

# ASFÁLTICA

REVISTA TÉCNICA



- ☞ **Desempeño de microaglomerados en vías de bajo volumen**
- ☞ **Manual piarc sobre diseño y construcción de terracerías**





# ReviPav

Alternativa de habilitación  
de pavimentos agrietados

ReviPav® es la tecnología propia de Ergon® Asfaltos México para la técnica de: Macro-calafateo inducido, sobre la cual se aplica una capa de rodadura (MCI-F).



# ERGON.

[www.ergonasfaltos.com](http://www.ergonasfaltos.com)

El fresado  
podría no  
ser tu mejor  
opción para  
extender el  
nivel de  
servicio del  
pavimento.



# VANGUARDIA TECNOLÓGICA. SERVICIO TÉCNICO DE ALTO NIVEL.



PRENSA TSR (NIVEL I),  
MARSHALL, SCB,  
CBR, TRIAXIAL



PRENSA SERVO-HIDRÁULICA 30 KN,  
MÓDULO DINÁMICO (NIVEL III)



4PB AUTÓNOMO SERVO-NEUMÁTICO,  
FATIGA (NIVEL IV)



HORNO DE PELÍCULA  
DELGADA, RTFO  
(ASTM D2872)



OLLA DE DESGASIFICACIÓN,  
VDO (ASTM D6521)



OLLA DE PRESIÓN,  
PAV (ASTM D6521)



RUEDA DE HAMBURGO,  
(NIVEL II)



COMPACTADOR GIRATORIO,  
(NIVEL I)



Hamburg Wheel  
Tracker in USA

## NUESTRAS MARCAS

**MATEST**  
**PAVETEST**



Certificadas en ISO 9001  
Estricta conformidad  
Protocolo AMAAC,  
Normas AASHTO y ASTM

MATECH OF AMERICAS CORP., S. DE R.L. DE C.V.

Lago Chapala Oriente #9,  
Col. Manantiales, San Pedro Cholula, C.P. 72760, Puebla, MEXICO  
Tels. (+52) 22 25 03 46 53 / 54  
Mail. info@matech.mx  
www.matech.mx | www.matest.com  
www.pavetest.com | www.instrontek.com



**PACCSA**  
INGENIERÍA

# EVOLUCIÓN EN MOVIMIENTO

**QUE TU CAMINO SEA  
SEGURO Y CONFIABLE,  
ES LO MÁS IMPORTANTE PARA NOSOTROS.**

Somos PACCSA INGENIERÍA una empresa con amplia experiencia en servicios de Ingeniería Civil en el Ramo de las Vías Terrestres Aeropuertos e Infraestructura Carretera. Contamos con Especialistas Certificados, Laboratorios Reconocidos, Peritos en Vías Terrestres, etc.

Contamos con acreditación ante la ema.  
Reconocimiento AMAAC - IMT Nivel IV y Certificación ACI.

Para conocer nuestros servicios completos visita nuestra página web:

**[www.paccsaingenieria.com.mx](http://www.paccsaingenieria.com.mx)**

o contáctanos vía whats app **552628-3462** y por mail en **contacto@paccsaingenieria.com.mx**

# Sumario

---

- 5** Desempeño de microaglomerados en vías de bajo volumen
- 13** Manual PIARC sobre diseño y construcción de terracerías
- 19** Periodos de reposo y calentamiento interno en mezclas asfálticas
- 27** Análisis de costo de ciclo de vida de mezclas asfálticas usadas como capas de rodadura
- 41** Emulsiones asfálticas por grado de desempeño
- 42** Amor, paz y... asfalto
- 54** Sensores inalámbricos autónomos: detección temprana de daños
- 62** Reflexiones sobre motivación

## Presidente

Jorge Alarcón Ibarra

## Vicepresidentes

Víctor M. Cincire Romero Aburto  
Juan Adrián Ramírez Aldaco  
Benjamín Escudero Rivas

## Secretario

Hugo Bandala Vázquez

## Tesorero

Santiago Villanueva Martínez

## Vocales

Luis Enrique Ramírez Soto  
Alejandro Díaz Cruz  
Ricardo Buzo Romero  
Javier Herrera de León  
Jorge García Ascencio<sup>†</sup>  
Fernando Martín del Campo Aviña  
Alejandro Mungaray Moctezuma  
Luis Carlos Soto Moreno

## Comité de Vigilancia

Gastón García Padilla y Arroba  
Luis Guillermo Limón Garduño

## Comisión de Honor

Ignacio R. Cremades Ibáñez  
José Jorge López Urtusuástegui  
Verónica Flores Déleon

## Director General

Raúl V. Orozco Escoto  
dg@amaac.org.mx  
www.amaac.org.mx

## Diseño y formación

Lizbeth de Lucio



# Editorial

---



**H**ace poco más de un año, asistir a una conferencia era común. La realidad ha cambiado y nos ha llevado a enfrentar los retos tecnológicos de aprender a distancia, pero pronto tendremos espacio para reencontrarnos.

Estamos cerrando el primer semestre del año y continuamos con la capacitación y apoyo en los centros SCT del país, mientras nos encontramos avanzando con el “Diplomado en Pavimentos” en colaboración con el IMT y AMIVTAC que se lleva a cabo de manera virtual. En este sentido, la AMAAC, se siente agradecida con los colaboradores por su apoyo y esfuerzo para impartir y dar difusión a los temas de construcción y lo relacionado con nuestra industria, el asfalto.

Este primero de julio, se ha celebrado el Día del Ingeniero en México y me complace felicitar a todos los que forman parte de nuestra Asociación, y con ello, quiero invitarlos a compartir sus experiencias y trabajos de investigación en nuestra revista **ASFÁLTICA**, así como el próximo octubre en el XI Congreso Mexicano del Asfalto que tendrá lugar en la Riviera Maya. Queremos seguir impulsando las nuevas tecnologías, principalmente aquellas eco ambientales y procuramos fortalecer la participación de los ingenieros mexicanos.

AMAAC está convencida de que las nuevas generaciones de ingenieros tienen la capacidad para innovar en lo que respecta a tecnología de pavimentos flexibles y queremos contribuir a enaltecer sus habilidades, por lo que pretendemos reunir a los estudiantes de las diferentes ramas interesadas en temas de asfaltos en el Primer Congreso Académico AMAAC. Este congreso está pensado para preparar a los futuros camineros e introducirlos en las prácticas y tendencias de la “ruta de la carretera”.

Quiero enfatizar el apoyo que la Asociación y la mesa directiva ofrece a las nuevas generaciones de ingenieros; estamos convencidos que con su esfuerzo y entusiasmo nos ayudarán a mejorar la ingeniería de los asfaltos en nuestro país.

Este semestre tendremos la oportunidad de coincidir, y reitero la invitación a los eventos que tenemos planeados y con un abrazo, les deseo bienestar a ustedes y sus familias.

**Jorge Alarcón Ibarra**  
*Presidente*

*Undécimo Consejo Directivo*



Muros en España  
*Pierre Auguste Renoir (1841-1919)*

La vida en París no era fácil para el joven artista. A falta de dinero, la ayuda de sus amigos fue de gran importancia para Renoir, quien, sin vivienda estable, en ocasiones residía en la casa de Monet, en otras con Sisley. Bazille, de mejor posición económica que sus camaradas, arrendó un taller en el que pudieran trabajar todos juntos.

*Ilustración sobre el original  
Por: Omar Maya V.*

# Desempeño de microaglomerados en vías de bajo volumen

---

Anthony Brenes Calderón  
Adriana Vargas Nordbeck  
National Center for Asphalt Technology  
ajb0184@auburn.edu

## Introducción

Los microaglomerados asfálticos hacen referencia a mezclas comúnmente compuestas por una emulsión asfáltica modificada con polímero, agregado mineral, agua y aditivos, las cuales son colocadas sobre una superficie previamente preparada.<sup>[1]</sup> Generalmente, este tipo de tratamiento de preservación es implementado para la corrección de deterioros menores y mejoramiento de la rugosidad y textura de la superficie de ruedo. Además, se ha constatado que es capaz de prolongar el período de servicio de la estructura de pavimento.<sup>[2]</sup>

En todo tipo de tratamientos de preservación, el desempeño de una sección tratada depende mayoritariamente de dos factores, la selección de una alternativa de preservación adecuada y un tiempo oportuno de intervención. Sin embargo, en sellos del cabo (“*cape seals*” por su significado en inglés) el desempeño a largo plazo puede ser menos susceptible a la condición del pavimento existente.<sup>[3]</sup> Asimismo, otros factores como: las cargas de tráfico, condiciones ambientales, calidad de los materiales, diseño de la mezcla y prácticas constructivas pueden afectar significativamente el desempeño del tratamiento.<sup>[4]</sup> Las estimaciones de la extensión de la vida útil del pavimento suelen oscilar entre 3 y 7 años; sin embargo, los criterios para definir el desempeño varían entre las fuentes.<sup>[5]</sup> La extensión de la vida útil generalmente se estima en base al ahuellamiento o rugosidad, no obstante, los microaglomerados han demostrado la capacidad de retardar el reflejo de grietas.<sup>[6]</sup>

## Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el desempeño en campo de los microaglomerados, mediante el estudio de secciones de prueba colocadas en una ruta de bajo volumen.

## Metodología

### **Estudio de preservación de pavimentos**

El grupo de estudio de preservación de pavimentos surgió en el verano del año 2012, como parte del quinto ciclo de investigación del *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), ante la necesidad de una mejor evaluación del desempeño en la preservación de los pavimentos, que permitiría a las agencias tomar decisiones

objetivas con respecto al proceso de selección de tratamientos. El punto de partida consistió en la colocación y monitoreo de una serie de tratamientos de preservación sobre una ruta de bajo volumen en Auburn, Alabama.

Basados en los resultados preliminares del 2012, el estudio fue expandido en el ciclo de investigación del 2015, colocando una versión extendida de tratamientos de preservación y combinaciones sobre una ruta de alto volumen en Alabama. A propósito de proveer resultados prácticos e implementables tanto para la región sur como norte de los Estados Unidos, NCAT y el Departamento de Transporte de Minnesota (MnDOT, por sus siglas en inglés) generaron un convenio. En el año 2016, los tratamientos de pre-

servación colocados en Alabama, fueron replicados en una ruta de bajo volumen y otra de alto volumen en Pease, Minnesota.

### **Descripción de tratamientos**

Esta investigación describe el desempeño de los microaglomerados en las secciones de prueba localizadas en la región sur, caracterizada por su caliente y húmedo entorno. Específicamente las secciones localizadas en la ruta de bajo volumen, “Lee Road 159 (LR-159)”, caracterizada por su bajo volumen de tráfico, pero un alto porcentaje de vehículos de carga, al proveer acceso a una cantera y planta productora de mezcla asfáltica. La Tabla 1, evidencia las características principales de dicha ruta.

<b>Tabla 1. Características de sitio de estudio (LR-159)</b>	
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Espesor promedio de carpeta asfáltica existente (in)	5,5
Longitud de cada sección (ft)	100
Año de tratamiento de la sección	2012
Ejes equivalentes acumulados (ESAL's) por carril (2020)	88 000 (entrante) & 1 250 000 (saliente)

El estudio se centra en tratamientos de preservación que pueden clasificarse como una variación de microaglomerados, ya sean simples, de doble capa o los utilizados en tratamientos múltiples como cape

seals. La totalidad de microaglomerados seleccionados y presentes en LR-159 fueron de Tipo II y utilizaron una fuente de agregados de granito. La Tabla 2, provee una descripción de cada sección de estudio.

<b>Tabla 2. Descripción de microaglomerados presentes en LR-159</b>	
<b>Tratamiento</b>	<b>Descripción</b>
Microaglomerado	Microaglomerado de una sola capa (simple).
Microaglomerado con sellado de grietas	Microaglomerado simple colocado posterior al sellado de grietas.
Microaglomerado doble	Doble capa de microaglomerado, de forma consecutiva.
Cape Seal	Microaglomerado simple colocado posterior a un tratamiento superficial (“chip seal”).
Cape Seal (Fibermat)	Microaglomerado simple, colocado sobre tratamiento superficial (“chip seal”) reforzado con membrana.
Calafateo sobre Cape Seal	Microaglomerado simple, colocado sobre un calafateo inducido (“Scrub Seal”).



## Recopilación de datos

Los datos de desempeño fueron recopilados por medio de un vehículo equipado con un perfilómetro inercial, un sistema de láser y cámaras de alta resolución. El perfilómetro inercial recolecta los perfiles longitudinales de la superficie del pavimento. Estos perfiles son utilizados para cuantificar la rugosidad del pavimento en términos del Índice de rugosidad internacional (IRI). El sistema láser permite obtener el perfil transversal de la sección y medir la profundidad del ahuellamiento. Finalmente, las cámaras de alta resolución proveen imágenes de la superficie, las cuales son procesadas con el fin de cuantificar el porcentaje de área agrietada.

La condición actual de la estructura de pavimento fue evaluada mediante el uso del deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés), de acuerdo a la norma ASTM D 4658. Los ensayos de FWD fueron efectuados para cada una de las secciones de estudio y en dos ubicaciones seleccionadas al azar, tanto dentro y fuera de las huellas de rodamiento, así como en la dirección entrante y saliente de la vía. Específicamente, se utilizó un deflectómetro Dynatest 8000 con nueve sensores colocados a 0, 8, 12, 24, 36, 48, 60 y 72 pulgadas del centro de la carga, y un plato de carga de un radio de 5,91 pulgadas. Durante la prueba, tres repeticiones a cuatro diferentes niveles de carga (aproximadamente 6, 9, 12 y 16 kilolibras) fueron efectuadas para cada punto, además, las temperaturas de la superficie fueron registradas.

## Resultados y análisis

### Deterioros de la superficie de rueda

El principal deterioro observado en las secciones de estudio, fue el agrietamiento de las mismas, las cuales pueden ser separadas en tres grupos principales en función del desempeño: secciones no tratadas, tratamientos de capa simple, y tratamientos múltiples. Como se evidencia en la Figura 1 y era esperado, los tratamientos más robustos han dado como resultado una mejor resistencia al agrietamiento.

Para proporcionar una evaluación equitativa, es importante tener en cuenta el estado del pavimento al momento de ser tratado. Consecuentemente, la Figura 2 muestra el porcentaje de área agrietada antes de la aplicación del tratamiento y a 8 años de servicio. Todos los tratamientos superan notablemente a las seccio-

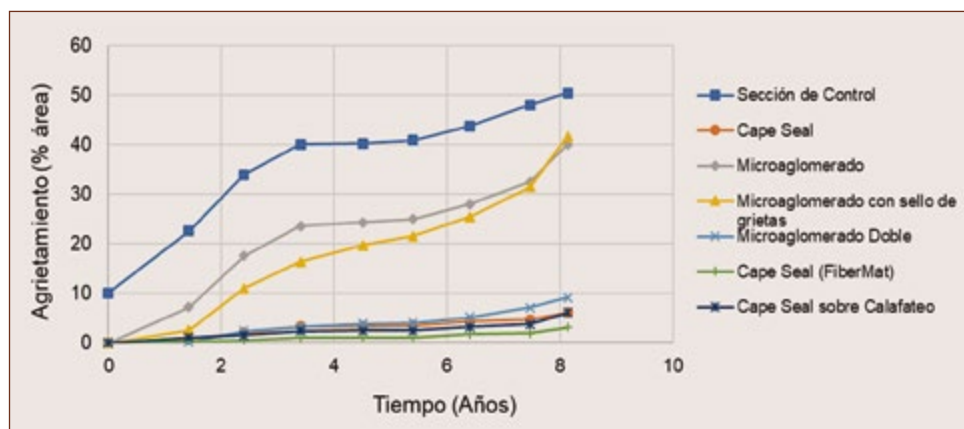


Figura 1. Progresión de agrietamiento en secciones de estudio.

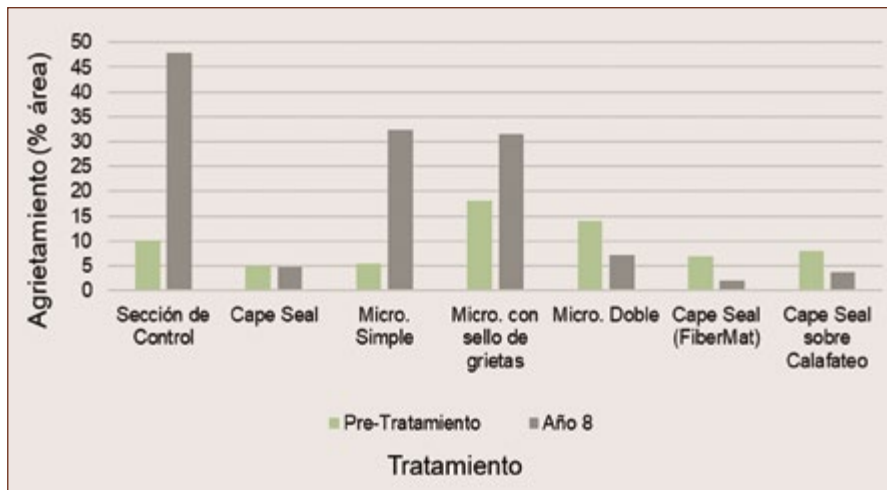


Figura 2. Comparación de agrietamiento para secciones de estudio.

nes de control, que se han deteriorado rápidamente. Las secciones tratadas han sido efectivas para ralentizar la reaparición de grietas en la superficie del pavimento, la mayoría de las aplicaciones múltiples se encuentran aún por debajo de su nivel de pretratamiento. Además, se puede evidenciar el beneficio de combinar el microaglomerado con el sellado de grietas. La Figura 2 muestra que los microaglomerados con y sin sellado de grietas parecen proveer un rendimiento similar, sin embargo, debe tenerse en cuenta que la sección que incluía sellado de grietas, exhibió un cantidad significativamente mayor de agrietamiento previo a ser tratada.

El ahuellamiento y la rugosidad son parámetros monitoreados periódicamente como parte del estudio de las secciones. Los microaglomerados

son tratamientos que tienen la capacidad de corregir ahuellamientos menores y restaurar la rugosidad de la superficie de rueda.<sup>[7,8]</sup> Las secciones incluidas en este estudio exhibieron bajos niveles de ahuellamiento previo a ser tratadas, por ende fungieron como candidatas adecuadas para la conservación del pavimento.

La Figura 3 muestra el ahuellamiento a lo largo del tiempo para cada sección. Es evidenciable una condición generalmente buena (menos de 5 mm), además, una poca variación durante el periodo de servicio para la totalidad de los tratamientos, lo que imposibilita establecer una diferencia significativa en este punto de la investigación. Sin embargo, es notable que el cape seal muestra niveles inferiores de ahuellamiento.

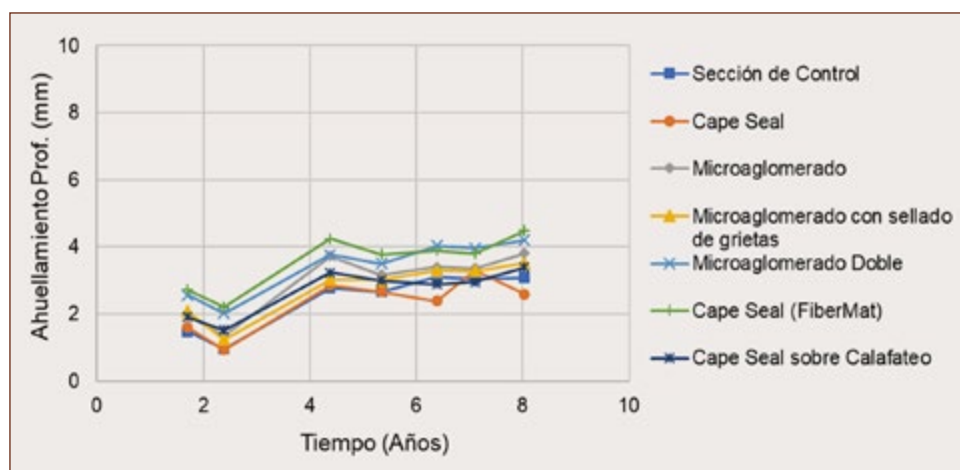


Figura 3. Progresión de ahuellamiento en secciones de estudio.

La Figura 4 muestra la rugosidad de la superficie de rueda en términos del IRI a lo largo del tiempo, para cada una de las secciones. Es posible resaltar que los valores de IRI se han mantenido casi constantes por más de ocho años de servicio. El microaglo-

merado simple exhibe un comportamiento irregular debido a una reparación localizada (bacheo), producto de la ruptura y reparación de una tubería de agua. En general, la condición de rugosidad se considera buena (menos de 95 pulgadas/milla).

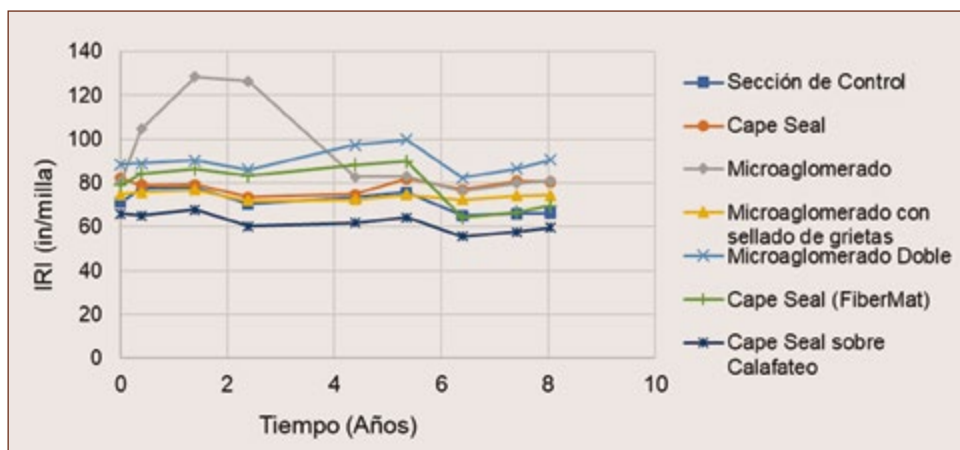


Figura 4. Progresión de IRI en secciones de estudio.

### Condición estructural del pavimento

Aunque no se espera que los microaglomerados proporcionen una mejora significativa en la condición estructural del pavimento, las secciones de estudio fueron periódicamente monitoreadas, con el fin de determinar la efectividad del tratamiento en mantener la estructura de pavimento en buen estado. Las deflexiones registradas con el FWD, fueron utilizadas para cuantificar los parámetros del cuenco de de-

flexión (DBP, por sus siglas en inglés), que permiten caracterizar la condición de las capas de la estructura de pavimento. En este estudio, tres DBP fueron considerados: Área debajo del perfil del pavimento (AUPP, por sus siglas en inglés), Índice de curvatura de base (BCI, por sus siglas en inglés) e Índice del daño de base (BDI, por sus siglas en inglés), como lo muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del cuenco de deflexión

Parámetro	Ecuación	Capa Caracterizada
Área Debajo del Perfil del Pavimento	$AUPP = \frac{5D_0 + 2D_{12} + 2D_{24} + D_{36}}{D_0}$	Capas superiores
Índice de Curvatura de Base	$BCI = D_{24} - D_{36}$	Base
Índice del Daño de Base	$BDI = D_{12} - D_{24}$	Subbase o Subrasante

Nota:  $D_0$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{24}$  y  $D_{36}$  son las deflexiones a una distancia de 0, 12, 24 y 36 pulgadas del centro del plato de carga, respectivamente.

El parámetro AUPP se correlaciona con la deformación por tensión horizontal en la fibra inferior de la carpeta asfáltica. Entre mayor sea la magnitud de AUPP, mayores son las deformaciones, por lo tanto, existe un mayor potencial de agrietamiento por fatiga de abajo hacia arriba. El BDI y BCI representan la condición estructural de las capas de base y subrasante, respectivamente; una mayor magnitud de estos índices es señal de un daño mayor en la estructura de pavimento.

Las Figuras 5 y 6 muestran los parámetros de deflexión para cada una de las secciones después de la aplicación del tratamiento (post-construcción) y en el momento actual, respectivamente. En general, no se han evidenciado cambios significativos desde el momento en que se aplicaron los tratamientos, y la estructura de pavimento ha permanecido en buenas condiciones con valores bajos de DBP.

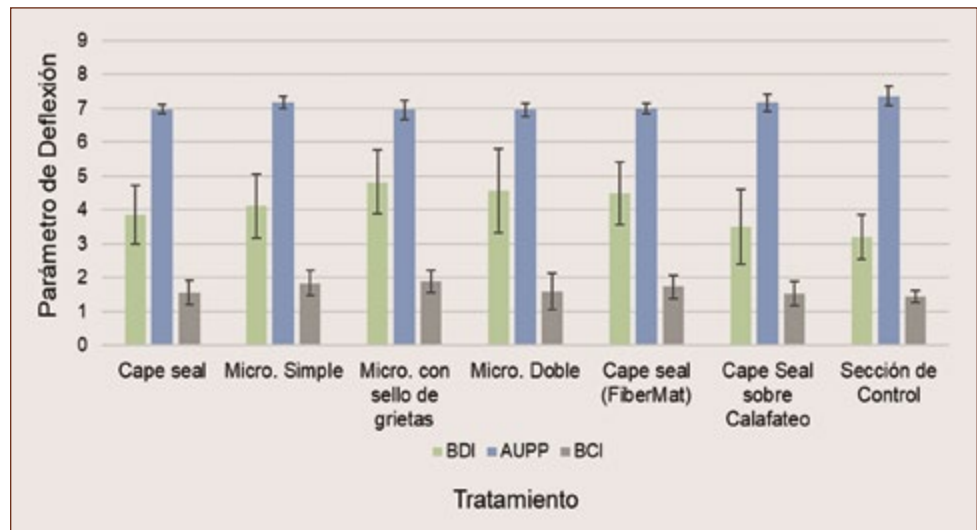


Figura 5. Parámetros de deflexión de Basin de secciones de estudio (pre-tratamiento).

