, se ha introducido la prueba de Recuperación de Fluencia por Tensión Múltiple (MSCR) en cementos asfálticos para evaluar el ahuellamiento en pavimentos asfálticos. Esta prueba proporciona dos parámetros clave: la fluencia no recuperable y el porcentaje de recuperación, que son indicadores de la resistencia a la deformación permanente y la respuesta elástica de los cementos asfálticos frente a cargas repetidas.

En este contexto, la investigación se centra en una nueva clase de cementos asfálticos con propiedades purificadoras de aire, que incorporan dióxido de titanio (TiO_2) como fotocatalizador. Se realizaron pruebas MSCR para evaluar su susceptibilidad a la deformación permanente de cementos asfálticos fotocatalíticos en comparación con el cemento asfáltico convencional (AC). Los resultados revelaron una mayor resistencia en los cementos modificados con TiO_2 , con mejoras proporcionales al aumento del porcentaje del TiO_2 . Resaltando la viabilidad y eficacia de los cementos asfálticos purificadores de aire para fortalecer la resistencia de los pavimentos ante el ahuellamiento.

Palabras Clave: Cementos asfálticos fotocatalíticos, roderas, MSCR, deformación permanente.

1 Introducción

La contaminación del aire representa uno de los desafíos ambientales más críticos a nivel global. Los altos niveles de gases contaminantes contribuyen significativamente al aumento de enfermedades cardiovasculares. Entre los principales contaminantes se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), que son generados en su mayoría por vehículos motorizados (75%) y diversos procesos industriales (25%) [1,2]. Esta situación afecta gravemente la calidad del aire en las grandes ciudades.

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado diversas investigaciones que buscan soluciones eficaces para mitigar los altos niveles de NO_x . Recientemente, han emergido técnicas alternativas que mejoran la calidad del aire mediante la utilización de materiales fotocatalíticos. El dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los materiales más estudiados debido a sus propiedades fotocatalíticas, que se activan con la radiación ultravioleta (UV). Estas propiedades permiten la degradación de gases nocivos y tienen un impacto significativo en la reducción de contaminantes.

Numerosos estudios han implementado la técnica de fotocatalisis en pavimentos asfálticos, modificando el cemento asfáltico mediante la adición de TiO_2 . Este enfoque busca mitigar los altos niveles de contaminación por NO_x , generados por la creciente flota vehicular [3,4]. Sin embargo, más allá de su capacidad para reducir contaminantes, varios autores han destacado la viabilidad y eficacia



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

del TiO_2 para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del cemento asfáltico. Zhang et al. (2019) demostraron que la resistencia a la deformación del cemento asfáltico mejora significativamente con la incorporación de nanopartículas de TiO_2 . Por otro lado, Zhang et al. (2011) establecieron que el TiO_2 , actuando como agente anti envejecimiento, reduce las tasas de envejecimiento del cemento asfáltico, beneficiando considerablemente sus propiedades.

Por este motivo, evaluar este tipo de cementos asfálticos frente a una de las principales fallas en pavimentos asfálticos, como son las deformaciones permanentes (roderas), es crucial para determinar su eficacia. Las roderas se manifiestan como acumulaciones graduales de deformaciones permanentes en la carpeta asfáltica, formando depresiones longitudinales a lo largo de las trayectorias de los neumáticos. Dado que el cemento asfáltico actúa como material aglutinante en las mezclas asfálticas y desempeña un papel fundamental en la resistencia a la formación de roderas, resulta esencial realizar evaluaciones precisas de su comportamiento frente a estas deformaciones.

Actualmente, la prueba de Fluencia y Recuperación por Esfuerzos Múltiples (Multiple Stress Creep Recovery, MSCR) ha sido integrada en el sistema de clasificación de rendimiento Superpave para evaluar la formación de roderas. Esta prueba proporciona dos parámetros críticos: la fluencia no recuperable (Jnr) y el porcentaje de recuperación (R%). La fluencia no recuperable, medida a 3.2 kPa, sirve como indicador de la resistencia de un cemento asfáltico a la deformación permanente bajo condiciones de carga repetida. Por otro lado, el porcentaje de recuperación se utiliza para evaluar la capacidad elástica del material y su dependencia del esfuerzo, aspectos fundamentales para entender el comportamiento de los cementos asfálticos frente a las cargas dinámicas.

