



ILIEV

BOLETÍN TÉCNICO INFORMATIVO

www.ilievlima.org

Año 01 - Edición 004

Octubre 2026

Lima - Perú

Infraestructura Vial: El Camino Hacia un Perú Más Competitivo

Una visión estratégica de los avances, desafíos e innovaciones que impulsan la modernización de la infraestructura vial, fortaleciendo la conectividad y el desarrollo sostenible del país.



EMPRESAS ASOCIADAS



IPESA



¡Sé parte de nosotros!

✉ instituto@ilievlima.org ☎ +51 942 784 928

ARTÍCULO 1

EMULSIONES TERMOADHERENTES: EVOLUCIÓN DEL RIEGO DE LIGA

UNA TECNOLOGÍA ORIENTADA A REDUCIR EL LEVANTAMIENTO DEL LIGANTE POR EL TRÁNSITO DE OBRA Y PRESERVAR LA ADHERENCIA ENTRE CAPAS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

 **Ing. MSc. Iván Chávez Roldán**
Ingeniero Civil – Especialista en Pavimentos
y Tecnologías Asfálticas

1. UNA INTERFAZ QUE NO DEBERÍAMOS SEGUIR SUBESTIMANDO

Durante muchos años, buena parte de la atención en el diseño y construcción de pavimentos asfálticos se ha concentrado en variables como el espesor de las capas, las características de los agregados, el grado del ligante, el contenido de asfalto, la compactación o el comportamiento de la mezcla.

Todos estos factores son fundamentales. Sin embargo, existe otro componente que muchas veces recibe menor atención debido a su aparente sencillez y a su reducido costo respecto del conjunto de la estructura: la adherencia entre capas asfálticas.

Un pavimento flexible no debería entenderse únicamente como una sucesión de capas

colocadas una encima de otra. Para desarrollar adecuadamente el comportamiento estructural previsto, estas capas deben interactuar y transferir esfuerzos entre sí.

El riego de liga tiene precisamente esa función: favorecer la unión entre la superficie existente y la nueva capa asfáltica.

La Federal Highway Administration – FHWA señala que una deficiente adherencia entre capas puede relacionarse con deslizamientos, delaminación, fisuración por fatiga y formación de baches [1]. El problema, además, no siempre resulta evidente inmediatamente después de la construcción. Una vía puede presentar inicialmente una superficie aparentemente satisfactoria y comenzar posteriormente a desarrollar deterioros cuyo origen se encuentra en una interfaz que nunca trabajó adecuadamente.

Desde esta perspectiva, el riego de liga deja de ser una operación secundaria y pasa a convertirse en una parte importante del desempeño del sistema. (Ver Figura 1)

2. EL PROBLEMA QUE TODOS HEMOS VISTO EN OBRA

En condiciones ideales, el procedimiento parece sencillo: se limpia la superficie, se aplica uniformemente el riego de liga, la emulsión rompe y posteriormente se coloca la mezcla asfáltica.

La realidad de obra puede ser bastante diferente.

“Un pavimento puede tener buenos materiales y espesores correctos, pero si sus capas no trabajan solidariamente, parte de ese diseño se pierde en la interfaz.

Entre el momento de aplicación del riego y la llegada de la pavimentadora normalmente circulan camiones, volquetes, equipos de construcción y vehículos de apoyo. Cuando los neumáticos pasan sobre el ligante residual, una parte puede adherirse a ellos y ser retirada de la superficie.



Figura 1. La adherencia entre capas comienza antes de la compactación: preservar la uniformidad del riego de liga hasta la colocación de la mezcla asfáltica es fundamental para el desempeño de la interfaz.



Figura 2. Fenómeno de tracking en un riego de liga convencional. El paso de los neumáticos puede levantar y desplazar parte del ligante aplicado, generando una distribución irregular antes de la colocación de la mezcla asfáltica.

Este fenómeno, conocido internacionalmente como tracking o pick-up, produce algo particularmente problemático: la cantidad de ligante que finalmente queda disponible en la interfaz puede ser distinta a la que originalmente fue aplicada.

Por ello existe una diferencia conceptual importante entre controlar la tasa de aplicación del distribuidor y garantizar la cantidad efectiva de ligante que permanece sobre el pavimento cuando llega la mezcla asfáltica. La investigación realizada por el Florida Department of Transportation identifica precisamente el deterioro del riego debido al tránsito de construcción como una de las causas que puede contribuir a una unión deficiente entre capas [5].