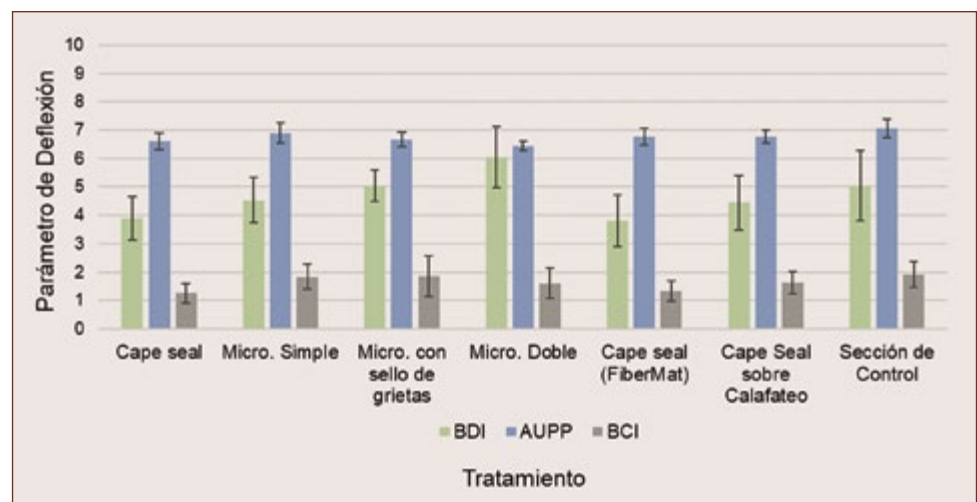


Figura 6. Parámetros de deflexión de Basin de secciones de estudio (condición actual).

## Análisis de Cluster

Dado el número de parámetros de desempeño recopilados, como parte de la caracterización de cada sección, se realizó un análisis de cluster para determinar posibles categorizaciones de los tratamientos en términos de desempeño. El análisis de Cluster consiste en agrupar objetos que comparten alguna similitud.<sup>[9]</sup> Existen varios métodos para medir la similitud entre objetos, así como métodos para clasificarlos en clases. Específicamente, en este estudio se implementó la distancia euclídea como medida de similitud y el método de Ward para la creación de clases.

Dentro del análisis de cluster las siguientes variables fueron incluidas: área agrietada, ahuellamiento promedio, IRI, AUPP, BDI y BCI, tomando en cuenta la condición actual (ocho años de servicio). Dado que el agrietamiento ha exhibido el mayor cambio a lo largo del tiempo, el porcentaje de agrietamiento

pretratamiento también se incluyó; con el fin de tomar en cuenta el efecto de la condición inicial del pavimento. Se seleccionaron tres grupos para que las clases resultantes contuvieran más de un objeto.

La Tabla 4 presenta las estadísticas descriptivas para cada una de las clases. Los resultados sugieren que el primer grupo contiene los tratamientos de mejor rendimiento (los más robustos), que presentan valores inferiores para todos los parámetros. El segundo grupo evidencia un desempeño intermedio; mientras que el tercer grupo muestra un mayor deterioro después de ocho años de servicio. Cabe enfatizar, que pese a que la sección de control y los microaglomerados simples se colocaron en el mismo grupo, existe una variabilidad considerable en el porcentaje de agrietamiento entre estos, mayor agrietamiento en las secciones no tratadas, como se mostró anteriormente.

**Tabla 4. Estadísticas descriptivas de análisis de cluster LR-159**

Parámetro	Cluster 1, n = 2		Cluster 2, n = 2		Cluster 3, n = 3	
	Promedio	Desviación est.	Promedio	Desviación est.	Promedio	Desviación est.
Tratamientos	Cape Seal (FiberMat) & Cape Seal sobre calafateo		Microaglomerado doble & Cape Seal		Sección de control - microaglomerado simple & microaglomerado con sellado de grietas	
Agrietamiento Pre-const (%)	7,53	0,71	9,60	6,43	11,25	6,36
Agrietamiento actual (%)	4,63	2,09	25,41	2,20	44,04	5,56
Ahuellamiento (mm)	3,93	0,77	3,85	1,13	3,46	0,37
IRI (pulg/mi)	64,49	7,04	82,41	6,91	73,96	7,30
AUPP	6,77	0,01	6,56	0,11	6,88	0,20
BDI	4,13	0,46	5,55	1,52	4,88	0,30
BCI	1,48	0,19	1,73	0,24	1,87	0,04



## REUNIÓN NACIONAL XXXVII

50 ANIVERSARIO

“CERTIFICACIÓN Y ACREDITACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN: FUNDAMENTOS DE LA CALIDAD”

Invita La Asociación Nacional de Laboratorios Independientes al Servicio de la Construcción, A.C.

Dirigido a:

- Laboratorios de Ensayos
- Laboratorios de Calibración
- Evaluadores
- Consultores
- Expertos Técnicos
- Profesionistas
- Público en General

### INSCRIPCIONES:

Conferencias	\$4,500.00
Taller	\$2,000.00
Paquete Taller y Conferencias	\$4,590.00

### ESTUDIANTES:

Taller y Conferencias	\$1,500.00
Taller	\$1,000.00

Hotel Fiesta Americana, Puerto Vallarta

Del 24 al 27 de noviembre del 2021

contacto@analisec.mx


asociados@analisec.mx

(55) 5611 8663/7578

## Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación, evaluó el desempeño de diferentes tipos de microaglomerados colocados sobre secciones de pavimento periódicamente monitoreadas; como parte de un estudio para determinar los beneficios de la conservación de pavimentos. Del análisis y observaciones generadas se pueden trazar las siguientes conclusiones:

- En síntesis, el desempeño de las secciones de estudio se encuentra principalmente caracterizado por el agrietamiento desarrollado durante el período de servicio, relativo al agrietamiento previo de la estructura. En términos de agrietamiento, todos los tratamientos estudiados superan el desempeño de las secciones de control.
- En resumen, el ahuellamiento ha exhibido poca variación durante el tiempo de servicio de los tratamientos, los cuales mantienen un buen desempeño en términos de esta propiedad (menos de 5 mm). Sin embargo, los bajos valores de dicho parámetro hacen que las diferencias observadas sean insignificantes desde el punto de vista práctico, en este instante de la investigación.
- En conclusión, los valores de IRI se han mantenido prácticamente constantes durante más de 8 años de servicio. En general, la condición de rugosidad de la superficie de ruedo se considera buena (menos de 95 pulg/mi).
- En términos de la condición estructural, no se evidencia una variación significativa desde la aplicación del tratamiento.
- Finalmente, del análisis de cluster y con la información recopilada, es posible evidenciar que los tratamientos más robustos presentan un desempeño superior a los demás microaglomerados evaluados.

El estudio de preservación sigue en marcha y la recopilación de datos continúa desarrollándose, con el fin de generar modelos de desempeño final, que faciliten a las agencias cuantificar el desempeño de sus pavimentos tratados de acuerdo a las condiciones inherentes al sitio de análisis. 



## ¿Quieres profundizar?

- [1] International Slurry Surfacing Association. "Recommended Performance Guideline for Micro Surfacing." Document ISSA A143, Annapolis, MD, 2010.
- [2] Labi, S., Lamptey, G. and Kong, S. "Effectiveness of Microsurfacing Treatments." *Journal of Transportation Engineering*, 133(5), 2007, pp. 298-307. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:5(298).
- [3] Sebaaly, P., Hajj, E.Y., Weitzel, D. and Belancio, G. "Effectiveness of Cape Seal Pavement Preservation Technique in Northern Nevada." Report No. WRSC-UNR-UTC-CAPE-1, 2016.
- [4] Johnson, A.M. "Best Practices Handbook on Asphalt Pavement Maintenance." Minnesota T2/LTAP Program, Center for Transportation Studies, University of Minnesota Report No. 2000-04, 2000.
- [5] Cuelho, E., Mokwa, R. and Akin, M. "Pavement Maintenance Treatments of Flexible Pavements: A Synthesis of Highway Practice." Report No. FHWA/MT-06-009/8117-26, 2006.
- [6] Ji, Y., Nantung, T., Tompkins, B. and Harris, D. "Evaluation for Microsurfacing as Pavement Preservation Treatment." *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 2013, pp. 540-547. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000568.
- [7] Gransberg, D. "Microsurfacing. A Synthesis of Highway Practice." NCHRP Synthesis 411. Transportation Research Board, 2010.
- [8] Peshkin, D., K.L. Smith, A. Wolters, J. Krstulovich, J. Moulthrop and C. Alvarado. "Guidelines for the Preservation of High-Traffic-Volume Roadways". SHRP 2 Report S2-R26-RR-2. Transportation Research Board, 2011.
- [9] Johnson, R.A. and D.W. Wichern. "Applied multivariate statistical analysis." Essex: Pearson Education Limited, 2014.



**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD EN OBRAS,  
SUPERVISION, DISEÑO Y PROYECTOS**

servicio en toda la republica

 Sacbe Ingeniería y Control  812-150-95-32

 @sacbeingenieriacontrol  contacto@sacbeingenieriacontrol.com

# Manual PIARC sobre diseño y construcción de terracerías

---

Paul Garnica Anguas  
CIID, Centro de Investigación, Innovación  
y Desarrollo en Infraestructura y Seguridad Vial  
paulgarnica@ciid.com.mx

## Introducción

El proceso de construcción de las terracerías requiere de movimientos de tierra que incluyen excavaciones, ejecución de terraplenes, subyacentes, subrasantes, cumpliendo con especificaciones de estabilidad, deformación, hidráulicas u otras.

Los trabajos de excavación incluyen la carga, transporte (movimiento de materiales), transformación o mejora, colocación, estabilización y compactación de materiales naturales (suelos, rocas), subproductos industriales o materiales reciclados para obtener cortes y terraplenes estables y duraderos que cumplan con las propiedades prescritas. Estas labores se necesitan en ocasiones hacer bajo el agua. Los movimientos de tierras requieren operaciones de planificación, diseño, construcción y mantenimiento. Dependen de las características de los materiales utilizados, de las propiedades requeridas y de las condiciones ambientales.

Por ello, la Asociación Mundial de la Carretera, PIARC, un Manual de Movimientos de Tierra con énfasis en el diseño y construcción de terracerías, disponible en su portal ([piarc.org](http://piarc.org)) y donde el autor de este artículo tuvo la ocasión de participar.

Se trata de un conjunto de reglas de arte, buenas prácticas, normas técnicas, etcétera, para iluminar y sensibilizar a los ingenieros de carreteras sobre la gestión de los movimientos de tierras, en las distintas etapas del diseño, el proyecto y la ejecución de las terracerías en particular para proyectos carreteros.

El Manual es un documento técnico independiente que tiene en cuenta los aspectos económicos y ambientales, así como los conceptos sobre la adaptación al cambio climático.

El Manual reúne los conocimientos técnicos compartidos en el campo de los movimientos de tierras durante 25 años en la PIARC.

En lo que sigue se presenta una breve descripción de los temas que ahí se abordan.

## Especificidad técnica de los movimientos de tierras

La construcción de movimientos de tierra está sujeta principalmente a riesgos geotécnicos y climáticos. Muchos parámetros y restricciones influyen en el flujo de las operaciones:

- variedad y heterogeneidad de los materiales (suelos) encontrados
- dificultades de extracción y aplicación: suelos sueltos, suelos rocosos...
- problemas relacionados con la reutilización (tratamiento, desarrollo...)
- transitabilidad (circulación de vehículos)
- las condiciones climáticas,
- control del agua: drenaje, saneamiento...
- interfaces con otras actividades (pavimentos, ingeniería civil, etc.)
- ...

### Aspectos económicos

La actividad de movimiento de tierras representa entre el 15 y el 20% de la actividad total de obras públicas. En el campo de la infraestructura y el desa-

rollo, el impacto económico de los movimientos de tierras es muy significativo.

La actividad de movimientos de tierras consiste en la construcción de terracerías para todo tipo de infraestructuras de transporte e instalaciones asociadas:

- Infraestructura de carreteras y autopistas
- Infraestructura ferroviaria, incluidas las líneas de alta velocidad
- Instalaciones portuarias y aeroportuarias
- Plataformas logísticas y multimodales
- Vías fluviales, incluyendo grandes canales
- Instalaciones hidráulicas e hidroeléctricas: presas de tierra, diques, etcétera.

El costo de los movimientos de tierras varía enormemente en función de la naturaleza del proyecto de

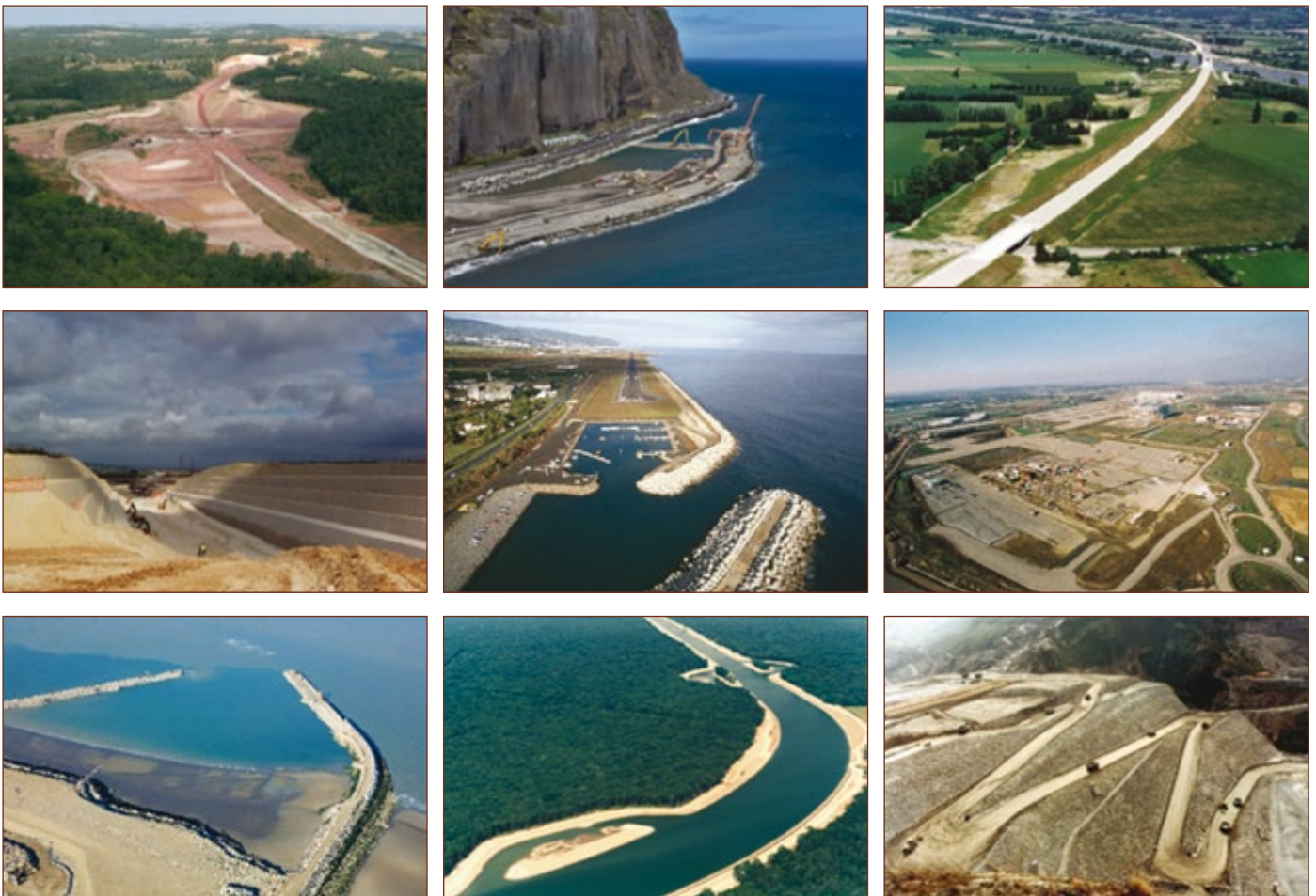


Figura 1. Conjunto de fotografías.



carretera. Depende en particular de la configuración topográfica del proyecto, de la naturaleza de los materiales, etcétera.

En la configuración media, por ejemplo, los volúmenes de movimiento de tierras de las principales infraestructuras viarias y de autopistas (dos carriles por sentido) pueden variar en los siguientes rangos:

- 50,000 m<sup>3</sup> a 250,000 m<sup>3</sup> /km de material a desplazar
- Hasta 300,000 a 400,000 m<sup>3</sup> en sitios montañosos

La actividad de movimiento de tierras está altamente mecanizada. Por término medio, la parte de los costos de equipos de construcción (excluida la mano de obra de los operadores) representa un tercio del costo total de los movimientos de tierras (Figura 2).

La parte de depreciación es alta debido a las inversiones a realizar. Por ejemplo, la compra de maquinaria que conforma los escalones de liga más utilizados para grandes obras viales varía entre 150,000 y 1,000,000 de euros por máquina.

En la Figura 3 se muestra el impacto medio de los movimientos de tierras en el costo global de un proyecto de autopista o de ferrocarril.

Por lo tanto, el potencial de mejora de los costos de los proyectos, inducidos por las técnicas de movimiento de tierras, es elevado. La optimización de costos se busca en la fase de diseño de la alineación de la infraestructura vial y luego en la fase de diseño de los propios movimientos de tierras. Esta optimización se debe en particular a las soluciones innovadoras para el uso de los materiales de la obra, la adecuación de los equipos utilizados y la optimización del programa de trabajo.

La reducción de costos es particularmente importante cuando el uso de materiales locales reemplaza las soluciones de préstamos externos o incluso los productos de canteras. Esto es tanto más relevante cuanto que se aplica a las capas inferiores de la estructura del pavimento, especialmente en la fase de movimiento de tierras.

## Aspectos ambientales

Todo proyecto de desarrollo tiene un impacto en los tres pilares del desarrollo sostenible: el medio ambiente, la economía y la sociedad.

El movimiento de tierras es la etapa en la que el impacto será mayor y en la que se podrán implementar propuestas de desarrollo para hacer frente a estos impactos (evitar, compensar, reducir estos impactos,...).

La evaluación de impacto es un ejercicio complejo que requiere tener:

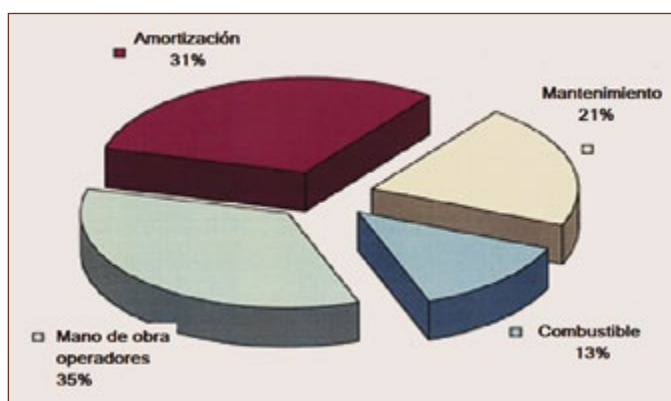


Figura 2. Desglose de costos para una hora de funcionamiento del equipo.

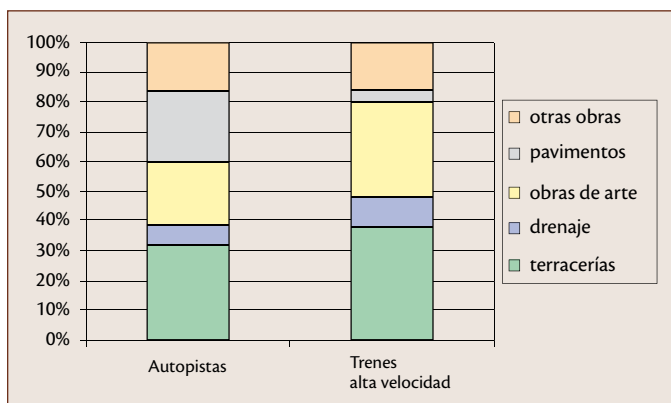


Figura 3. Distribución de los costos globales en un proyecto carretero o ferroviario.

- los medios para analizar la situación existente antes del proyecto de desarrollo,
- análisis del proyecto y de los supuestos impactos,
- análisis de las llamadas soluciones compensatorias.

No hay consenso internacional sobre estos tres puntos. Incluso puede haber divergencia en el análisis dependiendo de las escalas de análisis de problemas.

Los puntos de vigilancia en materia de desarrollo sostenible que se aplican a los movimientos de tierras son:

- la lucha contra el cambio climático y la protección de la atmósfera,
- la preservación de la biodiversidad, la protección del medio ambiente y de los recursos,
- la cohesión social y la solidaridad entre territorios y entre generaciones,
- una dinámica de desarrollo que respete los patrones de producción y consumo responsables.

Para cada uno de estos puntos, se deben proporcionar elementos de análisis del proyecto.

## Impactos a considerar

El proyecto de movimiento de tierras debe tener en cuenta los elementos naturales a proteger y preservar:

- hábitat, patrimonio, agricultura, silvicultura, paisaje
- recursos subterráneos
- recursos hídricos (campo de pozos)
- fauna, flora, agua, suelo
- arqueología

Así como los sitios atravesados que presentan riesgos ambientales:

- zonas contaminadas
- productos de desecho
- instalaciones clasificadas (riesgo tecnológico)
- ...

## Contribución al desarrollo sostenible

Además de tener en cuenta los elementos mencionados anteriormente, la principal contribución al desarrollo sostenible es la optimización de la reutilización de los materiales del sitio, lo que reduce el impacto del transporte:

- reducción del impacto de los insumos y del transporte fuera del sitio (tráfico de camiones).
- al mismo tiempo, la preservación de los recursos naturales fuera del sitio.

Cabe destacar otras contribuciones:

- recuperación de subproductos industriales: cenizas volantes, escorias de alto horno, lodos, etc.
- técnicas específicas de reducción de energía: aireación,...

Hay que buscar nuevas mejoras:

- reducción del consumo de energía (mediante la mejora de los equipos...)
- reducción del consumo de agua, especialmente en los carriles de circulación y en el uso de equipos (uso de desatascadores, productos para la fijación del polvo, etcétera).

## Estrategia del movimiento de tierras

La estrategia de movimiento de tierras se basa esencialmente en:

- \* Optimización del movimiento de tierras:
  - reutilización de los materiales del sitio en función de su destino, eventualmente transformados (aireación, tratamiento de aglomerantes, transformación, etcétera)
  - distancias de transporte
  - las condiciones del tráfico (pistas)
  - ...

- \* Optimización de los plazos a través de la planificación del trabajo:
  - medios apropiados (equipo, personal)
  - soluciones técnicas y plazos de ejecución de las obras en función de la sensibilidad de los materiales (agua, precipitaciones, temperaturas, heladas)
  - ...

Estos estudios se basan principalmente en los siguientes datos:

- \* datos geológicos y geotécnicos
  - datos utilizados desde el diseño hasta la fase de implementación
- \* meteorología / condiciones meteorológicas
  - explotación de los datos de las estaciones meteorológicas
  - estimación del número de días previsible de mal tiempo (lluvia, heladas)
  - objetivos: optimización de los plazos de entrega y de la reutilización de los materiales
- \* Adaptación al cambio climático.

### **Primeros pasos a considerar:**

La consideración de los efectos del cambio climático exige que todos los actores de un sitio de movimiento de tierras (administración, autoridad contratante, contratista, director de obra o empresa) tomen medidas para reducir el consumo de agua mientras disminuye el contenido de agua de los materiales que se van a reutilizar. Por lo tanto, las tecnologías deben adaptarse para salvar este recurso.

Lo mismo ocurre con los movimientos de tierras ya en funcionamiento, algunos de cuyos materiales y componentes pueden modificar el estado de las aguas y, por tanto, debilitar la estructura que no fue diseñada con estos nuevos supuestos. Por lo tanto, es necesario un seguimiento de la estructura, o incluso de su refuerzo.

### **Gestión de riesgos y peligros**

Nuestro enfoque en este ámbito es puramente técnico y económico. No se abordan los aspectos jurídicos de la gestión de contratos.

Los movimientos de tierras están sujetos a peligros que generan riesgos para los objetivos del proyecto; riesgos que pueden tener repercusiones, si no se controlan o anticipan, en los costos, plazos y desempeño.

Estos riesgos están relacionados tanto con la influencia de la meteorología como con la existencia de peligros relacionados con el entorno geológico e hidrogeológico.

Principales amenazas (generalmente impredecibles en la fase de proyecto) encontradas:

- períodos de lluvias o heladas fuera de las estadísticas previsible que pueden provocar inundaciones, lluvias torrenciales o desestructuración de los movimientos de tierras
- fenómenos geológicos o geotécnicos imprevisibles que pueden causar accidentes (deslizamientos, colapsos, etc.)

- zonas de cavidades desconocidas
- ...


Estos riesgos se traducen en importantes excesos económicos. La gestión de estos riesgos deberá basarse en un estudio optimizado de la reanudación de las obras: saneamiento, drenaje, modificación del movimiento de tierras y planificación, con el fin de limitar el costo adicional.

Otros riesgos técnicos pueden tener repercusiones en los costos, los plazos y el desempeño si no se controlan o anticipan. Por lo general, están relacionados con los métodos de reconocimiento, la gestión de proyectos y la gestión del trabajo.