La prueba Recuperación de Fluencia por Tensión Múltiple (MSCR) aplica múltiples ciclos de fluencia y recuperación a diferentes niveles de esfuerzo, con el objetivo de que la deformación viscoelástica inducida durante la fase de fluencia sea recuperable tras la eliminación del esfuerzo cortante. Esto proporciona un medio efectivo para distinguir entre la deformación permanente y la deformación total, logrando así una correlación más precisa con la formación de roderas observada en campo [7].

Esta investigación se enfoca en evaluar la susceptibilidad a las deformaciones permanentes de un cemento asfáltico convencional en comparación con cementos asfálticos fotocatalíticos modificados con distintos porcentajes de TiO_2 (3 %, 5 % y 7 %). Utilizando la prueba MSCR, se busca determinar cómo la inclusión de TiO_2 influye en la capacidad del material para resistir deformaciones permanentes bajo cargas repetidas, lo que es crucial para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos asfálticos en entornos reales.

1.1 Recuperación por fluencia de esfuerzos múltiples (MSCR)

La prueba de Recuperación por Fluencia de Esfuerzos Múltiples (MSCR) es una técnica que evalúa con precisión el rendimiento del cemento asfáltico a alta temperatura mediante la aplicación de cargas de corte cíclicas a diferentes niveles de esfuerzo utilizando un Reómetro Dinámico de Corte (DSR) [7]. Dicha prueba fue desarrollada por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (US FHWA) específicamente para estudiar el comportamiento de fluencia y recuperación de cementos asfálticos sometidos a múltiples tensiones.

A partir de los resultados del ensayo MSCR, se pueden calcular los parámetros R% (porcentaje de recuperación de la deformación) y Jnr (cumplimiento de fluencia no recuperable) de acuerdo con las ecuaciones 1 a 4. Estos parámetros muestran la capacidad del cemento asfáltico para recuperarse tras la deformación y el potencial de formación de roderas en el cemento asfáltico, respectivamente.

$$R = \frac{\sum_{\epsilon_r=1}^{10} \epsilon_r(\tau, N)}{10} \quad (1)$$



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

$$J_{nr} = \frac{\sum_1^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10} \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) * 100 / \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \varepsilon_{10} / \tau \quad (4)$$

Donde τ es la tensión de fluencia a 0.1 o 3.2 kPa, N es el número de ciclos, ε_1 y ε_{10} representan el valor de deformación al final de la porción de fluencia (después de 1.0 s) de cada ciclo y el valor de deformación al final de la porción de recuperación (después de 10.0 s), respectivamente, y ε_r es el porcentaje de recuperación para cada ciclo. Los valores altos de R indican que el cemento asfáltico tiene la capacidad de volver a su forma original después de la descarga, mientras que los valores bajos de Jnr indican que el cemento asfáltico es altamente resistente a la deformación.

Según la literatura técnica, los resultados del ensayo MSCR tienen una mejor correlación con las deformaciones permanentes en el cemento asfáltico que el parámetro $G^*/\sin(\delta)$ y pueden predecir con mayor precisión el comportamiento del cemento asfáltico [8,7]. En este ensayo, aplicando diferentes niveles de esfuerzo, se puede analizar la susceptibilidad a deformaciones no recuperables en la región no lineal.

2 Materiales y programa de pruebas

2.1 Materiales

2.1.1 Dióxido de titanio

Las nanopartículas de TiO_2 utilizadas para proporcionar las propiedades fotocatalíticas a los cementos asfálticos fueron Evonik Aeroxide® TiO_2 P25. Dado que se utilizaron tal como se recibieron, sus principales propiedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades generales de Evonik Aeroxide® TiO_2 P25

Información general	
Apariencia	Estado físico, solido (polvo)
Color	Blanco
Olor	Inodoro
Información relacionada con la seguridad y medio ambiente	
pH	Aprox. 7.0 a 20 °C
Punto de fusión	> 1000° C (P. Atm. 1013 hPa)
Densidad	4.1 kg/L (20° C)
Densidad aparente	600 kg/ cm ³
Solubilidad	< 0.001 g/l (agua)
Inflamabilidad	No inflamable
Propiedad explosiva	No explosiva
Propiedad oxidante	No oxidante
Estabilidad química	Producto estable