En campo podemos observar el resultado:

“Controlar la tasa del distribuidor no garantiza la cantidad real de ligante en la pista. El tránsito de obra retira la película, creando zonas desiguales que reducen la adherencia interlaminar.”

zonas relativamente oscuras y correctamente cubiertas junto a otras donde el paso de neumáticos ha retirado parcialmente la película. La aplicación inicial pudo haber sido uniforme; la interfaz que recibe la mezcla ya no necesariamente lo es.

La consecuencia no debería evaluarse únicamente desde la limpieza de los neumáticos o la estética de la obra. El verdadero problema es que aparecen zonas con diferente capacidad de adherencia dentro de una misma interfaz.

El NCHRP Report 712 aporta un dato que permite dimensionar la importancia de la uniformidad. En sus ensayos, trabajar con aproximadamente 50 % de cobertura produjo reducciones significativas de la resistencia interlaminar y un comportamiento más irregular respecto de las superficies con cobertura completa [2].

Es decir, no basta con especificar una dosificación promedio. La distribución y permanencia del ligante también importan..

(Ver Figura 2)

3. ¿POR QUÉ ES TAN IMPORTANTE LA ADHERENCIA INTERLAMINAR?

Cuando dos capas se encuentran adecuadamente unidas, los esfuerzos generados por el tránsito pueden transferirse a través de la interfaz y las capas participan conjuntamente en la respuesta del pavimento.

Cuando esa unión disminuye, puede producirse movimiento relativo entre ellas.

Desde el punto de vista mecánico, la condición de adherencia modifica la distribución de esfuerzos y deformaciones dentro de la estructura. Una pérdida importante de vínculo interlaminar puede aumentar las sollicitaciones en determinadas zonas, favorecer deslizamientos y acelerar algunos mecanismos de deterioro.

Esta situación resulta especialmente crítica en lugares donde las sollicitaciones horizontales son mayores: zonas de frenado,



Figura 3. Influencia de la adherencia interlaminar en el comportamiento del pavimento. Una interfaz adecuadamente adherida favorece la transferencia de esfuerzos y el trabajo conjunto de las capas; una adherencia deficiente permite desplazamientos relativos y modifica la respuesta estructural.

intersecciones, pendientes, curvas, accesos industriales, corredores de transporte pesado y pavimentos sometidos a maniobras frecuentes.

La literatura especializada sobre riegos de liga coincide en que el comportamiento interlaminar depende de numerosos factores: material utilizado, tasa residual, textura de la superficie, limpieza, temperatura, estado de la capa existente y procedimiento constructivo, entre otros [2,3]. Por ello, hablar de adherencia no significa únicamente discutir qué emulsión fue especificada.

Significa evaluar el sistema completo formado por superficie + riego + mezcla.

Una analogía sencilla ayuda a comprenderlo. Podemos construir un edificio con pisos individualmente resistentes, pero si eliminamos los mecanismos que permiten que esos elementos trabajen como parte de una estructura, el comportamiento global cambia.

En pavimentos sucede algo semejante. (Ver Figura 3)

4. EL RIEGO CONVENCIONAL NO ES EL ENEMIGO

Sería técnicamente incorrecto plantear que el riego de liga convencional constituye una tecnología deficiente.

Una emulsión correctamente seleccionada, fabricada, aplicada sobre una superfi-

“El riego de liga convencional funciona, pero el tránsito en obra pone a prueba su eficacia. ¿Cómo proteger la película de ligante ante el paso de los camiones? Entran en juego las emulsiones termoadherentes.

cie limpia y utilizada con una tasa adecuada puede generar una excelente adherencia.

El problema aparece cuando las condiciones de construcción exigen algo adicional al producto: que soporte tránsito antes de recibir la siguiente capa asfáltica.

Existe entonces una condición aparentemente contradictoria.

Por una parte, necesitamos un ligante capaz de generar una unión fuerte entre las capas. Por otra, necesitamos que antes de la pavimentación ese mismo material no sea recogido fácilmente por los neumáticos.

La FHWA recomienda que el riego se aplique de manera uniforme sobre una superficie preparada y que la operación de pavimentación se programe de modo que la película no resulte dañada antes de colocar la mezcla [1].

En muchas obras latinoamericanas lograr esa condición de forma permanente no es sencillo.

Los frentes de trabajo son extensos, intervienen numerosos equipos, los ciclos de los camiones obligan a circular sobre áreas previamente tratadas y los tiempos reales entre la aplicación de la emulsión y la pavimentación pueden variar.