Riesgos técnicos encontrados:

- insuficiente reconocimiento previo
- estudios geotécnicos incompletos o mal dirigidos
- estrategia de trabajo inadecuada: recursos, soluciones técnicas, planificación, ...

Los períodos durante los cuales se llevan a cabo los trabajos influyen especialmente en los riesgos implicados (por ejemplo, movimientos de tierra en suelos sensibles al agua en invierno).

Las posibilidades de reacción para hacer frente a las amenazas y riesgos y controlar su impacto requieren una adaptación constante del proyecto y de la estrategia de movimiento de tierras. 

**¿Quieres profundizar?**

- PIARC, 2019, Earthworks Manual. Design and construction of earth-structures, Asociación Mundial de la Carretera, Reporte 2019R10EN, disponible en el portal [www.piarc.org](http://www.piarc.org).



**1<sup>ER</sup>**  
**CONGRESO**  
**ACADÉMICO**  
**DEL ASFALTO**  
**AMAAC**



Asociación Mexicana  
 del Asfalto A.C.

**#AcademicoAMAAC**

**8, 9 y 10 de Septiembre 2021**

**Evento híbrido**

# Periodos de reposo y calentamiento interno en mezclas asfálticas

---

Ramón Botella, Félix E. Pérez Jiménez,  
Teresa López-Montero, Rodrigo Miró,  
Adriana H. Martínez  
Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, España  
ramon.botella@upc.edu

## Introducción

Los ensayos cíclicos son el método más común para caracterizar el comportamiento de fatiga de las mezclas asfálticas. Los conceptos heredados del estudio de la fatiga de otros materiales, como el acero, han dominado las líneas de investigación que abordan este problema. Por lo tanto, la mayoría de los procedimientos desarrollados para caracterizar el comportamiento a fatiga de estos materiales se basan en encontrar el número de ciclos hasta el fallo para cualquier amplitud de carga, deformación o desplazamiento utilizando ensayos cíclicos a altas frecuencias. Es decir, hallar la ley de fatiga del material.

Esta ley de fatiga, que no es más que una relación empírica sin justificación teórica, se obtiene en laboratorio a partir de pruebas cíclicas a sollicitación constante. Se deben realizar varios ensayos a diferentes niveles de sollicitación para obtener la ley de fatiga. Estos ensayos se conocen como barridos de tiempo. La evolución de la rigidez durante estos ensayos se ha dividido clásicamente en tres fases.<sup>[1]</sup> En la fase I, se observa una disminución rápida e importante del módulo dinámico. En la fase II, el módulo disminuye linealmente y la pendiente de esta disminución dependerá de la amplitud de sollicitud aplicada. Finalmente, en la fase III se observa una disminución repentina del módulo. Esta fase es normalmente asociada con la falla total del material.

La mayoría de los métodos que tratan de caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se basan en obtener el número de ciclos necesario para alcanzar la fase III para cada nivel de sollicitud, en barridos de tiempo. Este enfoque supone que toda la reducción de la rigidez observada durante los ensayos cíclicos está asociada con el daño. Sin embargo, varios estudios han demostrado que los materiales asfálticos experimentan cambios reversibles en la rigidez durante las pruebas cíclicas.<sup>[2,3]</sup> En 2012, Pérez-Jiménez, *et al.*, al utilizar por primera vez en betunes un ensayo uniaxial de barrido de deformaciones alternativas, mostró que la gran parte de la reducción de la rigidez observada en los ensayos cíclicos de estos materiales se puede recuperar al reducir la amplitud de la deformación aplicada.<sup>[4,5]</sup> En el mismo estudio, se demostró que el valor de la estabilización de la rigidez durante el ciclado era independiente de la historia de carga anterior, dando más peso a la importancia de los fenómenos reversibles.

Desde entonces, muchos investigadores se han centrado en cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles<sup>[6-9]</sup> demostrando que ignorarlos en la

caracterización de la fatiga de las mezclas puede llevar a conclusiones erróneas o clasificaciones inexactas con respecto a su desempeño final en campo. En 2015 Pérez-Jiménez *et al.*,<sup>[10]</sup> al comparar los resultados de un nuevo ensayo de barrido de tiempo y deformaciones para ligantes,<sup>[11]</sup> concluyó que la relación entre el módulo complejo y la densidad de energía disipada fue lineal durante la fase I y II, cuestionando la supuesta diferencia en comportamiento entre ambas fases. Además, se encontró una relación lineal entre el cambio de módulo con los ciclos y el cambio de energía con el módulo. Esta relación lineal fue característica de cada betún a una temperatura y frecuencia determinadas y podría usarse para predecir la tasa de deterioro en un ensayo de barrido de tiempo, utilizando ensayos de barrido de deformaciones mucho más cortos.

Entre los fenómenos irreversibles que pueden afectar los ensayos cíclicos de materiales asfálticos, el más fácil de medir experimentalmente es el calentamiento. Por eso en 2017, Botella *et al.*<sup>[12]</sup> llevó a cabo un ensayo cíclico de barrido de deformaciones alternativas en probetas de betún con sondas termopar en el interior. Los resultados mostraron que el aumento de la temperatura durante el ciclado era muy importante y podía explicar hasta el 90% de la reducción de la rigidez observada experimentalmente. En el mismo proyecto de investigación, la misma configuración de ensayo se aplicó a mezclas que mostraron una recuperación importante en la rigidez, lo cual sería consistente con el calentamiento. Sin embargo, los investigadores no pudieron medir los aumentos de temperatura dentro de las muestras de la mezcla. Esto fue realizado previamente por otros investigadores<sup>[13,14]</sup> que pudieron medir el cambio de temperatura dentro de una probeta de mezcla bituminosa al introducir períodos de reposo. Se observó un aumento de la temperatura durante los ciclos de carga seguido de una disminución a la temperatura original durante el período de reposo.

Estos resultados en betunes se acompañaron con el modelado numérico de estos fenómenos en betunes y mezclas. Riahi *et al.*<sup>[7,15]</sup> modelaron el aumento de temperatura en una mezcla durante el ciclado uti-

lizando un modelo numérico heterogéneo en el que los áridos y el mástico presentaban diferentes propiedades térmicas. Al utilizar la densidad de energía disipada predicha localmente como fuente de calor, se obtuvo una estimación del aumento de temperatura de la muestra y el módulo complejo resultante. La conclusión de este estudio fue que el cambio de temperatura en la mezcla podría explicar un tercio de la reducción de la rigidez.

Siguiendo esta línea de investigación, este trabajo presenta los esfuerzos para cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles que tienen lugar en los ensayos cíclicos de mezclas de bituminosas, centrándose en el calentamiento interno debido a la disipación viscosa. Se diseñaron diferentes tipos de ensayos con períodos de reposo y cambios alternativos de amplitud de deformación para cuantificar el aumento de temperatura interna, su importancia y la contribución total de todos los fenómenos reversibles a la reducción de la rigidez durante los ensayos cíclicos. Estos resultados se compararon con las propiedades térmicas y termo-mecánicas de las mezclas para confirmar la importancia del calentamiento.

## Metodología

Todos los ensayos llevados a cabo en este proyecto de investigación se realizaron utilizando la configuración EBADE (Ensayo de BARRIDO de DEformaciones), Figura 1. El EBADE es un ensayo de barrido de deformaciones por compresión uniaxial que utiliza probetas prismáticas con una muesca en dos de sus caras planas. Se realizaron cuatro tipos diferentes de ensayos, barridos de tiempo convencionales, barridos de tiempo con períodos de reposo, barridos de deformaciones incrementales con el retorno al nivel de deformación más bajo y barridos de frecuencias. Todos ellos a deformación controlada. La mezcla empleada fue una BBTM8A (granulometría discontinua), de acuerdo con los estándares europeos, con un contenido de ligante del 5% en la masa de la mezcla y un betún de penetración 50/70. A partir de ahora, la mezcla de estudio se denominará mezcla 50/70.

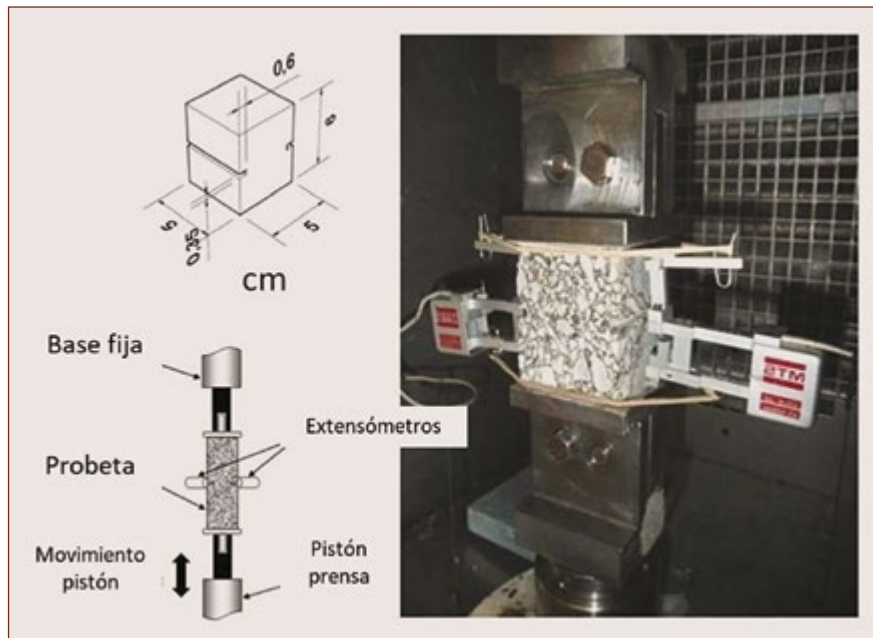


Figura 1. Configuración EBADE.

## Resultados

Esta sección está dividida en tres subsecciones. En la primera subsección, las mediciones de temperatura en los barridos de tiempo sin períodos de reposo se comparan con los resultados de susceptibilidad a la temperatura obtenidos para la mezcla 50/70. En la segunda subsección, el efecto de los períodos de reposo se analiza comparando los resultados de los barridos de tiempo con y sin períodos de reposo obtenidos para la mezcla 50/70. En la tercera subsección, los resultados

obtenidos en los barridos de deformaciones incrementales con el retorno al nivel de deformación más bajo se analizan para la mezcla 50/70 a 20 °C y 10 Hz.

### **Susceptibilidad a la temperatura y calentamiento**

La Figura 2 muestra la evolución del módulo complejo y la temperatura dentro de la probeta de la mezcla 50/70 durante un barrido de tiempo a 20 °C y 10 Hz a una amplitud de deformación de 225 microdeformaciones.

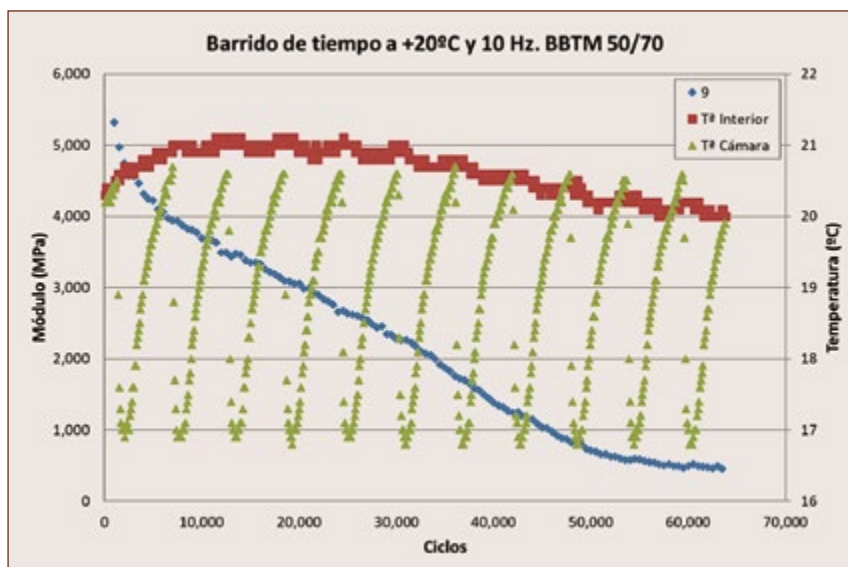


Figura 2. El módulo complejo y evolución de la temperatura interior durante un barrido de tiempo a 20 °C, 10 Hz y 225 microdeformaciones.

Antes de comenzar el barrido de tiempo a 225 microstrains, se aplican 500 ciclos a la muestra al nivel de deformación más bajo posible para el equipo de ensayo, es decir, 25 microdeformaciones. Este acondicionamiento inicial se usa para obtener un módulo complejo y ángulo de fase fiable para la comparación entre diferentes réplicas probadas a diferentes niveles de deformación. El grupo de puntos azules entre 7,000 y 8,000 MPa (7,530 MPa en promedio) representa los datos obtenidos durante este acondicionamiento inicial. La temperatura interior se mantuvo constante a 20,4 °C durante este acondicionamiento inicial. El primer valor registrado a 225 microdeformaciones para el ciclo 1,000, 500 ciclos después de comenzar la prueba con el nivel de deformación objetivo, fue un 30% más bajo que el módulo registrado a las 25 microdeformaciones.

Durante los primeros 10.000 ciclos, la temperatura interior experimentó un aumento relativamente rápido que se detuvo en 21,1 °C, y luego fluctuó entre este valor y 20,8 °C hasta el ciclo 32,500. En este momento, el módulo complejo había experimentado una disminución del 72% con respecto al valor de 25 microdeformaciones y del 40% del valor del módulo a 500 ciclos a 225 microdeformaciones. Por lo tanto, según el criterio de fallo convencional, la probeta ya habría fallado.

El aumento de temperatura registrado fue muy bajo, inferior a 1 °C. La curva maestra obtenida para esta mezcla usando la misma configuración de carga no predijo la disminución del módulo complejo observado, Figura 3.

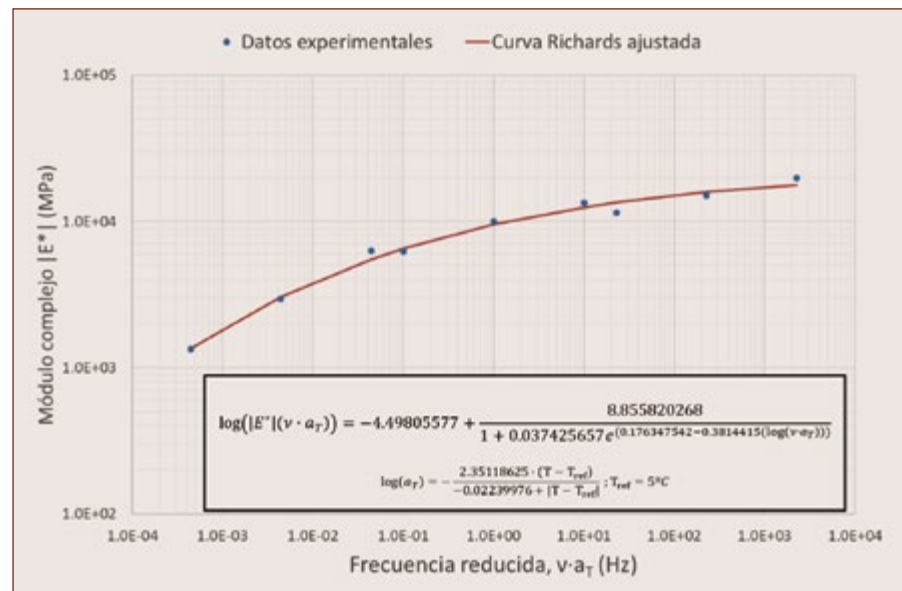


Figura 3. Curva maestra obtenida para la mezcla 50/70 utilizando la configuración EBADE.

Una posible explicación a la diferencia entre la temperatura interna medida y la correspondiente los módulos obtenidos según la curva maestra puede ser la siguiente. La sonda de termopar se insertó en un agujero taladrado en la probeta. Como la gran parte de la mezcla en volumen son áridos, el ligante representa menos del 12% del volumen con respecto a estos, existe una gran probabilidad de que la punta de sonda esté rodeada de árido. Los áridos son en su mayoría



elásticos, por lo que solo pueden calentarse por fricción con otros áridos, o por contacto con el asfalto hipotéticamente calentado, pero los movimientos relativos entre ellos deben ser muy pequeños. Además, es prácticamente imposible hacer un orificio en el espécimen que asegure que la punta del termopar caiga sobre la matriz de mástico, que es el material que puede experimentar el calentamiento por disipación viscosa.<sup>[11]</sup>

### Barridos de tiempo con y sin periodos de reposo

Los barridos de tiempo con y sin periodos de reposo se llevaron a cabo a 20 °C y 10 Hz y dos amplitudes de deformación diferentes, es decir, 200 y 225 microdeformaciones. Los periodos de reposo introducidos en el ensayo de 200 microdeformaciones consistieron en 10 minutos cada 200 ciclos, mientras que en el ensayo de 225 microdeformaciones fueron de cinco minutos cada 200 ciclos. La evolución del módulo complejo durante los ensayos con y sin periodos de reposo se muestra en las Figuras 4 y 5.

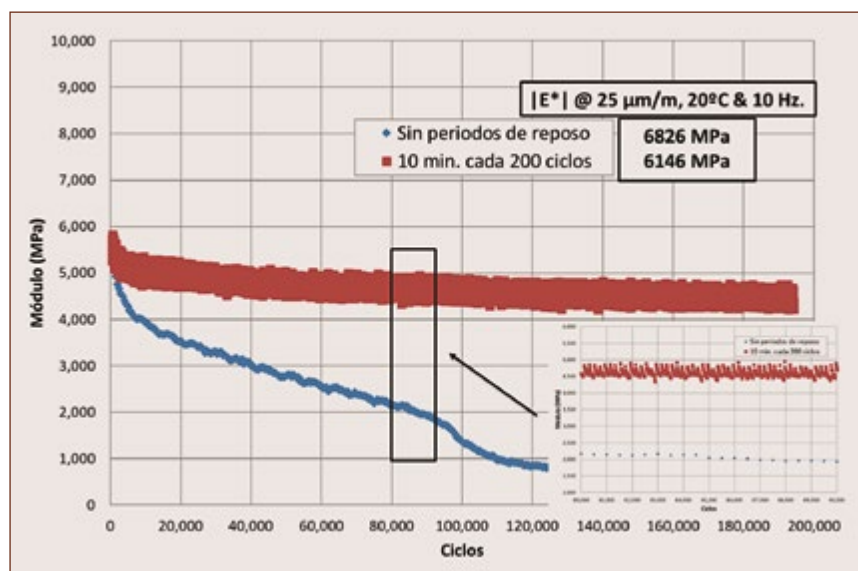


Figura 4. Barrido de deformaciones a 200 microdeformaciones, 20 °C y 10 Hz con y sin periodos de reposo.

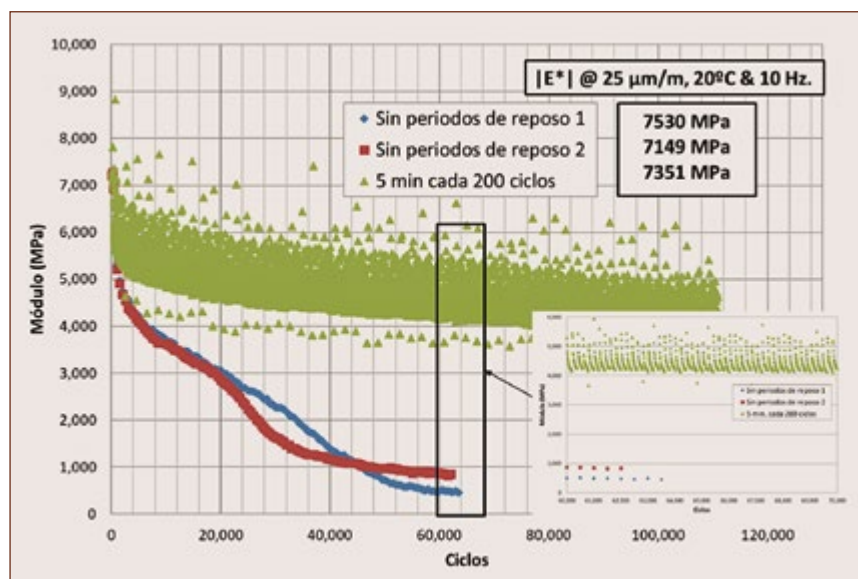


Figura 5. Barrido de deformaciones a 225 microdeformaciones, 20 °C y 10 Hz con y sin periodos de reposo.

Las diferencias en la evolución del módulo complejo durante barridos de tiempo con y sin períodos de reposo fueron obvias, como muestran las Figuras 4 y 5.

Los barridos de tiempo a 200 y 225 microdeformaciones causaron el fallo de las muestras aproximadamente a 100,000 y 30,000 ciclos, respectivamente. Sin embargo, no se alcanzó el fallo en ninguno de los ensayos realizados con períodos de reposo. Además, la disminución de la rigidez observada fue mucho menor. Es interesante observar el comportamiento del módulo complejo dentro de cada bloque de 200 ciclos entre períodos de reposo. La diferencia entre el módulo al comienzo y al final de cada bloque de 200 ciclos es de alrededor de 350 MPa para el ensayo a 200 microdeformaciones y alrededor de 700 MPa para el ensayo a 225 microdeformaciones. La forma de la curva del módulo complejo frente a los ciclos para cada bloque de 200 ciclos podría ajustarse con mucha precisión mediante una expresión de decaimiento exponencial, que típicamente representa el fenómeno de cambio de rigidez reversible. El calentamiento de la matriz de mástico de la probeta debido a la disipación viscosa durante el ciclado seguido del proceso de enfriamiento durante el reposo explicaría este tipo de comportamiento. La tixotropía y los efectos no li-

neales asociados con el alto nivel de tensión aplicado también podrían desempeñar un papel importante en esta recuperación. La autorreparación de las grietas también puede producir ese efecto, pero estudios anteriores han demostrado que sus efectos son muy inferiores a las recuperaciones observadas en estos ensayos, sobre todo a temperaturas 20 °C y sin presión de cierre de la grieta.<sup>[16,17]</sup>

### **Barridos de deformaciones**

Los barridos de deformaciones con retorno al nivel de deformación más bajo se realizaron a 20 °C y 10 Hz en probetas de mezcla 50/70. Se fijó un nivel máximo de deformación para cada uno de los ensayos realizado: 150 y 275 microdeformaciones. Una vez que se alcanzó la deformación máxima, se mantuvo durante 5,000 ciclos y a continuación la amplitud de deformación se redujo a 25 microdeformaciones indefinidamente. Los ensayos se detuvieron después de confirmar que los valores del módulo complejo se estabilizaron. El objetivo de prolongar el ciclo a baja tensión después de alcanzar una amplitud de esfuerzo relativamente alta fue dejar que la muestra se enfriara a la temperatura de ensayo inicial, suponiendo un calentamiento hipotético durante el ciclado, Figura 6.

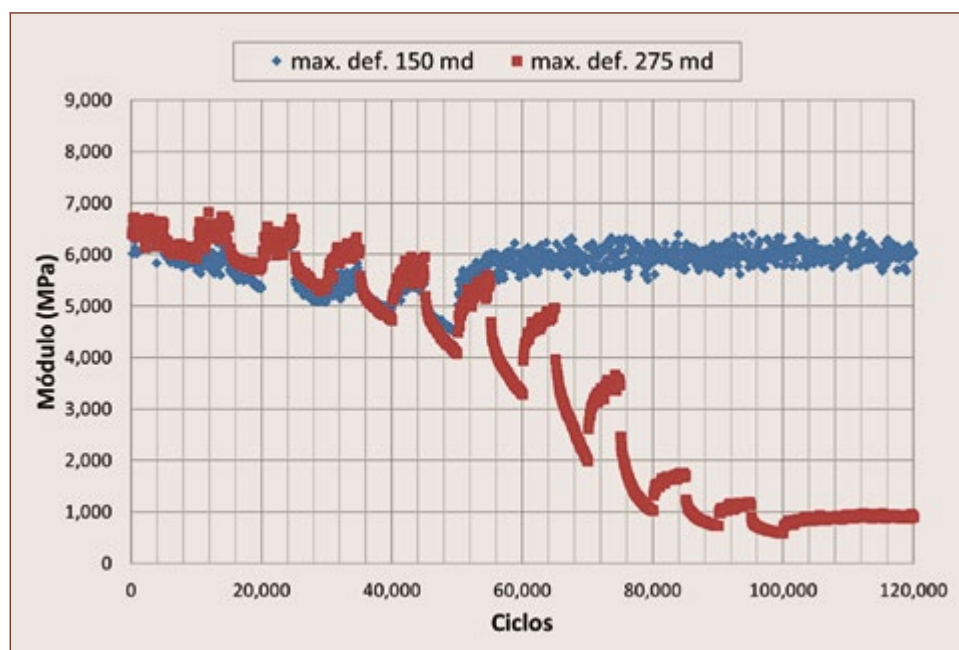


Figura 6. Barridos de deformaciones a 20 °C y 10 Hz en la mezcla 50/70 con deformación máxima limitada a 150 y 275 microdeformaciones.