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

2.1.2 Cemento asfáltico y proceso de modificación

El cemento asfáltico convencional (AC) utilizado en esta investigación tiene una clasificación PG 64-22 y fue modificado con diferentes porcentajes de TiO_2 (3%, 5% y 7% respecto a su masa). El proceso de modificación consistió en incorporar diferentes porcentajes de TiO_2 al cemento asfáltico convencional precalentado y mezclarlos utilizando un agitador mecánico ajustado a 300 rpm durante 30 minutos, a una temperatura controlada de $120^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. El objetivo de la premezcla del cemento asfáltico con TiO_2 fue asegurar una distribución uniforme del TiO_2 . Es importante mencionar que fue necesario agitar manualmente el TiO_2 en el cemento asfáltico antes del proceso de agitación mecánica, ya que el TiO_2 es un material ligero.

Todos los cementos asfálticos (convencionales y fotocatalíticos) fueron sometidos a una caracterización consensuada en función de su viscosidad [9] y grado de rendimiento [10], basada en el parámetro $G^*/\sin(\delta)$, en su estado original, es decir, después de la modificación en el caso de los cementos asfálticos modificados con TiO_2 , como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de los cementos asfálticos evaluados según su viscosidad a 60°C y su grado de penetración en estado original.

Prueba	C. asfáltico convencional	3% TiO_2	5% TiO_2	7% TiO_2	ASTM Estándar
Penetración a 25°C , 100 g, 5 s; 10-1 mm mínimo.	68	83	79	76	D-2171
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C ; s, mínimo.	120	345	304	288	D-4402
Punto de inflamación Cleveland; $^\circ\text{C}$, mínimo.	280	228	238	244	D-92
Punto de reblandecimiento; $^\circ\text{C}$.	55	55	56	57	D-1525
Temperatura de ensayo, $^\circ\text{C}$	64	70	70	70	
G^*/\sin	1.12	1.41	1.38	1.39	
Grado PG	64-22	70-22	70-22	70-22	D- 6373-16

2.2 Programa de pruebas

2.2.1 Recuperación por fluencia de esfuerzos múltiples

Las pruebas MSCR se realizaron de acuerdo con la norma AASHTO M332-19, utilizando un reómetro de corte dinámico Malvern, modelo Kinexus ultra+ [11], Figura 1. Durante estas pruebas, los cementos asfálticos convencionales y fotocatalíticos, fueron sometidos a diez ciclos de fluencia-recuperación a una tensión baja de 0.1 kPa seguidos de diez ciclos de fluencia-recuperación a una tensión de 3.2 kPa a una temperatura de 60°C . Todas las pruebas se realizaron a 10 rad/s utilizando una placa de 25 mm con una separación de 1 mm. Se probaron tres especímenes para cada cemento asfáltico y se calcularon los valores medios de R3.2 y Jnr3.2.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.



Figura 1. Reómetro de corte dinámico Kinexus ultra+

3 Resultados y Análisis

En la Figura 2 se presentan los resultados de deformación acumulada obtenidos en el ensayo MSCR del cemento asfáltico convencional (AC) y los cementos asfálticos fotocatalíticos, para niveles de tensión de 0.1 y 3.2 kPa. Esta figura indica que los cementos asfálticos modificados con TiO_2 son más resistentes a las deformaciones que el cemento asfáltico convencional.

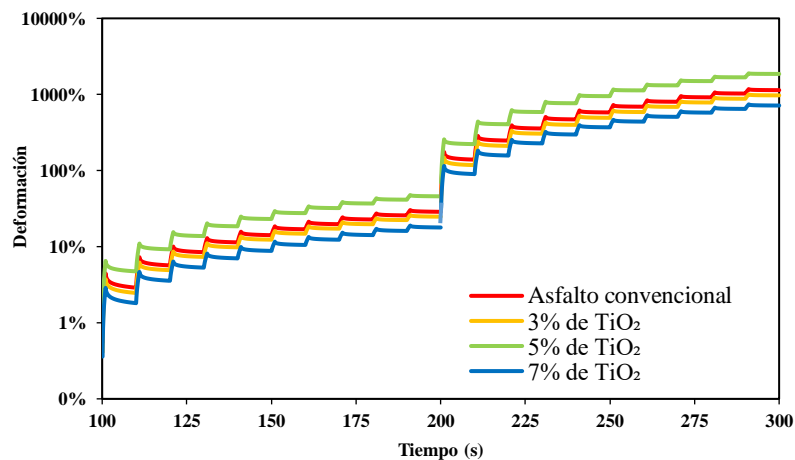


Figura 2. Deformación acumulada obtenida en los ensayos MSCR

La Figura 3 muestra la media de la resistencia a la fluencia no recuperable $J_{nr,3.2}$ a un nivel de esfuerzo de 3.2 kPa. Dicha figura revela que la resistencia a la deformación permanente se incrementa notablemente con el aumento del porcentaje de TiO_2 . Los valores de $J_{nr,3.2}$ para los cementos asfálticos fotocatalíticos son inferiores en comparación con los del cemento asfáltico convencional, lo que sugiere una menor susceptibilidad a la deformación permanente en los cementos modificados. Este