La Figura 6 muestra cómo ambas réplicas muestran el mismo comportamiento hasta 50,000 ciclos. La alternancia entre los niveles de deformación alta y baja se observa claramente en la gráfica, es decir, en las deformaciones altas, el módulo complejo cae después siguiendo un decaimiento exponencial, mientras que en las deformaciones bajas el módulo complejo aumenta después siguiendo una curva logarítmica. Este tipo de comportamiento es característico de los cambios de temperatura,<sup>[11]</sup> como lo es la apertura de grietas y el sellado de grietas asociado con las capacidades de autorreparación del ligante. Sin embargo, a 20 °C y 10 Hz, la capacidad de fluencia del ligante puede reducirse significativamente, lo que hace que sea muy difícil volver a pegar las grietas previamente abiertas. Es bastante interesante observar cómo la reducción indefinida de la amplitud de deformación después de 50,000 y 100,000 ciclos produjo dos resultados muy diferentes. La probeta que no experimentó deformaciones superiores a 150 microdeformaciones recuperó casi por completo la rigidez inicial (durante los primeros 5,000 ciclos el módulo promedio fue de 6,313 MPa y desde el ciclo 80,000 hasta 700,000 el valor promedio fue de 5.992 MPa). Por otro lado, la probeta que soportó deformaciones de 225 microdeformaciones no recuperó la rigidez inicial en absoluto. De hecho, entre 65,000 y 70,000 ciclos (200 microdeformaciones) la caída del módulo fue mucho mayor que en los escalones anteriores y su forma fue más cercana a una caída lineal que a una caída exponencial.

## Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo fue cuantificar la importancia de los fenómenos reversibles que tienen lugar en los ensayos cíclicos de mezclas bituminosas, con especial atención a la importancia del calentamiento del material debido a la disipación viscosa. El calentamiento durante el ciclado es muy importante en los ligantes,<sup>[10-12]</sup> por lo tanto, debe esperarse que también lo sea en las mezclas asfálticas.


Las mediciones de la temperatura interna de las probetas durante los barridos de tiempo utilizando la configuración EBADE mostraron un aumento de la temperatura muy reducido. Las temperaturas registradas no pudieron explicar la reducción del módulo complejo. Sin embargo, la heterogeneidad de la mezcla y el diferente comportamiento termo-mecánico de los áridos y el ligante hacen muy difícil obtener una temperatura promedio de la muestra. De todos modos, la mezcla obtiene su cohesión de la mástico, por lo tanto, la temperatura de éste es más importante que la temperatura promedio de toda la muestra. Si el mástico experimentara carga cíclica podría aumentar su temperatura muy rápidamente y reducir su rigidez.<sup>[10-12]</sup> Este aumento en la temperatura del mástico no afectaría la temperatura de los áridos, ya que solo su superficie se calentaría por conducción y su porosidad los convierte en malos conductores térmicos. Dado que la relación de volumen de betún con respecto a los áridos es tan baja, un aumento en la temperatura del mástico no afectaría mucho la temperatura promedio de la probeta. Las simulaciones que siguen esta línea concluyen que el calentamiento explicó un tercio de la reducción de la rigidez.<sup>[12]</sup>

Fue imposible demostrar que el calentamiento debido a la disipación viscosa es la razón principal de la reducción de la rigidez. Los resultados no pudieron diferenciar entre calentamiento y curación, ya que la apertura de grietas y el pegado dentro de la muestra pueden tener el mismo efecto en su evolución de rigidez.

Los resultados muestran la gran importancia de los períodos de reposo y la capacidad de la mezcla de recuperar la rigidez, si se retira la sollicitación impuesta. La comparación entre los barridos de tiempo con y sin períodos de reposo demostró que estos tipos de ensayos no son adecuados para simular el comportamiento de la mezcla en el campo, en el que las cargas son prominentemente discontinuas. Claramente, hay un fenómeno de acumulación, que puede ser una combinación de calentamiento, tixotropía y no linealidad que reduce la rigidez muy rápidamente en los ensayos cíclicos, pero completamente reversible si la sollicitación aplicada se mantiene por debajo de cierto límite. Para la mezcla estudiada a 20 °C y 10 Hz, este límite se situó por encima de 150 microdeformaciones y por debajo de 275 microstrains, Figura 6.

El límite de deformación por debajo del cual la mezcla solo experimenta fenómenos reversibles, a una

temperatura y frecuencia determinadas, debe utilizarse para caracterizar el llamado comportamiento a fatiga de la mezcla y sustituir el enfoque clásico relacionado con el número total de ciclos hasta fallo.

En vista a los resultados presentados en esta ponencia, parece probable que el calentamiento interno desempeñe un papel importante en la reducción de la rigidez de las mezclas asfálticas durante el ciclado. Sin embargo, esta acumulación de temperatura es altamente improbable en el campo. Las mezclas se someten a un proceso de carga no continuo en el pavimento donde se producen períodos de diferente duración entre el paso de una carga y la siguiente. Además, estos períodos pueden ser aún más largos para que dos cargas se apliquen dos veces en el mismo punto. Por esta razón, es importante reconocer este comportamiento y considerarlo al escoger una mezcla bituminosa. 

## ¿Quieres profundizar?

- [1] H. Baaj, H. Di Benedetto, and P. Chaverot, "Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 6, no. 2, pp. 147–174, 2005.
- [2] L. Shan, Y. Tan, B. S. Underwood, and Y. R. Kim, "Separation of Thixotropy from Fatigue Process of Asphalt Binder," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2207, no. 1, pp. 89–98, 2011.
- [3] H. Di Benedetto, Q. T. Nguyen, and C. Sauzéat, "Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 12, no. 1, pp. 129–158, 2011.
- [4] F. Pérez-Jiménez, R. Botella, and R. Miró, "Damage and Thixotropy in Asphalt Mixture and Binder Fatigue Tests," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2293, no. 2293, pp. 8–17, 2012.
- [5] F. E. Pérez-Jiménez, R. Botella, and R. Miró, "Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 212–219, 2012.
- [6] F. Canestrari, A. Virgili, A. Graziani, and A. Stimilli, "Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders," *Int. J. Fatigue*, vol. 70, pp. 351–360, 2015.
- [7] E. Riahi, F. Allou, R. Botella, F. Dubois, J. Absi, and C. Petit, "Quantification of self-heating and its effects under cyclic tests on a bituminous binder," *Int. J. Fatigue*, vol. 104, pp. 334–341, 2017.
- [8] I. Isailovi, M. P. Wistuba, and A. Cannone Falchetto, "Influence of rest period on asphalt recovery considering nonlinearity and self-heating," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 321–327, 2017.
- [9] I. Isailovi, M. P. Wistuba, and A. C. Falchetto, "Experimental study on asphalt mixture recovery," *Mater. Struct. Constr.*, 2017.
- [10] F. E. Pérez-Jiménez, R. Botella, R. Miró, and A. H. Martínez, "Analysis of the thixotropic behavior and the deterioration process of bitumen in fatigue tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 277–286, 2015.
- [11] R. Botella, F. E. Pérez-Jiménez, and R. Miró, "Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 906–912, 2012.
- [12] R. Botella, F. E. Pérez-Jiménez, E. Riahi, T. López-Montero, R. Miró, and A. H. Martínez, "Self-heating and other reversible phenomena in cyclic testing of bituminous materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 809–818, 2017.
- [13] R. Lundström, J. Ekblad, and U. Isacsson, "Influence of Hysteretic Heating on Asphalt Fatigue Characterization," *J. Test. Eval.*, 2004.
- [14] S. Mangiafico, C. Sauzéat, H. Di Benedetto, S. Pouget, F. Olard, and L. Planque, "Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: Non-linearity, self-heating and thixotropy," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 16, no. Supplement 2, pp. 143–180, 2015.
- [15] E. Riahi *et al.*, "Modelling self-heating and thixotropy phenomena under the cyclic loading of asphalt," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 18, pp. 155–163, May 2017.
- [16] P. Ayar, F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gámez, "Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of rest periods," *Mater. Struct. Constr.*, 2018.
- [17] F. Moreno-Navarro, M. Sol-Sánchez, and M. C. Rubio-Gámez, "Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of healing," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 16, pp. 75–89, 2015.

# Análisis de costo de ciclo de vida de mezclas asfálticas usadas como capas de rodadura

---

Rey Omar Adame Hernández, Jorge Alarcón Ibarra,  
Jesus Martín del Campo, Ignacio Cremades Ibáñez  
Lasfalto S. A. de R. L., Zapopan, México  
omar.adame@lasfalto.com.mx

## Introducción

Los análisis de costo de ciclo de vida (ACCV), comúnmente son un punto importante cuando se planifica una carretera o cuando esta se reconstruye. Ejemplos:

- ¿Cuál es la inversión inicial para la carretera?
- ¿Cuánto se necesita para mantener una carretera con buenas condiciones en el pavimento?
- ¿Qué materiales se deben usar para construir el pavimento?

Las respuestas a estas preguntas pueden requerir de un ACCV, que esté basado en el concepto de “valor del dinero en el tiempo” para ayudar en la decisión final.

## Antecedentes y conceptos básicos

En Estados Unidos (USA), el concepto de ACCV se mencionó por primera vez en el famoso “libro rojo” el cual fue publicado por la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials* en 1960). Este fue desarrollado como una herramienta para ayudar a sus miembros, a tomar decisiones de inversión en proyectos de pavimentos, en función del costo económico proyectado y el rendimiento previsto. Posteriormente, estos conceptos de ACCV se mejoraron e incluyeron en ediciones posteriores de la guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento. La FHWA (*Federal Highway Administration*) actualmente continúa recomendando este tipo de análisis, como una referencia importante para tomar decisiones de inversión. Posteriormente, algunas agencias estatales de los Estados Unidos incorporaron en sus manuales las recomendaciones y protocolos para este tipo de estudios, utilizando entre otros factores, datos de rendimiento de sus sistemas de gestión de pavimentos y costos determinados a partir de proyectos construidos anteriormente.

Las agencias estatales de USA utilizan frecuentemente los ACCV para evaluar los costos generales a largo plazo de las alternativas de inversión. Consideran los costos anticipados durante la vida útil de cada alternativa, esto se considera como un proceso justo y equilibrado, para identificar el mejor valor a largo plazo entre las alternativas de pavimento (NCAT; Gu y Tran, 2019).

Cuando las agencias realizan un ACCV para la selección del tipo de pavimento, se excluyen muchos de los costos comunes asociados con la construcción y el mantenimiento (ejemplo: construcción de puentes, estructuras de drenaje, letreros y señales). Por lo tanto, los ACCV para la selección de un tipo de pavimento o capa asfáltica, actualmente solo incluyen costos que son únicos para cada estructura de pavimento, incluidos los costos iniciales de construcción, los costos anticipados para el mantenimiento y la rehabilitación, los costos del usuario y el valor terminal para cada alternativa del pavimento al final del periodo de análisis, este concepto suele llamarse “valor remanente de la vida de servicio” o “valor remanente”.

Actualmente, existen dos maneras de calcular un ACCV: método determinista y probabilístico, el cálculo o enfoque determinista asigna un valor fijo y discreto a cada variable de entrada. Mientras que, el enfoque probabilístico explica la incertidumbre y variación en las variables de entrada, por lo que el determinista es mucho más fácil de realizar y comparar sus resultados.

Para el cálculo del valor presente neto (VPN), y la comparación entre las diferentes opciones de mantenimiento, los cálculos suelen ser sencillos (ecuación 1), sin embargo, la determinación de los insumos puede resultar complicado, por ejemplo, la determinación de los costos futuros de las actividades (rehabilitación o mantenimiento), el tiempo que durarán esas actividades y los costos al usuario identificados en la vida útil de cada alternativa en estudio. Existen guías con recomendaciones sobre la forma de calcularlos, de tal manera que puedan determinarse de manera correcta para su uso en un ACCV.

El periodo de análisis es el lapso en años, durante el cual se evalúan las alternativas de un ACCV. De acuerdo con recomendaciones de la FHWA, se utilizan periodos lo suficientemente largos para capturar varios ciclos de mantenimiento y rehabilitación de las alternativas u opciones. Sin embargo, el periodo de análisis no debe ser demasiado largo, para disminuir las incertidumbres en la determinación de los aportes de ACCV para actividades futuras (FHWA, 2002).

Los periodos de rendimiento o durabilidades son el tiempo en años para que un pavimento o una alternativa recientemente construida alcancen el umbral de mantenimiento o rehabilitación. Si se man-

tiene y/o rehabilita una alternativa usando la misma estrategia durante el periodo de análisis, se puede utilizar la misma durabilidad. De acuerdo con la FHWA, esta recomienda que las agencias de autopistas determinen las durabilidades de las alternativas con sistemas de gestión y de acuerdo con datos y experiencias históricas, que, a su vez, puedan complementarse con fuentes nacionales, regionales o locales (FHWA, 2002; Walls y Smith, 1998). Un error común en la determinación de las durabilidades o experiencias históricas muy atrasadas es no tener en cuenta las mejoras de las tecnologías más recientes en el asfalto, pavimentación y la implementación de nuevas especificaciones. Tomando en cuenta lo anterior, de acuerdo con algunos datos, las durabilidades de las mezclas asfálticas en los últimos años se han logrado aumentar hasta en un 50% con respecto a las tecnologías de los años 90's:

- Los costos durante un periodo de análisis. Por lo general, incluyen los costos iniciales de construcción, los costos de mantenimiento posteriores, el diseño de rehabilitación y los costos de construcción durante el periodo de análisis.
- Los costos iniciales se calculan en base a las cantidades y los precios de los materiales en el momento en que se va a iniciar la construcción. Los precios unitarios pueden variar según los volúmenes de construcción y ubicación del proyecto.
- Los precios unitarios de la construcción inicial y las actividades futuras se determinan al momento de realizar el ACCV, y se mantienen constantes durante todo el periodo de análisis. La escalada en los precios futuros se contabiliza en una tasa de descuento real, que se utiliza para descontar los costos futuros a sus valores actuales.

El valor terminal o valor remanente, representa el valor esperado de una alternativa al final del periodo de análisis. Este se compone de dos variables: el valor remanente y el valor de recuperación. El valor remanente es el valor residual de una alternativa de pavimento cuando su durabilidad se extiende más allá del final del periodo de análisis. El valor de recuperación es el valor neto determinado a partir de la reutilización o el reciclaje de materiales retirados de una alternativa de pavimento al final de su vida útil, esto, si ocurre antes o al final del periodo de análisis.

Por otra parte, la tasa de descuento se interpreta como el incremento en el costo de las cosas con el paso del tiempo, al realizar un ACCV, esta se utiliza para calcular el valor presente de los costos y retornos futuros. Así, en el presente un costo o devolución en el futuro vale menos para la agencia que en el año en que ese costo-devolución ocurrirá, en otras palabras, la tasa de descuento es una tasa de interés inversa. También, las tasas de descuento pueden reflejarse en términos reales o nominales, las reales reflejan el valor en tiempo real del dinero sin prima de inflación, mientras que las nominales consideran la inflación de las inversiones futuras. Wall y Smith en 1998 sugirieron que los ACCV deberían utilizarse usando tasas de descuento reales, así se elimina la necesidad de estimar e incluir una prima de inflación tanto para los costos como para las tasas de descuento.

## Durabilidades de mezclas asfálticas como capa de rodadura

Las mezclas asfálticas tienen diferentes durabilidades y estas dependen directamente de las características volumétricas y materiales que la componen (asfalto, agregado, contenido de asfalto, VAM, VFA, vacíos de aire, entre otros factores), con la misma importancia influyen: el diseño de la mezcla, estructura del pavimento y la ejecución de forma correcta del proceso constructivo de cada una de las capas del pavimento.

Las durabilidades esperadas de este trabajo están basadas en procesos constructivos con las mejores prácticas, esto significa que las capas superficiales (capas de rodadura), se espera sean colocadas en una carretera y estructura de pavimento diseñados adecuadamente, donde la durabilidad de la capa super-

ficial no se vea afectada por grietas de fatiga de abajo hacia arriba. También, se supone que las mezclas asfálticas se han diseñado y compactado correctamente. Como ejemplo, una mezcla asfáltica SMA (*Stone Mastic Asphalt*) que muestra deformaciones está mal diseñada, una mezcla OGFC que tiene desprendimientos en las primeras semanas está mal diseñada. La durabilidad de las capas de rodadura también depende de las condiciones locales, el clima, el tipo o grado de desempeño del asfalto, temperatura de fabricación y colocación, agregados empleados, que se respeten las cargas máximas permisibles por eje y las cargas por eje reales utilizadas (las cargas excesivas afectan de manera importante la durabilidad de un pavimento). En algunos países, la resistencia al deslizamiento de la capa de rodadura es un factor dominante para determinar un índice de servicio, por lo que la durabilidad depende del nivel de fricción requerido. En consecuencia, para mantener el camino en buenas condiciones es suficiente reemplazar solo la capa de rodadura, así, la capa superficial es ahora la dominante y en gran medida la durabilidad de la estructura dependerá de esta.

## Durabilidades en Europa (Experiencia EAPA)

Para obtener los datos mostrados en el documento de EAPA-*Long life asphalt Pavements* esta asociación formó un comité técnico en el que se investigó y se debatieron las durabilidades de las capas de rodadura en Europa, los datos se basaron en un cuestionario y un panel de discusión de expertos para determinar la durabilidad en años de los diferentes tipos de mezclas asfálticas, estas en condiciones de tráfico bajas, intermedias y altas. Las durabilidades reportadas por la *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) y tomadas en cuenta para este análisis fueron las siguientes:

**Tabla 1. Durabilidades reportadas por la *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2017)**

Mezcla asfáltica	Promedio Durabilidad EAPA (años)
Asphalt Concrete (AC)	14
Asphalt Concrete Tin Layer 30-40 (ACTL 30-40) BBTM	11
Porous Asphalt-OGFC-Mezcla abierta	10
SMA (sin asfalto modificado)	20

### **Durabilidades en Estados Unidos de Norte América (Estudios NCAT)**

Las durabilidades fueron obtenidas a través de un estudio realizado para mezclas asfálticas SMA y mezclas densas Superpave con asfalto modificado, inicialmente se recibieron y analizaron datos de sistemas de gestión de pavimento de nueve agencias de carreteras de USA, esto para poder comparar entre ellas su rendimiento en carreteras y pavimentos equivalentes (Yin, 2018). La mayoría de las secciones estudiadas en los análisis aun no cumplían diez años de vida, y por lo tanto sus niveles de servicio a largo plazo aún no están disponibles, es así como debieron predecirse mediante un modelo de deterioro. En lo general, se usó un modelo de predicción de rendimiento logístico en forma de “S”, esto porque podría simular la tendencia general de desarrollo de las condiciones del pavimento (Wang 2016). Esta simulación supone que la condición del pavimento en edades tempranas o en los primeros años el pavimento se deteriora lentamente y después aumenta su velocidad de deterioro significativamente.

En general, de los datos de las nueve agencias analizadas en el estudio, la mezcla SMA mostró un rendimiento y tuvo una vida útil prevista más larga que las mezclas de Superpave con las que se comparó, analizadas en carreteras con tráfico similar. La durabilidad en vida útil del SMA comparado con Superpave puede ser superior entre cinco a ocho años para pavimentos flexibles, y varía de uno a 13 años más para pavimentos compuestos (Yin *et al.*, 2018), para esto, entiéndase que los pavimentos compuestos son pavimentos rígidos que tienen en su superficie una capa asfáltica (capa de rodadura).

De las nueve agencias que muestra el estudio, los datos y durabilidades que fueron tomadas en cuenta para ser adoptadas en este trabajo fueron los obtenidos por las agencias de los estados de: Alabama y Virginia, por ser las que realizan las intervenciones con un índice de servicio más bajo. Es decir, permiten que el pavimento baje sus estándares un poco más en comparación con las demás agencias, para tomar una acción de reconstrucción o mantenimiento de la capa superficial (capa de rodadura). De forma resumida sobre cómo se realizan los análisis por estado, se explica a continuación.

### **Experiencia de Alabama**

El departamento de transporte de Alabama utiliza métodos automatizados para evaluar su red, la información que recauda de sus pavimentos flexibles incluye: grietas transversales, grietas asociadas y no asociadas a cargas, ahuellamiento, macro textura, bacheo y desprendimiento severo. Los datos de grietas se miden y se reportan en términos de pies lineales por cada 0,01 millas, después, estos datos, juntos con los demás deterioros recopilados se analizan para determinar un índice de condición del pavimento. Para esto, existe una ecuación que se define como el promedio aritmético de cuatro métricas o parámetros: rugosidad del pavimento, grietas en la trayectoria de las ruedas, ahuellamiento y edad del pavimento, el índice “PCR” (*Pavement Condition Rate*), maneja una escala de cero a 100, donde 100 indica una condición libre de problemas y cero indica una condición completamente fallida del pavimento, por decisión del departamento de transporte de este estado un valor PCR de 55 o menos, se considera una condición “marginal” que requiere rehabilitación o reconstrucción. Para esto el *National Center for Asphalt Technology* (NCAT) en colaboración con el departamento de transporte presentó los datos de 179 secciones de pavimento flexible de las cuales



# CONOCE NUESTRO PLAN DE FINANCIAMIENTO EN EQUIPOS PARA PAVIMENTACIÓN



## FINANCIAMIENTO:

DESDE

**24**  
MESES

+

**0%**  
INTERÉS

+

**15%**  
ENGANCHE



MÁS INFORMACIÓN

Los equipos de pavimentación Cat® ofrecen una solución completa para la industria de la pavimentación, lo que incluye equipos, capacitación, asesoramiento, servicio y respaldo.

\*Vigencia al 30 de Septiembre 2021. Precios en USD + IVA. Sujeto a aprobación de crédito por Grupo Financiero Caterpillar. No aplica con otras promociones. Aplican restricciones.



Contáctanos

800-926-2347 | [www.madisa.com](http://www.madisa.com)

    /MadisaCat

**MADISA** 

☎ 462 623 1370

@ [ventas@asfaltos.mx](mailto:ventas@asfaltos.mx)

📍 Paseo de la Altiplanicie #11  
Torre Wolken, 3er Piso Int.C  
Villas de Irapuato, Irapuato,  
Guanajuato, México. C.P. 36670

*Combustibles alternos*

*Asfaltos*

*Emulsiones*

## MISIÓN

Ofrecer a nuestros clientes certidumbre en el suministro, confianza en la entrega y calidad en los productos asfálticos y combustibles que requiere el mercado de la construcción de pavimentos y la industria en general de nuestro país

- Intercambiadores de calor
- Calentadores de aceite térmico
- Tuberías y forros térmicos
- Proyectos llave en mano
- Tanques fijos y móviles para almacenar asfalto
- Silos para almacenamiento de mezclas asfálticas
- Plantas para fabricación de asfaltos modificados
- Plantas para fabricación de emulsiones



Somos una empresa líder en México en la aplicación de Diseño y Tecnología para la fabricación de equipos especializados para la industria del asfalto y sus derivados. Innovamos constantemente para estar a la vanguardia con altos estándares de calidad.



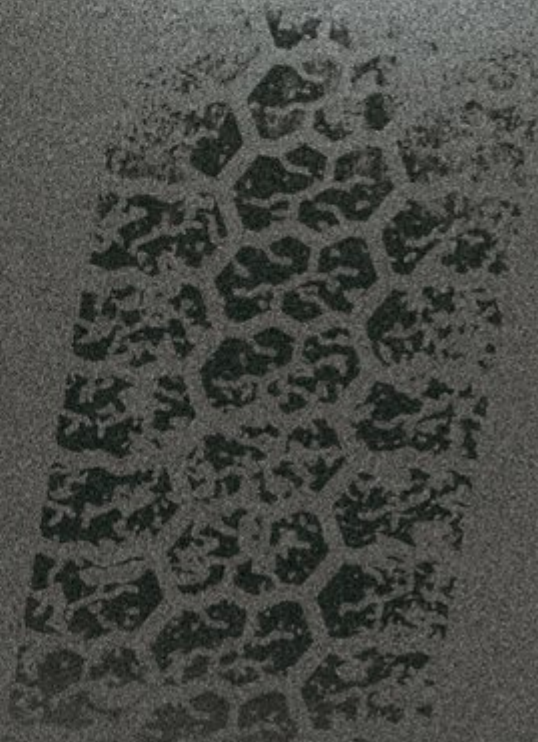
Tel. (52) 462-623-1391

[ventas@tanquesyremolques.mx](mailto:ventas@tanquesyremolques.mx)

Paseo de la Altiplanicie 11, Torre Wolken  
3-C Irapuato, Guanajuato C.P. 36670

[www.tanquesyremolques.mx](http://www.tanquesyremolques.mx)

UNA NUEVA VIDA,  
**PARA UN LARGO CAMINO**



neotechasphalt.mx Tel: (477) 641 3239

**NEOTECH**<sup>®</sup>  
ASPHALT

33 tienen SMA como capa superficial y 146 secciones mezcla densa de Superpave modificada con polímero, todas las secciones tenían un nivel de tráfico de más de 10 millones de ejes equivalentes (ESAL).

Para este estado el modelo de desempeño se utilizó primero para ajustar los datos medidos y después en base a estos predecir la durabilidad, por lo que se predijeron durabilidades de 16 años para ambas mezclas.

### Experiencia de Virginia

El departamento de transporte de Virginia utiliza una VAN llamada “ARAN” para recopilar datos del pavimento, este sistema se basa en la obtención de imágenes digitales y una metodología de detección de grietas automatizada. El ARAN está equipado con un instrumento de medición de distancia, un sistema de medición laser, un sistema de perfil longitudinal laser, cámaras orientadas hacia el pavimento y un GPS. La recopilación de datos la realizan anualmente y estos se engloban en un parámetro relacionado con las cargas (LDR) y el agrietamiento longitudinal y transversal se relaciona en un parámetro no relacionado a las cargas (NDR). A los parámetros LDR y NDR se les asigna una calificación y la

menor de estas se define como el índice de condición crítica (CCI, por sus siglas en inglés). El CCI tiene una escala de cero a 100, con 100 que indica una condición sin problemas y cero para una condición fallida completa. Las secciones de pavimento con un CCI de 60 o menos se consideran “deficientes” y necesitan rehabilitación y reconstrucción inmediatas.

Para este estado las durabilidades fueron: 19 años para las capas construidas con SMA y 14.4 años para las mezclas Superpave modificadas con polímero. Para la obtención de los resultados se analizaron 100 secciones de pavimento de las cuales 46 eran con SMA y 44 con mezcla Superpave.

### Durabilidades finales

Para este estudio, las durabilidades fueron adoptadas de acuerdo con las experiencias de Estados Unidos y Europa, las durabilidades promedio publicadas por la EAPA, *Long Life Asphalt Pavements-Technical* versión 2017 y de acuerdo con experiencias en USA determinadas por el NCAT, para las mezclas SMA y Superpave en el 2019 (NCAT Report 18-03). De acuerdo con las durabilidades promedio de cada documento, las durabilidades obtenidas después de un análisis son:

**Tabla 2. Durabilidades determinadas en años para cada una de las mezclas asfálticas utilizadas en el análisis de costo de ciclo de vida de este estudio**

Mezcla asfáltica	SMA PG 76	SMA PG 64	Densa PG 76	Densa PG 64	CASAA PG 76	OGFC PG 76
Durabilidad (años)	22	17	15	8	9	7

### Estructura de pavimento flexible

En este apartado se proporciona un ejemplo del uso de las capas de rodadura, se presenta una estructura de pavimento hipotética, en la que las rehabilitaciones están previstas que solo se hagan en la última capa asfáltica (capa de rodadura), esta al finalizar la durabilidad de cada una de las opciones. Todas las secciones son diseñadas con una capa de rodadura de 4 cm de espesor colocadas sobre una capa densa de alto módulo con 14 cm de espesor y debajo de esta, una capa absorbidora de tensión de 7 cm (un conjunto de capas asfálticas de 25 cm). en el caso del

uso de la mezcla abierta se garantiza que colocando una mezcla densa en la capa inferior el agua no penetrará a las capas granulares, de igual forma para el CASAA. Para el caso de la mezcla densa de Superpave y SMA los contenidos de vacíos en la mezcla están cercanos al 4% lo cual también garantiza que no existe comunicación entre los huecos y por ende el agua no puede drenar entre la capa. Las capas granulares de arriba abajo: base granular de 30 cm, subbase de 35 cm, subrasante de 40 cm y un terreno natural semi-infinito. Las propiedades mecánicas de los materiales se ingresaron con valores estándar en la práctica mexicana y se diseñaron para una vida

útil de 30 años (periodo de análisis más largo en este trabajo), todo en el software “IMT PAVE” del Instituto Mexicano del Transporte.

Datos:

- TDPA: 4775
- Factor de distribución por carril: 0.9
- Factor de distribución por sentido: 1
- Horizonte del proyecto: 30 años
- Tasa de crecimiento: 3,5 %
- Nivel de carga usado: muy alta sobrecarga
- Confiabilidad: 85%
- Vida a fatiga: > 30 años
- Vida a deformación: > 30 años

### Análisis de costo de ciclo de vida (ACCV)

Este estudio se llevó a cabo recabando información de durabilidades de mezclas asfálticas en Europa y Estados Unidos, esto debido a la ausencia de datos precisos de las capas de rodadura en la red carretera mexicana. Sin embargo, los demás datos de entrada

son de acuerdo con las prácticas en nuestro país. Estos datos fueron usados para determinar y comparar el valor presente neto (VPN), de las mezclas asfálticas comúnmente utilizadas como capa de rodadura (el VPN es el concepto con el que se suele referir a un ACCV), el objetivo general del ACCV es determinar las diferencias en los VPN's de las diferentes mezclas, así, a través de este análisis se espera sea una herramienta más para ayudar en la toma de decisiones entre las opciones incluidas como capas de rodadura. La suposición hecha en el ACCV fue construir un km/carril con una capa de rodadura de cuatro centímetros de espesor y 3,5 metros de ancho, usando los costos de fabricación, puesta en obra, colocación y compactación de mezclas asfálticas en México. Además, la tasa de descuento utilizada en promedio es de 10% de acuerdo con lo recomendado por el Instituto Mexicano del Transporte (Solorio, Garnica, Montoya & Hernández, 2016). La Tabla 3 resume los datos de entrada en el ACCV de este trabajo y después se muestra la ecuación 1, esta utilizada para determinar el VPN, misma que fue utilizada en este trabajo.

**Tabla 3. Datos de entrada en el Análisis de Costo de Ciclo de Vida**

Tipo de pavimento	Tasa de descuento (%)	Periodo de análisis (años)	Capa de rodadura	Vida de servicio de la capa de rodadura
Pavimento flexible para tráfico mayores a 10 millones de ejes equivalentes	10	20, 25 y 30	SMA PG 76	22
			SMA PG 64	17
			Densa PG 76	15
			Densa PG 64	8
			CASAA PG 76	9
			OGFC PG 76	7

Aunque los análisis de ciclo de vida tradicionales requieren periodos de análisis (35 a 40 años), que incluyan al menos una actividad de rehabilitación en el pavimento, periodos de análisis más cortos fueron utilizados en este trabajo (20, 25 y 30 años), esto para comparar los beneficios del ciclo de vida del SMA contra las mezclas densas de Superpave, mezclas de tipo CASAA y las mezclas de granulometría abierta (OGFC). Para cada caso de estudio el periodo de análisis fue en base a la durabilidad promedio de la mezcla de tipo SMA con asfalto PG 76 de acuerdo con experiencias en USA y Europa. Consideran-

do que todas las mezclas analizadas fueron usadas en una autopista con una estructura de pavimento y tráfico similares.

Para realizar una comparación equitativa entre las diferentes capas de rodadura, los costos anticipados futuros, los costos de mantenimiento y rehabilitación y los costos de los usuarios, en primera instancia se “descuentan” en el presente para dar cuenta del valor temporal del dinero. Si una alternativa al final del ciclo de vida tiene un valor remanente al final del periodo de análisis este se descuenta a su valor actual. Para este estudio se determinó el

VPN de la construcción inicial, la alternativa de pavimento con el costo de ciclo de vida más bajo (es decir VPN), es típicamente la mejor alternativa, para cada una de las alternativas (tipo de mezcla), se calculó su VPN con la fórmula económica que se muestra en la ecuación 1.

$$VPN = VP_0 + \sum VF_i * \left[ \frac{1}{(1+r)^{n_i}} \right] - VR * \left[ \frac{1}{(1+r)^{n_s}} \right] \quad (1)$$

Donde:

VPN = Valor Presente Neto

VP<sub>0</sub> = Valor Presente del costo de la primera sobre capa

VF<sub>i</sub> = Valor futuro de la capa

VR = Valor Remanente de la capa al final del periodo de análisis

r = Tasa de descuento

n<sub>i</sub> = Tiempo necesario para aplicar la primera sobre capa (durabilidad de la capa)

n<sub>s</sub> = Periodo de análisis

## Análisis de resultados

### Periodo de análisis de 20 años

En este análisis se presentan los costos de una sección tipo, dicha sección consta de 1 km de longitud, 3,5 metros de ancho y 4 cm de espesor, dimensiones aplicadas para la colocación de todas las mezclas asfálticas analizadas en este trabajo y en las que se incluye el porcentaje de riego de liga necesario para cada opción y el flete redondo de los equipos de pavimentación, siendo la suma de estos conceptos el costo inicial. Para los costos de la rehabilitación se incluye la construcción de la misma sección (costo inicial) más los costos de señalamiento y control de tráfico, los costos de fresado de 4 cm de espesor y el transporte (flete) de los equipos de construcción a la obra en un radio de 50 km desde la planta de mezclado (ver Tabla 4).

De todas las opciones de uso de mezclas asfálticas como capa de rodadura incluidas en este estudio, la mezcla de tipo de SMA PG 76 y PG 64 son las que tienen un mayor costo inicial en la sección tipo, esto por el contenido de asfalto más elevado, la fibra de celulosa (estabilizador), configuración en la trituradora para tener agregados más cúbicos y polímeros para mejorar sus propiedades reológicas y de desempeño, en segundo término las mezcla densa de Superpave con PG 76 y la mezcla de granulometría abierta OGFC PG 76 son las que tienen un costo intermedio, mientras que las mezclas de tipo CASAA PG 76 y la mezcla densa PG 64 son las de menor costo inicial. Sin embargo, después de analizar las diferentes opciones las mezclas SMA y la densa con PG 76 son las que presentan el menor Valor Presente Neto, es decir, son las mejores opciones con respecto a un ACCV para un periodo de 20 años, esto se demuestra en la Tabla 4, Destacando en esta el SMA PG 64, que es la que presenta el menor valor de VPN. Para este periodo, la mezcla SMA PG 64 comparada con la densa PG 64, CASAA PG 76 y OGFC PG 76 (mezclas con el menor costo inicial, pero con los costos de ciclo de vida más altos), el costo de ciclo de vida (VPN), representa un ahorro de entre un 34 hasta un 49% en el costo de ciclo de vida. Mientras que, con respecto a una mezcla densa de Superpave PG 76 y el SMA PG 76. los costos de ciclo de vida son muy parecidos, sin embargo, el coeficiente de fricción es un parámetro importante,

parámetro en el que las mezclas SMA presentan mejores valores además de la poca susceptibilidad al ahuellamiento comparadas con las mezclas Superpave, por lo que la mezcla SMA es la mejor opción. Para el caso del SMA PG 76, es necesario evaluar si el clima de la zona del proyecto justifique el uso de un asfalto con ese grado de desempeño.

**Tabla 4. Tabla de datos de entrada en el análisis de costo de ciclo de vida**

Concepto	Unidad	SMA PG 76	SMA PG 64	Densa PG 76	Densa PG 64	CASAA PG 76	OGFC PG 76
Suministro y colocación de mezcla asfáltica 4 cm de espesor, incluye riego de liga	m <sup>2</sup>	\$215	\$192	\$186	\$164	\$166	\$181
Flete redondo de los equipos de tendido y compactación (radio de 50 km)	evento	\$39,000	\$39,000	\$39,000	\$39,000	\$39,000	\$39,000
Costo inicial de construcción: 1 km de longitud-3.5 m de ancho y 4 cm de espesor	Pesos	\$790,835	\$710,405	\$690,770	\$614,120	\$618,985	\$671,380
Control de tráfico	evento	\$36,400	\$36,400	\$36,400	\$36,400	\$36,400	\$36,400
Fresado: 4 cm de espesor	m <sup>2</sup>	\$33	\$33	\$33	\$33	\$33	\$33
Fresado de la sección tipo: 3.5 m de ancho, 1 km de longitud y 4cm de ancho	sección	\$115,430	\$115,430	\$115,430	\$115,430	\$115,430	\$115,430
Costo de una actividad de rehabilitación	Pesos	\$942,665	\$862,235	\$842,600	\$765,950	\$770,815	\$823,210
Durabilidad	Años	22	17	15.25	8	9.25	7
Periodo de análisis	Años	20	20	20	20	20	20
Número de intervenciones en el periodo de análisis	evento	1	2	2	3	3	3
Suma de costos de las intervenciones en el periodo de análisis	Pesos	\$0	\$862,235	\$842,600	\$1,531,900	\$1,541,630	\$1,646,420
Tasa de descuento	Porcentaje	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Valor remanente al final del periodo de análisis	Pesos	\$71,894	\$710,076	\$552,525	\$382,975	\$583,319	\$117,601
NPV 19-03 Gu	Pesos	\$780,148	\$775,445	\$805,603	\$1,271,836	\$1,170,686	\$1,498,773
Costo Anual Equivalente	Pesos	\$91,636	\$91,084	\$94,626	\$149,389	\$137,508	\$176,045

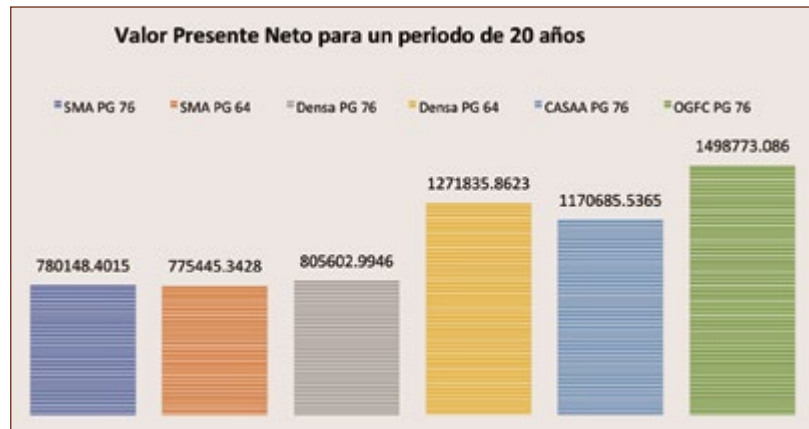


## La AMAAC te invita a unirse a sus comités técnicos

1. Permanente
2. Mezclas densas de alto desempeño y capas de rodadura
3. Reciclados
4. Maquinaria y construcción
5. Productos asfálticos
6. Supervisión y control de calidad

7. Enseñanza y Educación
8. Seguridad vial y humana
9. Impulso profesional

**Próximamente: Comité Editorial**



Gráfica 1. Valor presente neto de las diferentes opciones de mezcla asfáltica.

### Periodo de análisis de 25 y 30 años

De forma complementaria se analizaron periodos de análisis de 25 y 30 años. Para el caso de 25 años la tendencia es muy similar a los resultados obtenidos para un periodo de 20 años (ver Gráfico 2), las opciones afectadas son la mezcla densa PG 64 y OGFC PG 76, sobre todo en el periodo de análisis de 30 años debido al número de intervenciones que ese periodo de tiempo contempla.

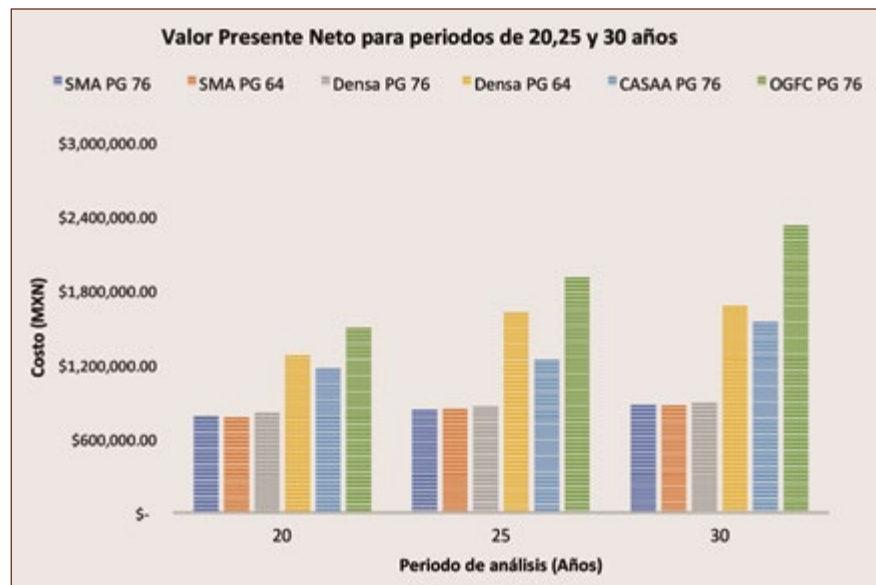


Gráfico 2. Valores presentes Netos de las diferentes opciones de capa de rodadura en periodos de análisis de 20, 25 y 30 años.

### Costo usuario

Los “costos-usuario” son aquellos originados por los usuarios de una autopista que circulan o viajan en el proyecto y que se consideran en un ACCV, o los usuarios que no pueden circular en el proyecto debido a los desvíos realizados por



la dependencia o administración responsable de la construcción o reparación de un determinado tramo, estos costos incluyen tres componentes:

- Los costos operativos del vehículo (COV), que se determinan multiplicando la cantidad de componentes, por ejemplo: cambio (disminución), de velocidad en la zona de trabajo, parada o tiempo de inactividad afectados por el porcentaje de costo asignado a cada componente de COV.
- Costos de retraso del usuario, estos resultan de multiplicar las horas de tiempo de viaje por el valor en dólares de una hora en demora asignada para cada clasificación de vehículo.
- Costo de choque, se determina multiplicando el número de accidentes adicionales por la tasa de costo asignada a cada tipo de choque.

Para este estudio, se realizó un ejercicio para determinar el costo usuario para cada una de las alternativas, en este, se utiliza un TDPA de 4775 vehículos (previamente descrito en el apartado 3), a su vez, el TDPA se divide en un porcentaje de vehículos de pasajeros de 79.6%, camiones ligeros de 7.3% y camiones pesados de 13.1%. A cada clasificación se le asigna un costo por hora de retraso originado por los trabajos de reconstrucción.

Costo por hora de retraso:

- Vehículos de pasajeros: \$ 21.89 USD

- Camiones ligeros: \$ 23.60 USD
- Camiones pesados: \$ 29.65 USD
- \* costos usuarios calculados para el 2020 (Galehouse).

En el tramo en que se realizan las reconstrucciones es un cuerpo de dos carriles (mismo sentido), por lo que uno permanecerá en servicio para reconstruir el otro, en el tramo la velocidad máxima de circulación es de 100 Km/h en condiciones normales, mientras que durante los trabajos de reconstrucción la velocidad se reduce a 45 km/h, resultando en un tiempo de retraso en el tramo de 1.1 minutos. suponiendo que todos los trabajos para ese km de carretera durarán un máximo de cinco días, los costos usuarios generados para todas las alternativas en ese lapso para ese tramo son:

- Costo usuario generado por día para vehículos de pasajeros en el tramo: \$ 30 508.09 MXN
- costo usuario generado por día para camiones sencillos en el tramo: \$ 3 011.36 MXN
- costo usuario generado por día para camiones pesados en el tramo: \$ 6 805.66 MXN

El impacto que tiene el costo usuario en la conservación de carreteras para este estudio es de entre el 15 y 30% del valor presente de cada una de las opciones, cifra importante para tomar en cuenta por la dependencia o Administradora del tramo en estudio.

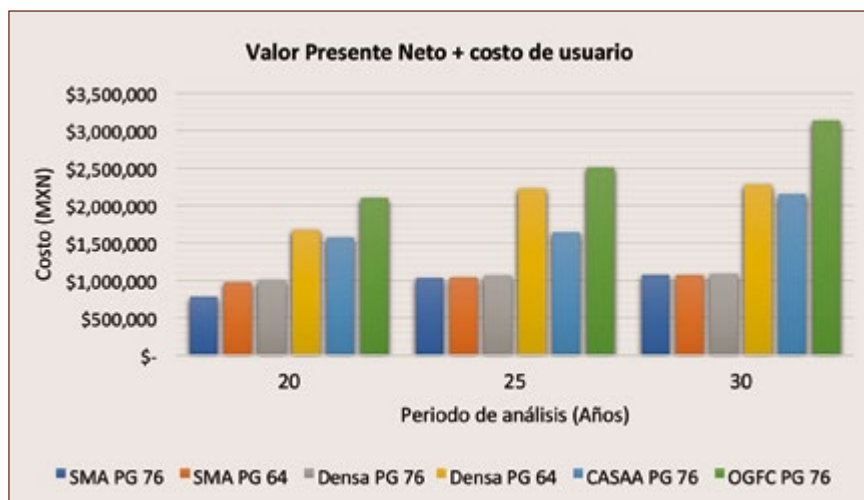



Gráfico 3. Valores presentes Netos más el costo usuario de las diferentes opciones de capa de rodadura en periodos de análisis de 20, 25 y 30 años.

## Conclusiones

El objetivo de este estudio fue poder determinar los beneficios del análisis de costo de ciclo de vida del SMA, frente a las demás opciones de capas de rodadura usadas. Se usó una ecuación propuesta por el NCAT para determinar el valor presente neto y a través de este parámetro determinar la mejor opción en periodos de 20 a 30 años. La información recopilada de experiencias como Europa y USA, nos muestran un panorama de las durabilidades en esos países de las capas de rodadura y a lo que deberíamos igualar o mejorar como practica de pavimentos en México. A partir de este estudio se determinaron las siguientes conclusiones:

- A pesar de contar con uno de los costos iniciales más elevados, la mezcla SMA PG 64 cuenta con el valor presente neto más bajo, es decir es la mejor opción en periodos de análisis por encima de los 20 años.
- Las mezclas SMA PG 76 y PG 64 junto con la mezcla densa son las mejores opciones desde el punto de vista de un análisis de costo de ciclo de vida, sin embargo, las mezclas densas en algunos países no se recomiendan como capa de rodadura, razón que debe tomarse en cuenta.
- El costo de un ciclo de vida entre las opciones puede ser hasta el doble entre las diferentes mezclas asfálticas, situación a tomar en cuenta por las dependencias y administración de carreteras.
- El calculo del costo usuario es importante para determinar el impacto indirecto generado por retrasos, para este caso los costos usuarios generados están entre el 15 y 30% con respecto del Valor Presente Neto. 

## ¿Quieres profundizar?

- 
- <sup>[1]</sup> Fan Gu, Nam Tram. May. NCAT Report 19-03 *Best Practices for determining life cycle costs of asphalt pavements*, 2019.
  - <sup>[2]</sup> Fan Yin, Randy west. NCAT Report 18-03 *Performances and life cycle cost benefits of Stone matrix*, August 2018.
  - <sup>[3]</sup> *Long-Life Asphalt Pavements* – Technical versión (Europa, 2007).
  - <sup>[4]</sup> Life cycle cost analysis primer- US department of Transportation (USA, 2002)
  - <sup>[5]</sup> Noh, F., Adame, R., Sandoval, I., Villa, E., Cremades I., *Estudio de durabilidad de mezclas asfálticas utilizadas como capas de rodadura en pavimentos flexibles*. CILA 2019.
  - <sup>[6]</sup> PA-CR-04/2015 *Protocolo, Diseño, fabricación y colocación de las diferentes capas de rodadura en caliente*. (AMAAC, 2008).
  - <sup>[7]</sup> Protocolo AMAC, *diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*, 2013.
  - <sup>[8]</sup> Solorio, R., Garnica, P., 2017. *Gestión de carreteras y HDM-4, Vías terrestres*, Marzo Abril, # 46, pp. 12-16.
  - <sup>[9]</sup> Moral, A., 2018. *El análisis del ciclo de vida en la evaluación ambiental de secciones de firme*, Carreteras, Julio-agosto. Pp. 35-45.
  - <sup>[10]</sup> Solorio, R., Garnica, P., Ortega, M., Hernández, R., 2017. *Metodología basada en el HDM-4 para la selección de metas de desempeño en la red federal de carreteras*.
  - <sup>[11]</sup> Limón, L., Espinoza, J., *La importancia de la conservación en México*. Publicación asfáltica #52, AMAAC 2017.

# Emulsiones asfálticas por grado de desempeño

---

Santiago Kröger, Ignacio Kröger  
GRUPO BITAFAL, Colonia Nicolich, Uruguay,  
santiago@bitafal.com.uy  
XXCILA

## Introducción

Los tratamientos superficiales son de las técnicas de pavimentación más usadas en Uruguay desde rutas de primer orden hasta caminos departamentales de importancia. Desde hace una década que las emulsiones asfálticas vienen ganando terreno en detrimento del uso de diluidos asfálticos y más aún, en los últimos años, los proyectos de la DNV (Dirección Nacional de Vialidad) incluyen casi exclusivamente emulsiones asfálticas modificadas.

La calidad del ligante es crucial para el correcto desempeño del tratamiento superficial pero las especificaciones vigentes actualmente se basan en propiedades empíricas y de difícil correlación con el desempeño del tratamiento en sí.

En Uruguay las especificaciones de las emulsiones modificadas se basan en la norma argentina IRAM 6698 que usa el sistema de clasificación por penetración. En el mismo, se permite una penetración de la emulsión desde 50 a 200 dmm sin especificar para que temperaturas de uso, región geográfica ni tipo de tráfico esperado.

Esta laxitud en la especificación ha llevado a que existan algunos inconvenientes tanto en la aparición de desprendimientos prematuros de áridos como en el “sangrado” (que no es lo mismo que exudación ya que depende de la viscosidad del ligante) de los tratamientos en época estival. A pesar de que las especificaciones se cumplieron, es claro que no es suficiente ni está relacionada con el uso que se le está dando al ligante en cuestión.

Por otra parte, muchos de los requisitos sobre la emulsión tampoco se relacionan con el uso de la misma, su capacidad de ser bombeada, regada o mezclada con el árido de forma adecuada ni de su escurrimiento una vez aplicada.

## **Emulsiones por grado de desempeño**

Como parte del proyecto NCHRP 09-50 “*Performance-Related Specifications for Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments*” (Especificaciones basadas en desempeño para ligantes asfálticos usados en tratamientos superficiales) se han propuesto especificaciones y ensayos basados en desempeño para tratamientos bituminosos, microaglomerados en frío y riegos de niebla los cuales se compilan en el NCHRP Report 837. A este sistema se lo ha denominado *Emulsion Performance Grade* (EPG) como corolario del ya implantado sistema PG de los asfaltos usados en mezclas asfálticas.



## El cacique de las huastecas



### Aquí se presenta el inicio del relato biográfico de Manuel Peláez narrado en 1975

Manuel Peláez nació en Tuxpan en 1882 y vivió casi toda su vida en la huasteca veracruzana. Sus padres poseían tres ranchos en la zona que dedicaban a la cría de ganado mayor y algunas siembras que eran su mejor fuente de riqueza.

En 1894 se trasladó a la ciudad de México a estudiar y poco antes de terminar la preparatoria tuvo que regresar a su tierra debido al fallecimiento de su padre para hacerse cargo de la administración, la cual era atendida por su señora madre.