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

comportamiento se debe a los cambios químicos en los ligantes provocados por la inclusión de TiO_2 . Estos cambios no solo mejoran la durabilidad y estabilidad de los cementos, sino que también incrementan su resistencia a la deformación permanente, gracias a las propiedades que le proporciona el TiO_2 .

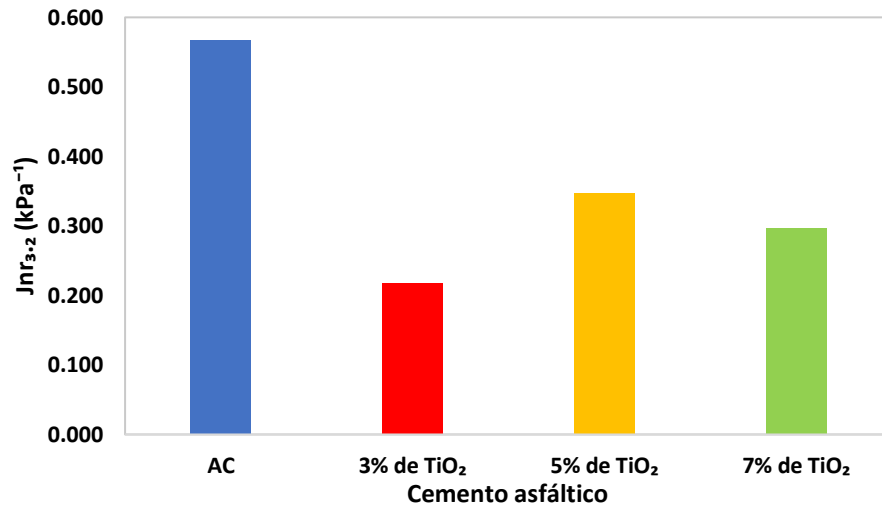


Figura 3. Valores de $J_{nr_{3.2}}$ para todos los cementos asfálticos estudiados

La media de los valores porcentuales de recuperación de la deformación $R_{3.2}$, obtenidos al nivel de esfuerzo de 3.2 kPa para todos los ligantes ensayados, se muestra en la Figura 4. El gráfico revela que la recuperación elástica de los cementos asfálticos fotocatalíticos mejora significativamente con el incremento del porcentaje de TiO_2 , en comparación con el cemento asfáltico convencional. Esta mejora destaca la eficacia del TiO_2 en la optimización de las propiedades elásticas del material.