Con tan sólo 17 años y lo poco que había asimilado de sus estudios preparatorianos, más las enseñanzas de su madre, además de conocer a los peones y personas de ranchos vecinos, escuchó una serie de opiniones y comentarios de unos visitantes que empezaban a merodear por el rumbo buscando terrenos petrolíferos. Y recordó que en varias de sus propiedades había tal cantidad de chapopote, que su padre se quejaba diciendo:

"¡Malditas chapopoteras!, ¡otra vez se nos ha atascado el ganado! Y con reatas y troncos teníamos que esforzarnos para sacarlo de aquellos charcos de chapopote".

En 1909 mi madre y yo firmamos un contrato de arrendamiento por 30 años con la Compañía Mexicana del Petróleo El Águila, S. A., para explorar y explotar nuestros predios, con unas condiciones muy desfavorables por la falta de conocimiento de esa clase de negocios y de esta nueva industria. También otros vecinos y amigos habían hecho tratos similares. Se decía en ese tiempo que el mejor pozo era el de nuestro vecino Juan Casiano, que estaba dando 50 mil barriles diarios.

La compañía El Águila empezó a perforar en Potrero del Llano, terrenos colindantes con los nuestros, propiedad de la familia Peralta y los primeros tres pozos tuvieron escasa producción, pero el número 4, que reventó en diciembre de 1910, asombró al mundo por su enorme producción: 117 mil barriles diarios (pozo que no fue controlado porque la empresa no tenía válvulas de esa capacidad). El petróleo se precipitaba hacia el río Buena Vista que desemboca en el río Pantepec, llegando a través de Tuxpan al Golfo de México.



Estando Manuel Peláez en su rancho de Palma Real, lo visitaron el señor Ryder, gerente general de El Águila y el superintendente Sam Weber, invitándolo a trabajar con ellos.

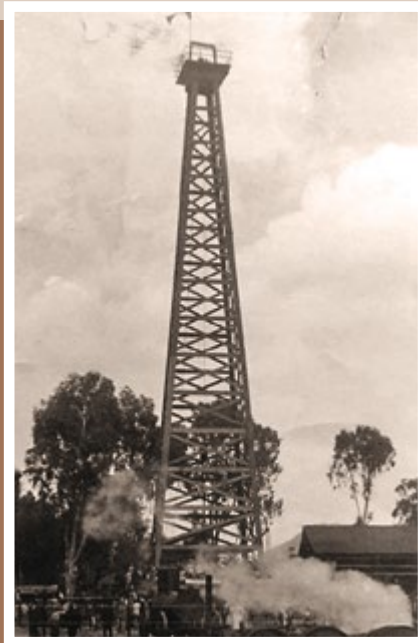
Le explicaron que lo que pretendían era construir una presa para almacenar el petróleo que se estaba perdiendo, y que él fuera el contratista y que ganaría mucho dinero. Igual lo hicieron con otros vecinos.

Los jornales al principio eran de un peso diario, pero Peláez —que trataba a sus propios peones como colaboradores más que como jornaleros y les cubría mejores salarios que otros rancheros—, hizo ver a la compañía que el pago era impropio, debido a que la gente trabajaba demasiado... Así consiguió que la faena se realizara a destajo, pagándose dos pesos por metro cúbico de tierra, con lo que el peón se favorecía, pues a buen ritmo lograba extraer dos metros cúbicos diarios, con lo que el jornal se hacía más aceptable. Esto originó una gran ascendencia de Peláez sobre la gente, logrando siempre disponer de 5 mil hombres trabajando en su tramo.

Como el pozo 4 había brotado sorpresivamente y la compañía no esperaba su enorme y violenta producción, y no teniendo las válvulas necesarias para controlar el pozo, mandó a fabricar una especial a Indianápolis y, mientras llegaba, seguía avanzando la construcción de la presa. Por fin, el 23 de marzo de 1911, se instaló la válvula y estando presente el presidente de la empresa, lord Cowdrey, y sabedor del gran apoyo dado por Peláez por la cantidad de gente que consiguió para terminar la presa, lo invitó a éste a apadrinar la apertura de la válvula, que debería empezar a funcionar arrojando el petróleo a la presa que en ese momento ya ofrecía seguridad y resistencia en el bordo levantado por Peláez.

Como dato curioso, una vez realizadas las conexiones desde el pozo, la tubería voló por los aires expelida por la enorme fuerza del “geyser”. Previos trabajos extraordinarios, reinstaladas válvulas y tuberías, se logró normalizar la entrada del petróleo a la presa.

Una vez terminada la obra, Manuel Peláez fue favorecido con otros contratos de brechas y algunas terracerías hasta el puerto de Tuxpan.



El EPG incluye tanto las condiciones de la emulsión fresca como del residuo correlacionadas con las condiciones de ejecución y de vida en servicio respectivamente. El proyecto ha logrado correlacionar las especificaciones de los ligantes usados en tratamientos superficiales con medidas de desempeño considerando las condiciones climáticas y de tráfico a las que se verá sometido el mismo.

Uno de los puntos mas importantes de este nuevo sistema es la capacidad de evaluar si el ligante es capaz de resistir efectivamente todo el rango de temperaturas y tráficos al que se verá expuesto.<sup>[1]</sup>

### Fallas de los tratamientos superficiales

Los tratamientos superficiales pueden fallar por diversas razones. Las fallas más comunes de los tratamientos bituminosos o riegos de sello son los desprendimientos de áridos, la exudación o el sangrado del ligante mientras que para los microaglomerados en frío (micros) son además de estos ítems el ahuellamiento y la fisuración térmica. En todo caso esta nueva especificación se centra en las fallas relacionadas directamente con el desempeño del ligante en cada tipo de tratamiento.

Los desprendimientos de áridos pueden ser tempranos por falta de curado de la emulsión o en el largo plazo tanto por el daño por agua como por pérdida de cohesión del ligante a bajas temperaturas. El EPG se centra en este último ya que es el directamente vinculado a la calidad del ligante, pero aconseja evaluar durante el diseño de un tratamiento los otros factores que van a depender del tipo de árido seleccionado y de las condiciones de ejecución.

En cuanto al sangrado, el mismo se debe a la viscoplasticidad del ligante y a pesar de que puede aparecer junto con la exudación no son lo mismo. La exudación se debe a problemas de diseño o constructivos por lo que el EPG solo va a evaluar la capacidad de resistir el sangrado que tengan el residuo de las emulsiones.

Un razonamiento similar se da para los micros. En este caso, el ahuellamiento se debe también a la viscoplasticidad del residuo a altas temperaturas mientras que la fisuración térmica se debe a rigidez del ligante a bajas temperaturas.

### Ensayos propuestos por el EPG

Los ensayos seleccionados para evaluar las características de las emulsiones buscaron aprovechar equipamientos ya existentes en la mayoría de los laboratorios como el viscosímetro Brookfield o el Reómetro de corte dinámico (DSR por sus siglas en inglés) así como mantener algunos ensayos tradicionales que siguen siendo útiles para la especificación de estas.

En la Figura 1 se esquematizan los ensayos utilizados con las propiedades a medir al residuo de emulsión para cada tipo de tratamiento superficial así como de la emulsión fresca.

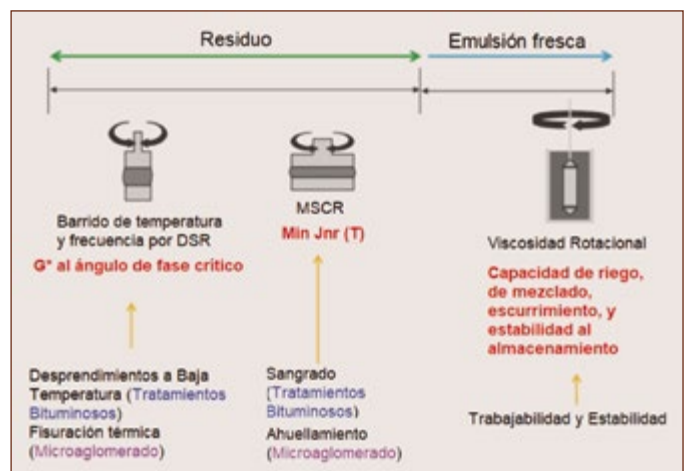


Figura 1. Ensayos del EPG.<sup>[1]</sup>

### Sobre la emulsión

En cuanto a los ensayos propuestos sobre la emulsión la Tabla 1 detalla los mismos:



**EN DIRECTO**  
**con AMAAC**

Transmisión en vivo por



¡Síguenos para más información!



**¡Únete a este foro!**

Promociona a tu empresa  
y comparte tus experiencias  
y conocimiento.

**Tabla 1. Ensayos sobre la emulsión fresca**

Propiedad	Método de ensayo	Parámetros medidos
Estabilidad al almacenamiento	ASTM D6930 modificada	A: Viscosidad Rotacional B: Ratio de separación a 24 h C: Ratio de estabilidad a 24 h
Capacidad de riego		Viscosidad rotacional a alta cizalla
Capacidad de mezclado	AASHTO TP 48 modificada	Viscosidad rotacional a 5 RPM
Escurrimiento		Viscosidad rotacional a baja cizalla
Demulsibilidad	AASHTO T 59	Mantienen los parámetros originales
Carga de partícula		
Tamiz		
% de residuo		

Se incorpora el viscosímetro Brookfield como herramienta para los ensayos de estabilidad al almacenamiento y para evaluar las propiedades de la emulsión durante su manejo y aplicación.

Los ensayos mencionados al final de la Tabla 1 son los mismos que están vigentes en la normativa actual que siguen siendo útiles por describir parámetros útiles del desempeño de la emulsión.

### Sobre el residuo

Para la obtención del residuo se ha definido la aplicación del ensayo AASHTO PP72 Método B, en el cual el residuo se obtiene en capa fina a baja temperatura (60 °C) durante seis horas. Este método se seleccionó debido a que se precisa poca cantidad de material, a que se conservan las propiedades de los modificadores usados en la emulsión y a que no se envejece el residuo.<sup>[1]</sup>

En cuanto a los ensayos propuestos sobre los residuos la Tabla 2 detalla los mismos:

**Tabla 2. Ensayos sobre el residuo**

Tipo de tratamiento	Propiedad	Método de ensayo	Parámetros medidos
Tratamiento Bituminoso	Sangrado a alta temperatura	MSCR (AASHTO T 350)	Creep no recuperable, $J_{nr}$
	Desprendimiento a baja temperatura	Barrido de Frecuencias en DSR	Módulo ( $G^*$ ) al $\delta_{crítico}$
Microaglomerado en frío	Ahuellamiento a alta temperatura	MSCR (AASHTO T 350)	Creep no recuperable, $J_{nr}$
	Fisuración térmica a baja temperatura	Barrido de Frecuencias en DSR	Módulo ( $G^*$ ) al $\delta_{crítico}$

El estudio ha determinado una buena correlación entre estos ensayos con las fallas de cada tipo de tratamiento.

### Rangos de temperaturas y tráficos

Usando los conceptos desarrollados en el programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) en cuanto a los rangos de temperaturas a los cuales los ligantes para mezclas asfálticas debían soportar se desarrollaron los rangos para el EPG.

Para altas temperaturas se determinó que, al ser en la superficie del pavimento la aplicación de estos

tratamientos, debían correrse los rangos en +3 °C. Por ejemplo un asfalto con PG 58 o PG 64 pasarían a ser EPG 61 o EPG 67, de esta forma los mapas ya elaborados respecto al PG pueden trasladarse a este nuevo sistema. Este mismo desplazamiento de temperaturas se debe hacer para la temperatura mínima.

Para el caso de Uruguay según los datos climáticos obtenidos en los últimos 40 años, tenemos dos rangos de temperaturas para cubrir todo el país con un 98% de confiabilidad, un EPG 61-7 y un EPG 67-7 como se muestra en la Figura 2.

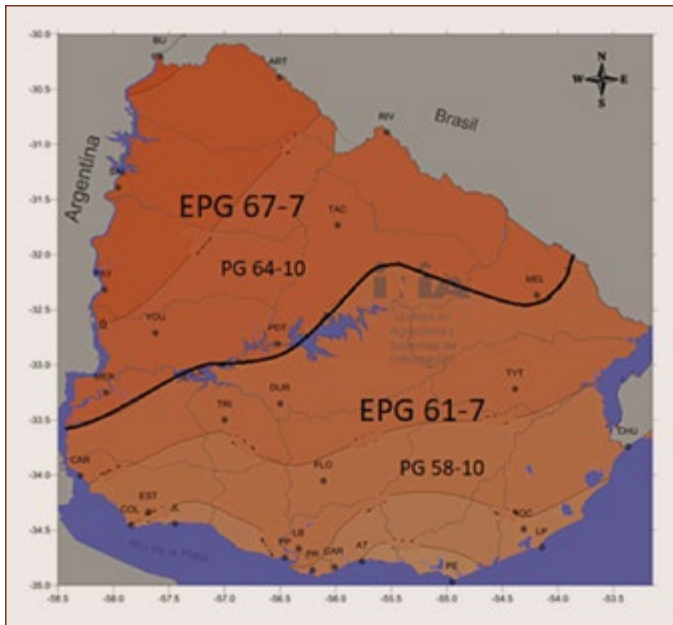


Figura 2. Mapa de temperaturas de Uruguay.

En cuanto a los tráficos se definieron los siguientes rangos en EPG:

- Tráfico Bajo: 0-500 TMDA
- Tráfico Medio: 501-2500 TMDA
- Tráfico Alto: 2501-20000 TMDA

Para Uruguay difícilmente estemos en tráfico alto para un tratamiento superficial y la mayoría de las condiciones serán para tráficos medios o bajos.

### Normativa de emulsiones en Uruguay

Actualmente están vigentes las especificaciones mencionadas en el Pliego de Vialidad para las emulsiones convencionales y lo indicado en la norma IRAM 6698 para emulsiones modificadas como indica la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de emulsiones para tratamientos superficiales en Uruguay							
Ensayo	Norma	Condiciones	Unidades	Pliego Vialidad		IRAM 6698	
				Convencional		Modificadas	
				CRS-2	CRR 1m	CRR 2m	CRC m
Ensayos sobre la emulsión							
Viscosidad Saybolt- Furol		25 °C	s	-	≥ 20	-	≤ 50
		50 °C		20 - 100	-	≥ 40	-
Asentamiento	ASTM D244	5 días	%	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
Estabilidad de almacenamiento		24 horas	%	≤ 1	-	-	-
Tamiz (850 μm)			%	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Desemulsibilidad		DSS	%	≥ 40	-	-	-
Carga de la partícula		-	-	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva
Mezcla con cemento		-	%	-	-	-	≤ 2
Residuo por destilación		-	%	≥ 65	≥ 63	≥ 67	≥ 60
Aceite destilado		-	%	≤ 3	≤ 3	≤ 3	-
Ensayos sobre el residuo de la emulsión							
Penetración	ASTM D5	100 g, 25 °C	dmm	100-250	50-200	50-200	50-200
Punto de ablandamiento	ASTM D36	-	°C	-	≥ 40	≥ 40	≥ 40
					≥ 50	≥ 50	≥ 50
Recuperación elástica por torsión	IRAM 6830	25 °C	%	-	≥ 12	≥ 12	≥ 12
Ductilidad	ASTM D113	25 °C	cm	≥ 40	-	-	-
		5 °C	cm	-	≥ 10	≥ 10	≥ 10
Punto de ruptura Fraas	IRAM 6831	-	°C	-	≤ -10	≤ -10	≤ -10
Solubilidad en 1,1,1-tricloroetano	ASTM D2042	-	%	≥ 97,5	≥ 95	≥ 95	≥ 95



De esta tabla se desprende que las propiedades del residuo de las emulsiones están basadas en el sistema por penetración y con un rango muy amplio, que por ejemplo en las emulsiones modificadas puede ir desde emulsiones duras (50 dmm) a muy blandas (200 dmm). Por otra parte los requisitos de elasticidad se controlan con una recuperación torsional elástica mínima y con el punto de ruptura Fraas.

Existiendo un rango tan amplio de penetraciones y considerando que no es exigente en el contenido de polímero, hace varios años se definieron los siguientes subrangos de calidad del residuo de la emulsión dentro de lo que la especificación solicita como lo indica la Tabla 4.

Tabla 4. Subrangos de calidad del residuo de la emulsión		
Ensayo	Rango	Tipo
Penetración (100 g, 25°C, 5 s)	50-80 dmm	Dura (D)
	80-120 dmm	Media (M)
	120-200 dmm	Blanda (B)
Recuperación Torsional Elástica	12-25%	P12
	25-40%	P25
	>40%	P40

De esta forma a partir de cada una de las emulsiones modificadas especificadas logramos una combinación de nueve tipos de emulsiones diferentes para ajustarnos a las condiciones particulares de cada obra.

Con estas emulsiones se han realizado cientos de km de tratamientos superficiales en Uruguay y hemos observado comportamientos muy buenos en la mayoría de los casos cuando se realiza el tratamiento en buena época y se dosifica y ejecuta correctamente.

Pero en cuanto vienen los fríos y con ello los desprendimientos de áridos por falta de curado, se comienzan a utilizar emulsiones mas blandas y se aumentan las dosificaciones de emulsión que conlleva a problemas una vez que llega el verano nuevamente debido al sangrado y las exudaciones que terminan en levantamiento del tratamiento y posteriores baches.

En nuestra experiencia, para el caso de las emulsiones Duras tipo P40 los resultados son siempre

buenos pero para emulsiones Blandas tipo P12 o incluso P25 o P40, a pesar de ser modificadas presentan un mal comportamiento frente al calor.

A partir de estos inconvenientes es que se desarrolla el trabajo a continuación intentando ajustar la penetración y grado de modificación de las emulsiones usadas en el país utilizando técnicas de avanzada y de esa forma proponer un cambio en la especificación vigente.

## Desarrollo

Nos centraremos principalmente en los residuos de las emulsiones ya que las demás características mencionadas en la Tabla 1 y Tabla 3 coinciden o son fácilmente corregibles a partir del contenido de asfalto de la emulsión.

Para ello se han realizado diversas emulsiones tanto convencionales como modificadas cubriendo el rango de penetración y de recuperación torsional elástica (% RTE) de la Tabla 4.

Se tomaron los extremos de las emulsiones tipo Duras (50 y 80 dmm) y un punto intermedio (65 dmm), luego un punto intermedio de las emulsiones Medias (100 dmm) y finalmente un intermedio de las Blandas (140 dmm). Luego todas estas emulsiones fueron modificadas utilizando látex SBR como modificador en diferentes porcentajes para cumplir con los rangos (P12, P25 y P40).

Las razones de esta selección es que ya suponíamos que los extremos del rango de las Medias y Blandas (120 y 200 dmm) no iban a cumplir de ninguna forma con la especificación EPG. De todas formas hicimos el punto de 140 dmm ya que es el promedio habitual de penetración cuando se utiliza un asfalto tipo 150/200 para la elaboración de las emulsiones Blandas para ver que resultado se obtenía sobre este tipo de residuo.

Una vez obtenidas y ensayadas de forma tradicional estas emulsiones, se obtuvieron los residuos a partir del método AASHTO PP72 Método B y se les realizaron los ensayos indicados en la Tabla 2.

Finalmente se realizaron los ensayos de MSCR y de barrido de frecuencias a estos residuos obtenidos.

Los parámetros de evaluación sobre las temperaturas y tráfico que deben soportar cada una de estas emulsiones para el caso de ser usadas en Uruguay se indican en la Tabla 5.

**Tabla 5. Parámetros de evaluación sobre el residuo recuperado para Uruguay**

Métodos de ensayo	EPG 61-7	EPG 67-7
	Temperatura de ensayo (°C)	
Resistencia al sangrado y al ahuellamiento MSCR AASHTO T 350 Respuestas medidas: Creep compliance no recuperable, Jnr Tráfico Bajo: Max. Jnr a 3.2 kPa, 8 kPa <sup>-1</sup> Tráfico Medio: Max. Jnr a 3.2 kPa, 5.5 kPa <sup>-1</sup> Tráfico Alto: Max. Jnr a 3.2 kPa, 3.5 kPa <sup>-1</sup>	61	67
Resistencia a la pérdida de piedra a bajas temperaturas Barrido de frecuencias y temperaturas en DSR Respuestas medidas: G* al ángulo de fase crítico, δc Tráfico Bajo: Max. G* a δc: 30 MPa Tráfico Medio: Max. G* a δc: 20 MPa Tráfico Alto: Max. G* a δc: 12 MPa	5 y 15 °C	
	Ángulo de fase crítico, δc (°)	
	54 o 50	54 o 50

**Ensayo MSCR (AASHTO T 350)**

Con este ensayo obtenemos los Creep no recuperables (Jnr) que usaremos para saber si el ligante resiste el sangrado o el ahuellamiento según el tráfico previsto a la temperatura máxima de la zona en donde será aplicado dentro del país.

Los resultados obtenidos para las diferentes emulsiones se presentan en la Tabla 6 donde cada emulsión está identificada con la penetración del residuo y el grado de modificación.

**Tabla 6. Resultados del MSCR**

Emulsión	Jnr a 3.2 kPa (kPa <sup>-1</sup> )	
	61 °C	67 °C
50	5,43	13,46
50 P12	4,3	9,34
50 P25	3,08	8,16
50 P40	2,11	4,91
65	6,14	14,13
65 P12	6,21	11,38
65 P25	4,46	9,7
65 P40	2,51	6,48
80	9,86	22,3
80 P12	7,52	17,33
80 P25	5,57	12,13
80 P40	4,28	8,91
100	14,37	28,37
100 P12	11,09	22,09
100 P25	9,13	18,3
100 P40	8,05	14,86
140	27,88	54
140 P12	28,5	52,58
140 P25	25,54	43,03
140 P40	20,18	44,26

A partir de estos resultados podemos graficar los Jnr a 3,2 kPa e identificar los parámetros establecidos en la propuesta de especificación de EPG para identificar que tipo de emulsión cumple o no cumple. Como el peor resultado sería un Jnr a 3,2 kPa de

8 kPa<sup>-1</sup> se especifica ese límite tal como se muestra en la Figura 3.

De esta forma es fácilmente detectable los rangos de penetración y de modificación del residuo para cumplir con lo indicado.

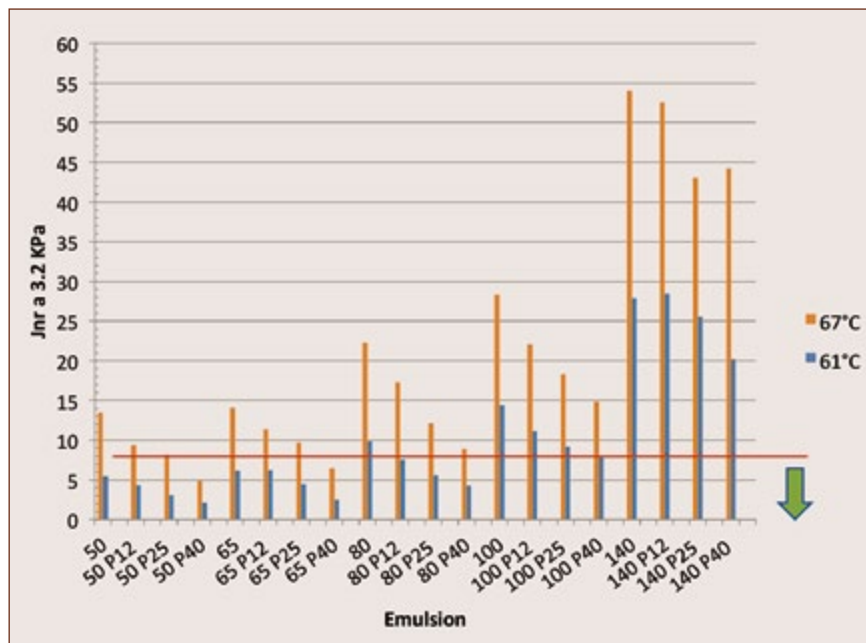


Figura 3. Jnr a 3.2 kPa para las diferentes emulsiones en estudio.

Un primer vistazo a esta Figura permite concluir que la mayoría de las emulsiones ni siquiera llegan a cumplir los requisitos para tráficos bajos, dentro de las cuales, la emulsión Blanda (140) se despega del límite significativamente.

Los resultados a la temperatura de ensayo de 61 °C muestran que debajo de la penetración 80 todas las emulsiones cumplen con el criterio para tráficos bajos. Por ende debemos restringir el rango de penetraciones en nuestra especificación para valores entre 50 y 80 dmm (Duras) ya que para mayores penetraciones sería necesario modificar de manera muy significativa el asfalto para cumplir con el criterio.

En cuanto a las emulsiones convencionales la situación es crítica ya que la especificación prevista en el Pliego de Vialidad prevé un rango entre 100 y 250 dmm sin contemplar las emulsiones duras directamente.

Es importante notar como el valor de modificación mínimo solicitado por la norma (P12) permite

que una emulsión convencional logre mejorar casi en un 20% los valores de Jnr, lo que demuestra el aporte del polímero al desempeño de la emulsión incluso en tan bajas cantidades.

Para temperaturas de 67 °C los resultados son mas ajustados y solamente las emulsiones P40 cumplen con el criterio para tráficos bajos en penetraciones de 65 dmm y por debajo. De todas formas, los resultados para el límite de las duras (80) está muy cerca de ese límite y podríamos concluir que para el norte del país deberían utilizarse solamente emulsiones Duras altamente modificadas (D P40).

Como para ambas temperaturas de ensayo solamente se cumplen los requisitos de Jnr para penetraciones de entre 50 y 80 dmm, realizamos una clasificación mas ajustada por tipo de tráfico para este rango. Esto nos lleva a hacer la Figura 4 en la cual se indican, además del máximo Jnr a 3,2 kPa de 8 kPa<sup>-1</sup> para tráficos bajos, el de tráficos medios (5,5 kPa<sup>-1</sup>) y tráficos altos (3,5 kPa<sup>-1</sup>).

En esta figura se puede ver como para el sur del país (EPG 61) todas las emulsiones modificadas de entre 50 y 80 dmm son adecuadas para tráficos bajos mientras que solo las emulsiones de P25 y P40 son adecuadas para tráficos medios y por último solamente las emulsiones P40 para tráficos altos.

Por otra parte, para el norte del país (EPG 67) es necesario recurrir a emulsiones de entre 50 y 80 dmm con un grado de modificación P40 o superior solamente para cumplir con el criterio de tráficos bajos (que es lo habitual para esa zona del país) y medios si tendemos a la penetración de 50 dmm.

Este primer ensayo nos deja con un trabajo muy importante por delante de mejorar tanto las especificaciones como las emulsiones modificadas, donde deberemos incrementar la cantidad de polímero, así como del tipo de polímero y forma de emulsionado.

### Barrido de frecuencias a 5 y 15 °C

En cuanto a los ensayos realizados a bajas temperaturas para determinar la resistencia a la pérdida de piedra a bajas temperaturas se realizaron los mismos siguiendo los lineamientos planteados en el Anexo 2 del Report 837.

Utilizando las ecuaciones de Christensen-Anderson-Marasteanu indicadas en el Anexo mencionado se lograron ajustar las curvas maestras para 15 °C, luego de lo cual se interpolaron los ángulos de fase críticos ( $\delta_c$ ) indicados en el EPG según la temperatura

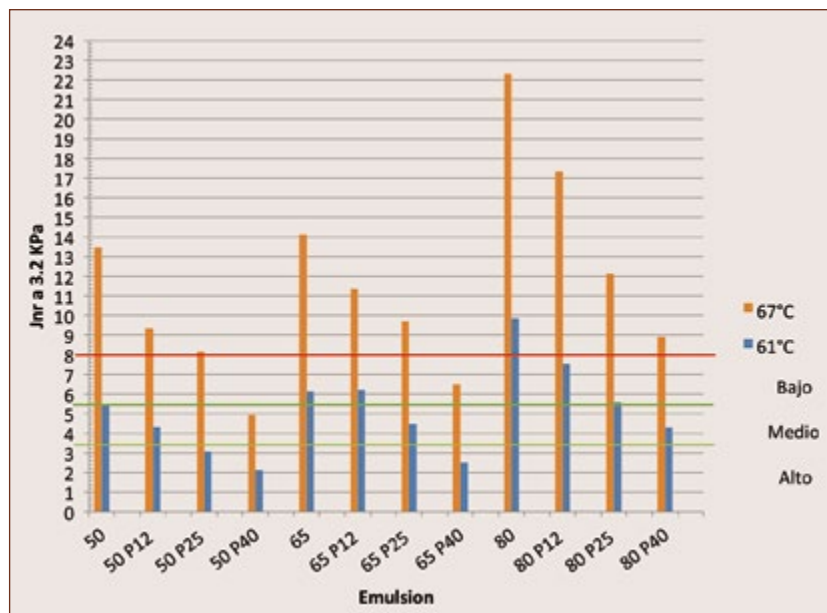


Figura 4. Clasificación de emulsiones por temperatura y tráfico.

mínima prevista para obtener las frecuencias reducidas. Con esa frecuencia reducida se obtuvieron los módulos complejos ( $G^*$ ) de cada emulsión.

En el caso de los tratamientos bituminosos y para una temperatura mínima de -7 °C el  $\delta_c$  es de 54°, en cambio para los microaglomerados en frío el  $\delta_c$  es de 50°.

Siendo un ensayo relativamente largo y con un análisis matemático posterior complejo, se realizaron los casos extremos primero para determinar el rango de  $G^*$  que íbamos a obtener y para luego realizar las demás emulsiones.

Los resultados de esta primera etapa se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del barrido de frecuencias a 5 y 15 °C		
Emulsión	G* a $\delta_c$ (MPa)	
	54°	50°
50	3,9	5,8
50 P12	3,1	5,5
50 P25	2,4	4,1
50 P40	1,3	3,1
140	6,2	10,1
140 P12	5,8	10,2
140 P25	5,3	9,8
140 P40	5	8,8

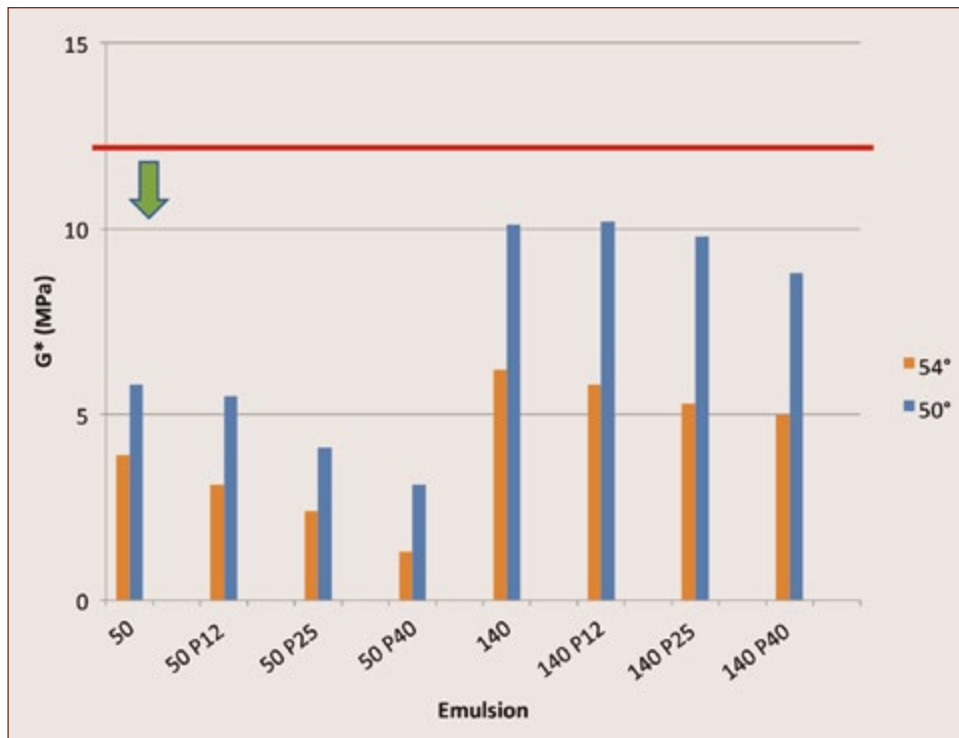


Figura 5. Comparativo del  $G^*$  al  $\delta_c$

Los resultados obtenidos muestran que todas las emulsiones ensayadas tienen un buen comportamiento a la temperatura de  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  ya que presentan un  $G^*$  bastante por debajo del máximo previsto hasta para altos tráficos (12 MPa).

Por otra parte si hacemos un comparativo de las emulsiones ensayadas como se puede ver en la Figura 5, se puede ver como a menor penetración y mayor contenido de polímero, menor  $G^*$ .

A pesar de que esperábamos este resultado en cuanto al contenido de polímero no esperábamos que la emulsión blanda diera un comportamiento peor que la dura ya que es lo que estamos acostumbrados a observar a bajas temperaturas. Según algunas observaciones realizadas en obra y con los ensayos de placa Vialit a  $10\text{ }^\circ\text{C}$  que realizamos las emulsiones blandas tienen un comportamiento mucho mejor frente a los desprendimientos de áridos debido a bajas temperaturas.

Este tema nos deja con la duda sobre el tratamiento matemático realizado de nuestra parte o si la norma propuesta contempla temperaturas tan altas ( $-7\text{ }^\circ\text{C}$  es el máximo).

De todas formas, no realizamos el resto de las emulsiones previstas ya que serían casos intermedios a estos presentados.

### Propuesta para Uruguay

De los resultados obtenidos podemos proponer una nueva tabla de uso de emulsiones para Uruguay considerando que deben hacerse siempre con penetraciones de entre 50 y 80 dmm (Duras). La Tabla 8 indica los grados de modificación posibles para cada región y tipo de tráfico.

Tabla 8. Tabla de uso de emulsiones para Uruguay		
Tráfico	Zona climática	
	EPG 61-7	EPG 67-7
Alto	P40	-
Medio	P25 Y P40	P40 (cerca de 50 dmm)
Bajo	Convencional, P12, P25 Y P40	P40

Estos resultados son muy similares a las observaciones que venimos haciendo desde hace un tiempo ya basados en la experiencia en obra y en el seguimiento de los tramos que han sido exitosos y de los que han fracasado.

## Conclusiones

Se realizó un estudio sobre el grado de desempeño un amplio rango de residuos de emulsiones utilizadas en Uruguay para tratamientos superficiales. Es un primer acercamiento a la nueva propuesta de Emulsion Performance Grade como nueva herramienta para clasificación de emulsiones.

A partir de los resultados del Ensayo MSCR (AASHTO T 350) pudimos determinar:

- La mayoría de las emulsiones que se usan en Uruguay no cumplen con los requisitos mínimos para soportar el sangrado o ahuellamiento a altas temperaturas.
- El rango de penetraciones debe ser restringido entre 50 a 80 dmm tanto para emulsiones modificadas como convencionales.
- Se logró una tabla de uso de emulsiones para cada región y tipo de tráfico ajustada para Uruguay en la cual se muestra imprescindible el uso de emulsiones modificadas.

A partir de los resultados del Barrido de frecuencias a 5 y 15 °C pudimos determinar:


- Las temperaturas mínimas en Uruguay no son tan extremas por lo que todas las emulsiones tanto convencionales como modificadas cumplen con lo especificado hasta para tráficos altos.

## Trabajo futuro

Es necesario centrar nuestro trabajo en emulsiones con mayor grado de modificación para llegar a cumplir con los tráficos medios y altos para la región norte del país en el ensayo de MSCR.

Debemos seguir estudiando el tratamiento matemático del barrido de frecuencias para verificar que estemos en lo cierto en cuanto a que todas las emulsiones cumplen.

En paralelo estudiar otros modificadores y otras formas de emulsionado para mejorar los parámetros con costos competitivos.

Trabajar en conjunto con la administración para modificar las especificaciones, tanto sea restringiendo la actual a lo mencionado anteriormente o implementando el EPG como forma de clasificación. 

**¿Quieres profundizar?**

---

<sup>[1]</sup> NCHRP Research Report 837 (2017). *Performance-Related Specifications for Asphaltic Binders Used in Preservation Surface Treatments*. TRB, Washington, EUA.



## EN GRUPO SÚRFAX TE AYUDAMOS A REDUCIR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE TUS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DURANTE TODA SU VIDA ÚTIL Y MÁS ALLÁ.

Las mezclas asfálticas tibias reducen la emisión de vapores de asfalto durante la pavimentación.

Las carpetas de rodadura SMA prolongan la vida útil del pavimento incluso por arriba de mezclas densas diseñadas bajo SUPERPAVE.

Los pavimentos en optimas condiciones superficiales podrían reducir el consumo de combustible hasta en un 3 por ciento.

Los selladores asfálticos como recubrimiento impermeable son una estrategia efectiva de protección y conservación de pavimentos asfálticos.

Los pavimentos asfálticos son los más silenciosos.

El uso de aditivos promotores de adherencia en carpetas de rodadura es esencial para garantizar su vida útil sin baches o desprendimientos.

Los pavimentos asfálticos requieren el 20% menos energía para producirse y construirse que otros pavimentos.

Los pavimentos asfálticos son 100% reusables y pueden usarse en pavimentos nuevos de alto desempeño.

La pavimentación con asfalto es más rápida, reduciendo congestionamientos.

Las mezclas asfálticas tibias producidas y tendidas a menor temperatura están listas para abrirse al tráfico en menos tiempo.

El sellado de grietas en pavimentos puede extender la vida útil del pavimento de 2 a 6 años.

Con mezclas asfálticas tibias se ahorra energía y se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub>.

GRUPO  
**SÚRFAX**

Tu socio en Innovación.



Agua Marina No. 3042, Agua Blanca  
C.P. 45235, Zapopan Jalisco, México



Tel: +52 33 3684 7304  
[www.gruposurfax.com.mx](http://www.gruposurfax.com.mx)

*siguenos en redes sociales*



# Sensores inalámbricos autónomos: detección temprana de daños

Mario Manosalvas-Paredes,  
Karim Chatti, Nizar Lajnef  
University of Nottingham, Nottingham, UK,  
ezzmam@nottingham.ac.uk

## Introducción

Los pavimentos flexibles son considerados como los activos más caros de la sociedad moderna<sup>[1]</sup> y, sin embargo, los ingenieros de pavimentos no han encontrado una forma de retrasar su debilitamiento ni de proporcionar una herramienta, lo suficientemente fácil, para monitorear su condición durante el periodo de diseño<sup>[2-5]</sup>. Como cualquier otra estructura, los pavimentos envejecen y sufren deterioros en función del tiempo. Este envejecimiento se ve acelerado generalmente por la aplicación repetida de cargas,<sup>[6,7]</sup> por condiciones ambientales,<sup>[8]</sup> y por planes inadecuados de mantenimiento. Es por ello que conocer el estado actual del pavimento y estimar su desempeño futuro se ha convertido en una cuestión de gran importancia no solo para los propietarios de carreteras sino también para quienes toman decisiones a niveles gubernamentales.<sup>[9]</sup>

Siguiendo la línea de evaluaciones estructurales, se puede diferenciar claramente aquellos métodos tradicionales los cuales se desarrollan en torno al uso del deflectómetro de impacto (FWD)<sup>[10,11]</sup> y métodos relativamente nuevos como el uso de sensores *in situ* motivo de esta investigación.<sup>[12-14]</sup> La detección temprana de daños es fundamental al momento de planificar acciones de mantenimiento futuras. Sin embargo, el obtener modelos de deterioro es generalmente una tarea complicada y en ocasiones imposible debido al coste económico que este puede llegar a tener. Respuestas mecánicas de la estructura dañada a través de simulaciones computacionales generalmente suplen esta tarea al momento de realizar comparaciones entre un estado inicial, sin daño, y un estado final, con daño. Farrar y Worden<sup>[15]</sup> definen daño como el cambio de material y/o propiedades geométricas del sistema, incluidos los cambios en las condiciones de contorno y la conectividad del sistema, definición que ha sido ampliamente aceptada. Así mismo, definen monitoreo de la condición estructural (MSE) a el proceso en el cual una estrategia de identificación de daños es implementada en la infraestructura.

Una correcta implementación de MSE, debe proporcionar las herramientas necesarias para reemplazar actividades de mantenimiento tradicionales, basadas en la vida útil de la estructura, a actividades de mantenimiento establecidas de acuerdo con la condición real de la estructura. No obstante, desafíos técnicos, económicos, y prácticos han sido identificados al momento de implementar sensores cableados donde el uso de redes de sensores inalámbricos (RSI) se utilizan cada vez más como alternativa a los sistemas de monitoreo tradicionales.<sup>[16]</sup> Para



MSE, los transductores piezoeléctricos son utilizados para proveer autonomía a los sensores inalámbricos mediante el almacenamiento de energía.<sup>[17]</sup> Recientemente<sup>[9,18]</sup> han desarrollado una nueva clase de sensores inalámbricos autoalimentados (SIA). La transmisión de datos entre el SIA y el receptor se realiza utilizando un escáner de identificación por radiofrecuencia (SIRF).

El objetivo de esta investigación es validar si el SIA, mediante el enfoque del tiempo de carga acumulado (TCA), puede detectar de manera temprana la aparición de daño en una estructura que es sometida a un ensayo acelerado de pavimento. Deformaciones longitudinales tomadas en la parte inferior de la capa de hormigón asfáltico (AC) son medidas con un Dynatest-Past-II y utilizadas como valores de referencia las cuales son comparados con seis SIA de igual ubicación.

## Sistema propuesto para evaluación continua de pavimentos

El nuevo sensor inalámbrico autoalimentado (SIA), inteligente, está equipado con una serie de celdas de memoria que almacenan de manera sucesiva la duración en la cual las respuestas de la deformación del pavimento ocurren en base de umbrales previamente definidos. La duración de la deformación es medida cuando la amplitud de la señal de entrada, proveniente del transductor piezoeléctrico, excede uno o varios umbrales. A una frecuencia de carga constante, la respuesta del sensor es visualizada como un histograma de la distribución de carga de la deformación. La Figura 1 muestra una representación, esquemática, de cómo el SIA almacena de manera sucesiva el tiempo en el cual la señal cruza los umbrales.<sup>[9,19]</sup>

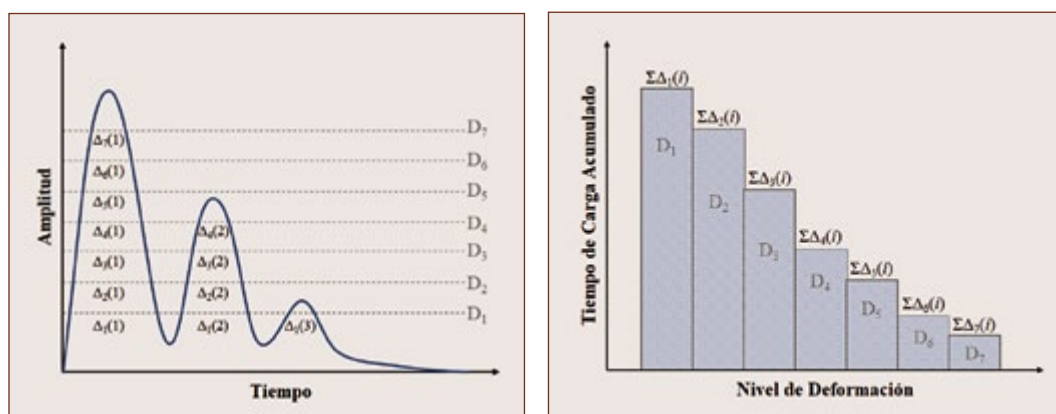


Figura 1. Esquema mediante el cual el SIA almacena de manera sucesiva el tiempo de la señal.

Dado que la suma de distribuciones Gaussianas puede ser asumida como una distribución Gaussiana, este estudio asume racionalmente que los resultados del sensor pueden ser caracterizados por la siguiente función de distribución, Ecuación 1.<sup>[19]</sup>

$$F(\varepsilon) = \frac{\alpha}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{(\varepsilon - \mu)}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde  $\mu$  es la media de la distribución de la deformación,  $\sigma$  es la desviación estándar que considera la variabilidad de carga y frecuencia, y  $\alpha$  es el tiempo total acumulado de la deformación aplicada.

Los parámetros estadísticos  $\mu$  y  $\sigma$  de la distribución de la deformación pueden ser considerados como indicadores de la progresión del daño. De hecho,  $\mu$  y  $\sigma$  son las únicas herramientas viables para analizar los resultados entregados por el SIA. Estos parámetros son obtenidos por medio de un ajuste de curvas de los resultados de distribución del sensor tomados de las celdas de memoria ( $D_1 - D_7$ ).

## Ensayo Acelerado de Pavimento con SIA

El Instituto Francés de Ciencia y Tecnología para el Transporte, el Desarrollo y las Redes (IFSTTAR) bajo el Departamento de Materiales y Estructuras (MAST)

es el encargado de gestionar el uso y manejo del carrusel de fatiga dedicado a ensayos acelerados de pavimentos (APT). El carrusel está compuesto por cuatro brazos que pueden suministrar diferentes

configuraciones de carga, simple, tándem, o tridem, simulando semiejes de vehículos pesados el cual es impulsado por medio de un motor electrohidráulico central, ver Figura 2.



Figura 2. Dispositivo de prueba para ensayos acelerados de pavimentos, IFSTTAR.

### Distribución de sensores dentro de la estructura

La estructura de pavimento se compone de tres capas: asfalto ( $E = 10,524 \text{ MPa}$  at  $27,9 \text{ °C}$ ;  $\nu = 0,35$ ; Espesor =  $100,0 \text{ mm}$ ), base ( $E = 122 \text{ MPa}$ ;  $\nu = 0,35$ ; Espesor =  $760,0 \text{ mm}$ ) y subrasante ( $E = 202 \text{ MPa}$ ;  $\nu = 0,35$ ; Espesor =  $1,600,0 \text{ mm}$ ). Los módulos

fueron hallados con el software ELMOD6 mediante retrocálculo de ensayos de deflectometría (FWD) antes de que la estructura sea sometida a cargas. En la Figura 3, se observa la ubicación del sensor de referencia y de los SIA tanto longitudinal como transversal. Los SIA son ubicados con un espaciamiento de  $0,30 \text{ metros}$ .

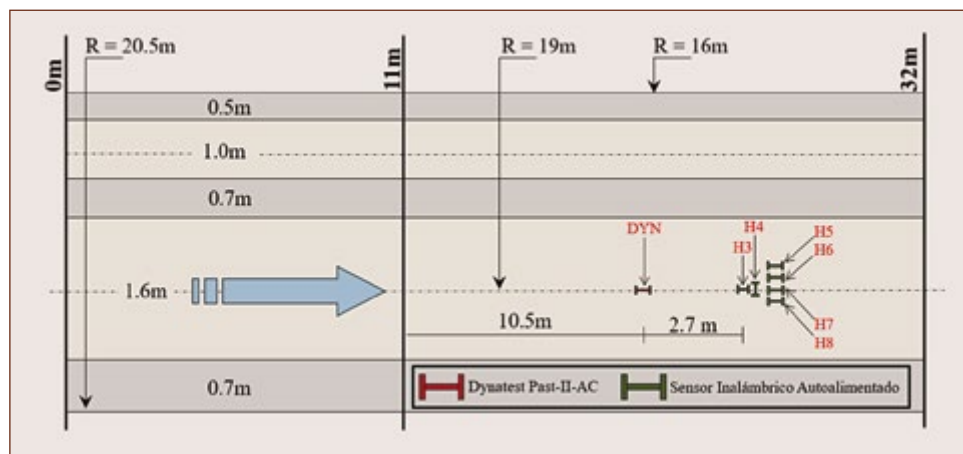


Figura 3. Distribución de sensores dentro de la estructura de pavimento.

El sensor de referencia seleccionado es el Dynatest PAST-II-AC. Este es un transductor de precisión utilizado especialmente para mediciones de deformación en asfaltos de mezcla en caliente. El transductor tiene un módulo de elasticidad aparente de aproximadamente 2,2 N/mm<sup>2</sup>, resistencia de 120 ohmios ( $\Omega$ )  $\frac{1}{4}$  puente, rango físico de hasta 1,500  $\mu\epsilon$ , sensibilidad de 0.11 N/ $\mu$  y rango de temperatura entre 30 y 150 °C. La Ecuación 2 es empleada para transformar valores de voltaje medidos ( $V_{out}$ ) en valores de deformación donde voltaje mínimo ( $V_{in}$ ) y factor de medición (GF) han sido establecido en 10.0 voltios y 2.0 respectivamente.

$$\epsilon = \frac{V_{out} * GF}{V_{in}} \quad (2)$$

Por su parte, los materiales piezoeléctricos han ganado popularidad en mediciones de deformación y vibración debido a su capacidad para almacenar energía mecánica de variaciones ambientales. Bajo cargas de tráfico, el transductor piezoeléctrico almacena energía producto de la micro deformación sufrida en la superficie del pavimento la cual sirve para activar el SIA. Este estudio considera que una película de fluoruro de polivinilideno (PVDF) rectangular convierte la energía de deformación en una señal eléctrica. La ecuación 3 es utilizada para

calcular el voltaje (V) generado por el transductor piezoeléctrico donde S, Y,  $d_{31}$ , h y  $\epsilon$ , son la tensión aplicada, el módulo de Young del transductor piezoeléctrico, la constante piezoeléctrica, el espesor y la permitividad eléctrica respectivamente. De mismo modo, la energía generada ( $E_n$ ) de un transductor piezoeléctrico a través de una resistencia de carga (R) se muestra en la Ecuación 4, donde  $t_f$  es el tiempo de carga.

$$V = \frac{SYd_{31}h}{\epsilon} \quad (3)$$

$$E_n = \int_0^{t_f} \frac{V^2(t)}{R} dt \quad (4)$$

### Programa de toma de datos

La toma de datos comenzó el 14 de noviembre de 2017 y finalizó el 15 de febrero de 2018 donde un total de 999,200 aplicaciones de carga fueron realizadas a una velocidad de 76.0 km/h (10.0 vueltas por minuto). Las mediciones de deformación y voltaje se realizaron aproximadamente cada 20,000 aplicaciones de carga. La Figura 4 muestra las mediciones de deformación y voltaje después de 5,000 aplicaciones de carga donde se puede observar como cada brazo del carrusel provoca una respuesta del sensor.

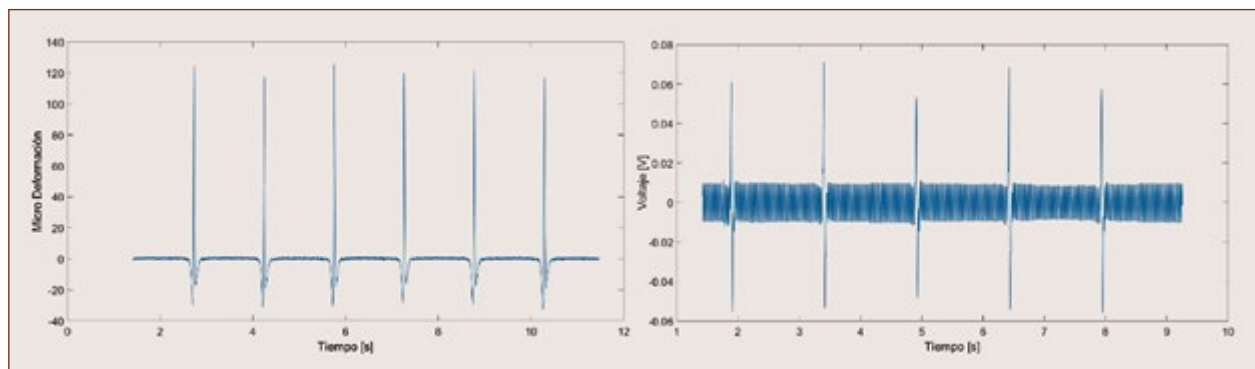


Figura 4. Medición de deformación y voltaje para sensor de referencia y SIA-H3 respectivamente.