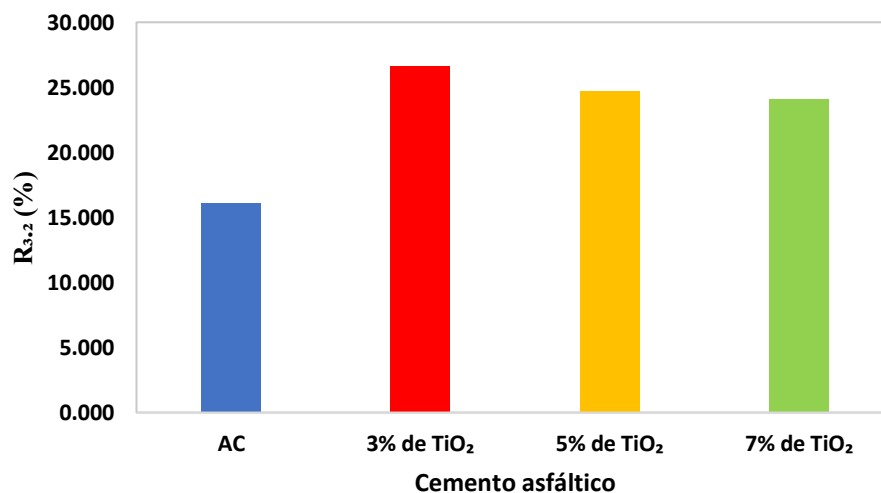


Figura 4. Valores de $R_{3.2}$ para todos los cementos asfálticos estudiados



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Los resultados MSCR de los cementos asfálticos convencional y fotocatalíticos, presentados en las Figuras 3 y 4, son consistentes con los hallazgos reportados por otros investigadores. Mahali y Sahoo (2019) exploraron el efecto del TiO_2 como modificador adicional en los cementos asfálticos, concluyendo que este compuesto reduce la susceptibilidad de los ligantes a la deformación permanente. Además, Kleiziene et al (2020) observaron que el incremento de TiO_2 como modificador en el cemento asfáltico resultaba en una reducción de los valores de J_{nr} y un aumento en los valores de recuperación R, mejorando así la resistencia y la elasticidad del material.

4 Conclusiones

En esta investigación, se evaluó la susceptibilidad a la deformación permanente de cementos asfálticos modificados con dióxido de titanio (TiO_2) en diferentes porcentajes (3%, 5% y 7%), en comparación con un cemento asfáltico convencional. Para ello, se utilizó el ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

- a) La adición de TiO_2 mejora significativamente la recuperación elástica y la resistencia a la deformación permanente de los cementos asfálticos. Esto se observa en los parámetros R y J_{nr} del ensayo MSCR, los cuales muestran mejoras conforme aumenta el porcentaje del compuesto fotocatalítico.
- b) Los valores de J_{nr} a 3.2 kPa indicaron que el cemento asfáltico convencional es más susceptible a la deformación permanente, evidenciando un incremento en los valores de J_{nr} en comparación con los cementos asfálticos fotocatalíticos, que presentan una menor susceptibilidad bajo las mismas condiciones.

Estas conclusiones destacan el potencial del TiO_2 como modificador al mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los cementos asfálticos.

5 Referencias

- [1] World Health Organization. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- [2] Environmental Protection Agency. (2007). *The Plain English Guide to the Clean Air Act*. EPA-456/K-07.10.
- [3] Tuset, S. (2019). Condorchem Envitech: Caso Volkswagen. Emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). *Barcelona, España*. <https://blog.condorchem.com/caso-volkswagen-emisiones-de-oxidos-de-nitrogeno-nox/>
- [4] Brovelli, C., & Crispino, M. (2013). Photocatalytic suspension for road pavements: Investigation on wearing and contaminant effects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 548-554. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000614](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000614)
- [5] Zhang, F., Yu, J., & Han, J. (2011). Effects of thermal oxidative ageing on dynamic viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS and SBS/sulfur-modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 25, 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.048>
- [6] Zhang, W. G., Zhang, Y. X., Jia, Z. R., Wang, F., & Ding, L. (2019). Test method and material design of asphalt mixture with the function of photocatalytic decomposition of automobile exhaust. *Construction and Building Materials*, 215, 298-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.196>
- [7] D'Angelo, J., Klutz, R., Dongre, R., Stephens, N., & Zanzotto, L. (2007). Revision of the Superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test. *Association*



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

- of Asphalt Paving Technologists – Proceedings of the Technical Sessions*, 76, 293-331. <http://worldcat.org/issn/02702932>
- [8] Soane, H., Blomberg, T., Pellinen, T., & Laukkanen, O. V. (2013). The multiple stress creep-recovery test: A detailed analysis of repeatability and reproducibility. *Road Materials and Pavement Design*, 14(1), 2-11. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774742>
- [9] ASTM. (2018). *Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. ASTM D2171 / D2171M-18. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [10] ASTM. (2016). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. ASTM D6373-16. West Conshohocken, PA: ASTM.
- [11] AASHTO. (2018). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*. AASHTO M 332-19. Washington, DC: AASHTO.
- [12] Mahali, I., & Sahoo, U. C. (2019). Rheological characterization of Nanocomposite modified asphalt binder. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12, 589–594. <https://doi.org/10.1007/s42947-019-0070-8>
- [13] Kleizienė, R., Paliukaitė, M., & Vaitkus, A. (2020). Effect of Nano SiO₂, TiO₂ and ZnO modification to rheological properties of neat and polymer modified bitumen. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (Lecture Notes in Civil Engineering, 48)*, 325-336. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29779-4_32