Esta investigación considera la variabilidad al momento de aplicar la carga (wandering) donde once posiciones, equidistantes, con espaciado de 0,11 m fueron definidas. La posición uno se encuentra a 18,48 m del centro del carrusel mientras que

la posición once a 19,53 m. La distribución de carga siguió una distribución gaussiana donde la posición seis, Figura 3 radio 19,0 m, soporta el 22,0%. Las posiciones de uno a cinco soportan el 1%, 3%, 7%, 11%, y 17% respectivamente.

## Resultados

Este apartado presenta los resultados obtenidos una vez que las 999,200 aplicaciones de carga fueron realizadas. La Figura 5 muestra como la deformación longitudinal del sensor de referencia y el voltaje del SIA-H3 aumentan con el número de aplicaciones de carga. Se debe mencionar que el aumento del SIA-H3 únicamente es apreciable después de 500,400 aplicaciones.

La Tabla 1 indica los voltajes obtenidos para los diferentes SIA donde el comportamiento visto en el SIA-H3 es replicado para los otros sensores excepto para SIA-H8 ubicado a 19,30 m del centro del carrusel donde el voltaje disminuye.

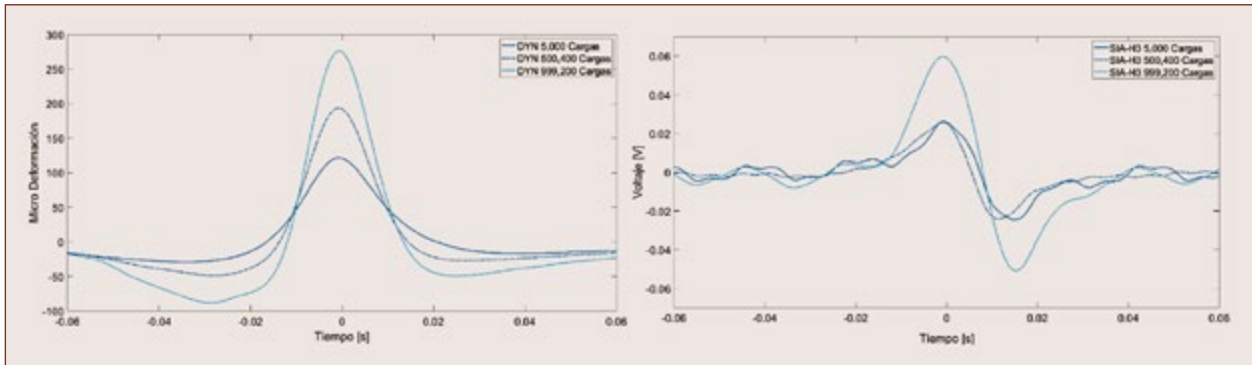


Figura 5. Evolución de deformación y voltaje (SIA-H3) versus aplicaciones de carga.

Tabla 1. Evolución de deformación y voltaje versus número de aplicaciones de carga

Aplicaciones de carga	Referencia (DYN) [ $\mu\epsilon$ ]	Sensor Inalámbrico Autónomo [V]					
		H3	H4	H5	H6	H7	H8
5,000	121	0,027	0,038	0,012	0,028	0,073	0,045
500,400	194	0,026	0,017	0,011	0,012	0,055	0,044
999,200	276	0,059	0,041	0,014	0,027	0,067	0,010

La Figura 6 por su parte muestra la evolución de deformación y voltaje (SIA-H3) durante las 999,200 aplicaciones de carga donde es necesario resaltar la forma en como ambas tendencias se corresponden entre sí especialmente a 136,800 y 507,000 aplicaciones de carga.

Las Figuras 7 y 8 por su parte muestran el efecto que tiene la distribución de la carga al momento de su aplicación (*wandering*) en las respuestas medidas. Tanto la deformación como el voltaje disminuyen sus respuestas conforme la carga se aleja de la posición seis, radio 19,0 m. Esto se puede observar con los SIA H5/H6/H8 ubicados a radios 18,30 m, 18,70 m, y 19,30 m respectivamente.

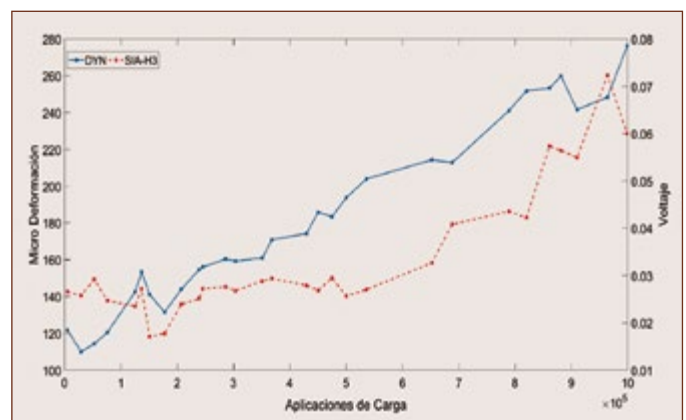


Figura 6. Evolución de deformación y voltaje (SIA-H3) máximo durante APT.

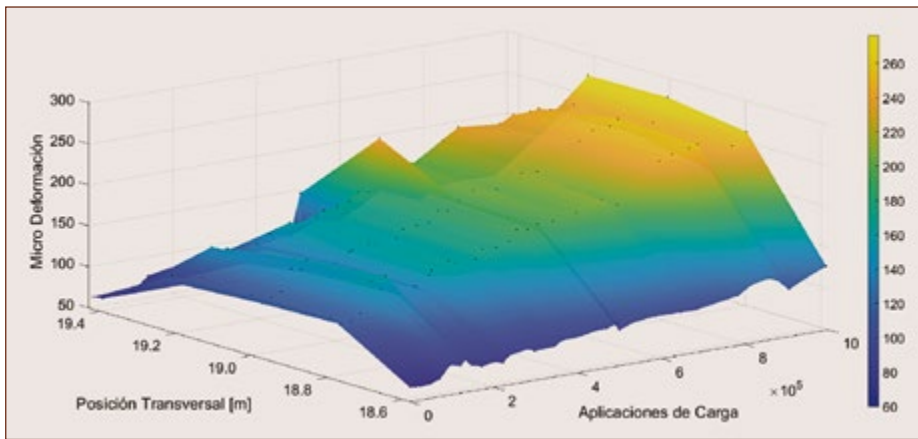


Figura 7. Evolución de deformación versus aplicaciones de carga y posición transversal.

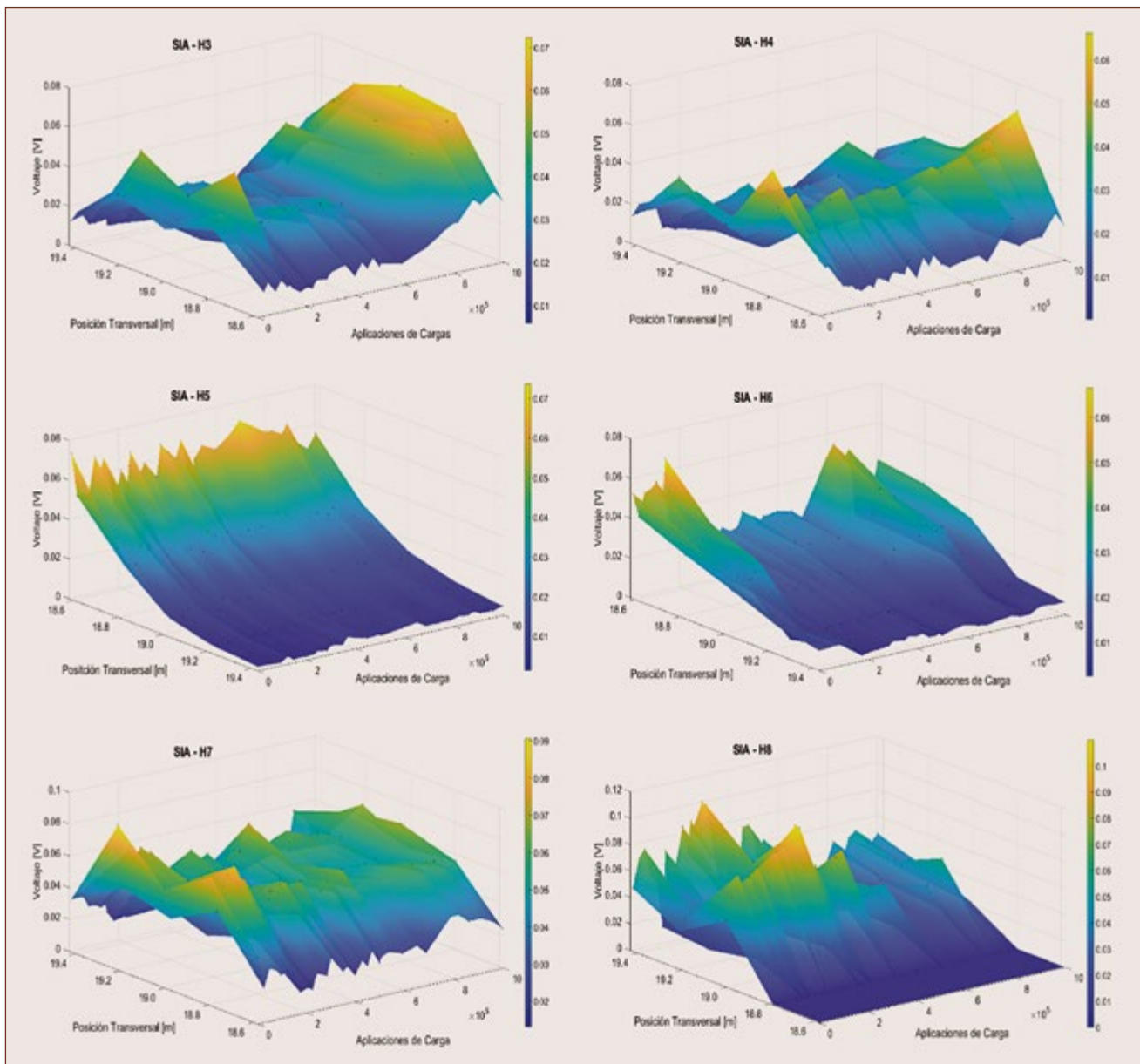


Figura 8. Evolución de voltaje versus aplicaciones de carga y posición transversal.

La Tabla 2 define los umbrales empleados, mismos que han sido obtenidos de los perfiles de evolución de voltaje indicados en la Figura 8 donde los límites superiores e inferiores han sido obtenidos de los percentiles P95 y P05 respectivamente. Cuando la amplitud de la señal supera un nivel de umbral preestablecido, el SIA comienza a registrar el tiempo de carga el cual termina cuando la señal deja de superar dicho umbral. Figura 9 y Figura 10 muestran el tiempo de carga acumulado para SIA-H3 y SIA-H7 respectivamente.

**Tabla 2. Definición de umbrales para el cálculo de tiempo de carga acumulado**

Umbrales	SIA – H3	SIA – H7
D1	0,018	0,041
D2	0,025	0,048
D3	0,031	0,054
D4	0,038	0,061
D5	0,045	0,067
D6	0,051	0,074
D7	0,058	0,080

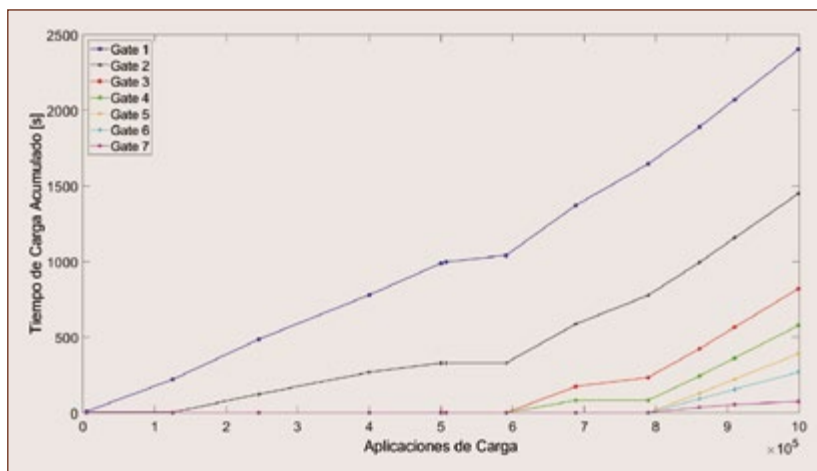


Figura 9. Tiempo de carga acumulado para SIA-H3.

La detección temprana de daños es mejor evaluada al utilizar el SIA-H3, Figura 9. Cuando la amplitud de la deformación incrementa bajo la influencia de cargas repetitivas, el voltaje almacenado también incrementa, lo que resulta en la activación de umbrales superiores. Tomando SIA-H3, por ejemplo, el tercer y cuarto umbral son activados únicamente después de 591,200 aplicaciones de carga mientras que los umbrales quinto, sexto y séptimo son activados en 789,200 aplicaciones de carga.

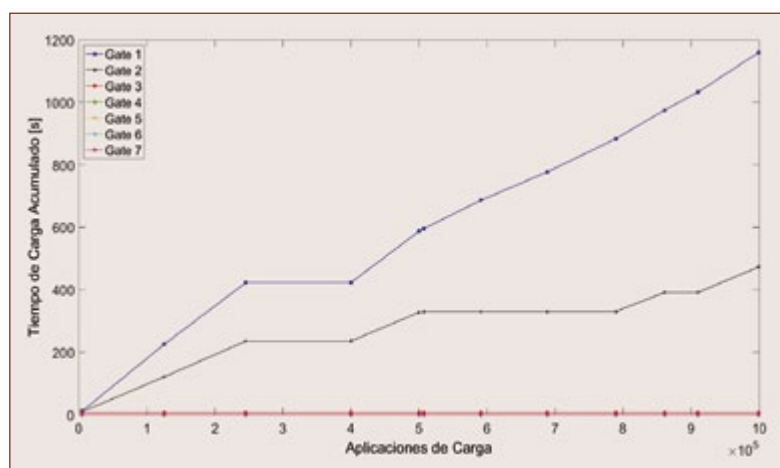


Figura 10. Tiempo de carga acumulado para SIA-H7.

En el caso del SIA-H7, se observa que únicamente los primeros dos umbrales son activados lo cual no permite que se tenga una idea de como el daño se esta produciendo.


## Conclusiones

Esta investigación presentó un nuevo enfoque para monitorear la condición del pavimento basado en sensores inalámbricos autónomos (SIA) a través de un experimento a gran escala. La idea detrás en esta investigación yace en utilizar parámetros estadísticos de la deformación acumulada lo cual reduce la cantidad de datos que necesitan ser transmitidos de manera inalámbrica optimizando el consumo de energía de todo el sistema.

Esta investigación ha encontrado que el tiempo de carga acumulado del sensor se puede considerar

como un buen indicador de la progresión del daño, y que el número de umbrales y activación son buenos indicadores de la severidad del daño, reconociendo que esta es la primera vez que los sensores son probados fuera del laboratorio.

A partir de los resultados presentados anteriormente, donde el deterioro del pavimento aumentó con el número de aplicaciones de carga, se concluye que el sensor inalámbrico autónomo es validado exitosamente con un medidor de deformación reconocido mundialmente (Dynatest-Past-II) en una prueba acelerada de pavimento.

Los siguientes pasos que se deberán llevar a cabo se centran en implementar un mayor número de sensores en una sección de pavimento y en optimizar el número de sensores tanto longitudinal como transversal para evaluar la fatiga. 

## ¿Quieres profundizar?

- [1] NAPA and EAPA, *The Asphalt Paving Industry A Global Perspective, Third Edition*. 2011.
- [2] W. Xue, D. Wang, and L. Wang, "A review and perspective about pavement monitoring," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 295–302, 2012.
- [3] S. F. Brown, "Developments in pavement structural design and maintenance," *Proc. Instn Civ. Engrs Transp.*, 1998, 129, Nov., vol. 129, pp. 201–206, 1998.
- [4] M. M. Robbins, C. Rodezno, N. Tran, and D. H. Timm, "Pavement ME Design – A Summary of Local Calibration Efforts for Flexible Pavements," *NCAT Rep. 17-07*, pp. 1–98, 2017.
- [5] P. Ullidtz and H. J. Ertman Larsen, "State-of-the-Art Stress, Strain and Deflection Measurements." Symposium on the State-of-the-Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields, sponsored by U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, pp. 148–161, 1989.
- [6] S. H. Dessouky, I. L. Al-Qadi, and P. J. Yoo, "Full-depth flexible pavement responses to different truck tyre geometry configurations," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 15, no. 6, pp. 512–520, 2014.
- [7] S. F. Brown and K. R. Peattie, "The structural design of bituminous pavements for heavy traffic," *Third Int. Conf. Struct. Des. Asph. Pavements*, pp. 83–97, 1974.
- [8] F. Leiva-Villacorta, A. Vargas-Nordbeck, J. P. Aguiar-Moya, and L. Loria-Salazar, "Development and calibration of permanent deformation models," *Roles Accel. Pavement Test. Pavement Sustain. Eng. Environ. Econ.*, no. Lekarp 1997, pp. 573–587, 2016.
- [9] N. Lajnef, K. Chatti, S. Chakrabartty, M. Rhimi, and P. Sarkar, "Smart Pavement Monitoring System," *Report. FHWA-HRT-12-072*. Federal Highway Administration, Washington, DC, 2013.
- [10] S. K. Verma, S. S. Bhadauria, S. Akhtar, S. K. Verma, S. S. Bhadauria, and S. Akhtar, "Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures," *J. Constr. Eng.*, vol. 2013, no. 2008, pp. 1–11, 2013.
- [11] V. Marecos, S. Fontul, M. de Lurdes Antunes, and M. Solla, "Evaluation of a highway pavement using Non-Destructive Tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 1164–1172, 2017.
- [12] W. Xue, L. Wang, D. Wang, and C. Druta, "Pavement Health Monitoring System Based on an Embedded Sensing Network," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 10, p. 04014072, 2014.
- [13] N. Lajnef, M. Rhimi, K. Chatti, L. Mhamdi, and F. Faridazar, "Toward an Integrated Smart Sensing System and Data Interpretation Techniques for Pavement Fatigue Monitoring," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 26, no. 7, pp. 513–523, 2011.
- [14] H. Sohn, C. Ferrar, F. M. Hemez, and J. Czarnecki, "A Review of Structural Health Monitoring Literature : 1996-2001," *Struct. Heal. Monit.*, vol. LA-13976-M, no. LA-13976-MS, pp. 1996–2001, 2003.
- [15] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–15, 2007.
- [16] J. Lynch and K. Loh, "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring," *Shock Vib. Dig.*, vol. 38, no. 2, pp. 91–128, 2006.
- [17] M. Rhimi, N. Lajnef, K. Chatti, and F. Faridazar, "A self-powered sensing system for continuous fatigue monitoring of in-service pavements," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 303–310, 2012.
- [18] C. Huang, N. Lajnef, and S. Chakrabartty, "Calibration and characterization of self-powered floating-gate usage monitor with single electron per second operational limit," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 57, no. 3, pp. 556–568, 2010.
- [19] A. H. Alavi, H. Hasni, N. Lajnef, K. Chatti, and F. Faridazar, "An intelligent structural damage detection approach based on self-powered wireless sensor data," *Autom. Constr.*, vol. 62, pp. 24–44, 2016.

# Reflexiones sobre motivación

Crear en ti mismo es una gran herramienta para detonar la motivación. Si crees más en ti mismo actuarás con menos miedos y lograrás mejor tus objetivos.

Cuando logras algo que antes creías que no podrías hacerlo, tu motivación aumenta mucho. Cuando estás motivado en un territorio, puedes trasladar esa motivación a otro territorio.

Ver que algo es posible, motiva mucho. El ejemplo es más poderoso que las palabras. Por ello las películas y las historias de personas que lograron una meta nos motivan mucho a tratar de lograr un objetivo dentro de nuestras propias realidades.

Recuperar la credibilidad en ti mismo es un gran motor de motivación. Haz lo que sea necesario para recuperar la confianza en ti mismo y lo demás vendrá por añadidura.

Cuando crees en ti, consigues aliados fácilmente. A las personas les gusta estar cerca de quienes creen en sí mismos y viven felices, porque intuyen que tienen la fórmula ideal de vida y la quieren aprender.

Cuando logres algo, en ese momento defínete un nuevo objetivo, de esa manera mantendrás la motivación en un nivel alto.

La fe es un gran motor de la motivación. La fe te permite creer en ti, en los demás y en el universo. La fe te permite estar feliz y confiado de que lo mejor está por venir porque te lo mereces, porque has hecho todo lo necesario para que las bendiciones lleguen.





Para que un niño crezca creyendo en sí mismo, normalmente primero existió la condición de que sus padres, maestros o alguien creyeran en él.

Quien tiene objetivos vive motivado. Cuando logras un objetivo terminas muy motivado, y es importante aprovechar esta motivación para definir un nuevo objetivo.

Una vez que ganas aceptación y credibilidad no quieres perderla. Mantener la credibilidad y construir una sólida reputación es una gran fuente de motivación. La reputación se gana en muchos años, pero se puede llegar a perder en un segundo. Así que es importante mantenerte motivado y muy consciente para no caer en tentaciones en el camino que te hagan perder tu reputación.

Una gran fuente de motivación es cuando tu mismo has definido tus propios objetivos, al definirlos así, tu efectividad se triplicará para lograrlos.

Los objetivos tangibles no son necesariamente lo que nos motiva o lo que verdaderamente deseamos, sino los beneficios asociados a estos objetivos.

Cuando tu defines tus objetivos, te sientes fuertemente motivado a lograrlos y te comprometes en el proceso, cuando te los imponen, te comprometes poco.

Saber que eres el presente en el que se conjuga todo un pasado y que eres el presente en donde se forja el inicio de un gran futuro. Eso es un fuerte motivador.

Un gran líder es el que se convierte en un aliado para que las personas a su cargo logren sus objetivos autodefinidos.

Todos necesitamos incentivos que estimulen nuestra motivación a lo largo del camino hacia el logro de nuestros objetivos, los incentivos nos oxigenan y renuevan los ánimos cuando más los necesitamos.

La motivación genera creatividad, la creatividad genera innovación, la innovación hace que aumente el valor agregado otorgado a los demás.

La fuerza de la motivación y su duración, en buena medida depende de los incentivos que se le vayan dando a la persona en el camino y del impacto psicológico que estos generen.

## ASFIER<sup>®</sup>

Emulsificantes asfálticos.

## KAOAMIN<sup>®</sup> / GRIPPER<sup>®</sup>

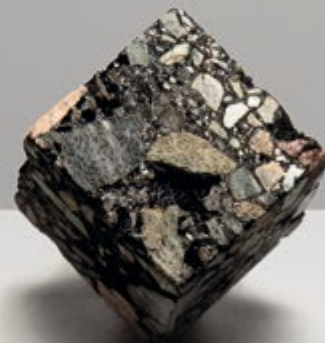
Aditivos promotores de adherencia.  
Aditivos para mezcla tibia.  
Modificadores reológicos.

## DANOX RAP-300<sup>®</sup>

Aditivo para reciclado de pavimentos asfálticos.

## TRASUT-RA<sup>®</sup>

Innovador tratamiento superficial de rápida  
apertura al tráfico con espesor desde 1 cm.



asfaltos@kao.com  
Tel. +52-33-3284-1000  
[kaochemicals-eu.com](http://kaochemicals-eu.com)



VISE

*Cambiando el*  
FUTURO



[www.vise.com.mx](http://www.vise.com.mx)



[exitocliente@vise.com.mx](mailto:exitocliente@vise.com.mx) | (477) 215 9000

# GMMC

- GRUPO MULTISERVICIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN -



TRABAJAMOS CON LA CONVICCIÓN DE MEJORAR A NUESTRO MÉXICO



ENERGÍA

- COMBUSTIBLE ALTERNOS Y COMBUSTIBLE PESADO
- DIESEL, GASOLINA Y TURBOSINA
- TRANSPORTE ESPECIALIZADO



VÍAS TERRESTRES

- ASFALTOS NACIONALES E IMPORTADOS EMULSIONES Y MODIFICADOS
- ADITIVOS PARA ASFALTO Y COLORANTES
- ESTABILIZADOR IÓNICO DE SUELOS
- LABORATORIO NIV. II AMAAC
- RENTA DE MAQUINARIA, EQUIPOS PARA RIEGOS Y APLICACIONES SUPERFICIALES.



MTTO. Y PROTECCIÓN

- PINTURAS E IMPERMEABILIZANTES
- ESMALTES Y EPÓXICOS
- SUPERFICIES DEPORTIVAS
- SELLADORES PARA PAVIMENTOS, GRIETAS Y BACHES

Tel.: (464) 6474858

CAT 8007171800

www.gmarca.com

SOLUCIONES ASFÁLTICAS  
GLOBAL MARKETING CORPORATION

HELLOS  
COMBUSTIBLES

VIVAL

petrien

DOCTOR BACH

SEAL FLEX  
DISTRIBUIDOR AUTORIZADO

GMMI

myecogas  
Hidrocarburos y Aditivos

Novocoat

SMEDT

PENETRA

TOPSEAL

ULTRALINK

BITUELASTIC