Por eso la pregunta no debería ser:

¿Funciona el riego convencional?

Claro que funciona.

La pregunta adecuada es:

¿Podemos desarrollar una solución que conserve mejor la película de ligante cuando inevitablemente existe tránsito de obra?

Aquí aparece el interés de las emulsiones denominadas trackless, non-tracking y, dentro del concepto que estamos desarrollando para nuestras condiciones, emulsiones termoadherentes.

5. DE LA EMULSIÓN “PEGAJOSA” A UNA EMULSIÓN QUE RESISTA EL TRÁNSITO

La literatura internacional lleva varios años estudiando materiales de riego específicamente formulados para reducir el levantamiento por neumáticos.

Una revisión publicada en Construction and Building Materials señala que las emulsiones trackless surgieron precisamente como una alternativa para disminuir la remoción del riego por los equipos de construcción [3].

“De la teoría a la norma: la literatura y ensayos de la NCHRP y FDOT confirman que las emulsiones trackless superan al riego convencional en adherencia y resistencia al tránsito de obra.”

En 2012, el Virginia Transportation Research Council evaluó cinco materiales trackless y dos riegos convencionales. Los materiales no adherentes a los neumáticos mostraron mejor comportamiento en el ensayo de tracking y, adicionalmente, mejores resultados de adherencia mediante ensayos de tracción y corte [4].

El NCHRP Report 712 también incluyó un producto trackless dentro de su programa experimental. En las condiciones estudiadas, presentó la mayor resistencia interlaminar entre las emulsiones evaluadas y mostró un comportamiento particularmente favorable a temperaturas elevadas frente a una emulsión CRS-1 [2].

Florida constituye otro caso interesante. Allí se realizaron aplicaciones de este tipo de material desde 2004 y, de acuerdo con el propio FDOT, el trackless tack pasó a ser material obligatorio de riego de liga en 2015 para los usos considerados por esa administración [5].



Figura 4. Aplicación de un riego de liga tipo trackless. Estas tecnologías han sido desarrolladas para reducir el levantamiento del ligante por los neumáticos durante las operaciones de construcción, preservando la película necesaria para la posterior adherencia entre capas. Fuente: Blacklidge Emulsions.

La evidencia resulta suficiente para afirmar que el concepto ya no pertenece únicamente al terreno experimental.

Lo que todavía necesita desarrollo es su adaptación a diferentes materias primas, climas, procedimientos de construcción y exigencias contractuales. (Ver Figura 4)

6. ¿QUÉ ENTENDEMOS POR UNA EMULSIÓN TERMOADHERENTE?

En el enfoque propuesto, una emulsión termoadherente busca combinar dos comportamientos que ocurren en momentos distintos del proceso constructivo.

Después de la aplicación, rotura y pérdida del agua, la película residual debe desarrollar suficiente resistencia superficial para minimizar el levantamiento por los neumáticos.

Posteriormente, al colocarse sobre ella una mezcla asfáltica caliente, la elevación de temperatura modifica el comportamiento reológico del ligante residual. Durante el extendido y especialmente durante la

compactación, ambas superficies entran en contacto bajo temperatura y presión, generándose las condiciones necesarias para desarrollar la unión definitiva.

De manera simplificada:

APLICACIÓN → ROTURA → SUPERFICIE TRANSITABLE → MEZCLA CALIENTE → CONTACTO Y COMPACTACIÓN → ADHERENCIA FINAL



Figura 5. Mecanismo conceptual de funcionamiento de una emulsión termoadherente: después de su aplicación, rotura y formación de la película residual, esta resiste el tránsito de obra con menor tendencia al tracking. Con la llegada de la mezcla asfáltica caliente, el aumento de temperatura reduce la viscosidad del ligante residual y, durante la compactación, favorece su flujo, contacto e integración en la interfaz, desarrollando la adherencia entre capas.

El concepto no significa que el ligante permanezca completamente inactivo hasta recibir calor. Tampoco implica que todos los productos internacionales denominados trackless funcionen exactamente mediante el mismo mecanismo.

La formulación puede utilizar diferentes estrategias: selección del ligante residual, modificación polimérica, control del punto de ablandamiento, estructura reológica y otros componentes capaces de modificar su comportamiento superficial.

Lo importante es el objetivo funcional:

reducir el pick-up antes de pavimentar sin sacrificar la adherencia interlaminar posterior. (Ver Figura 5)

7. NO SE TRATA SIMPLEMENTE DE “ENDURECER” EL ASFALTO

Aquí aparece uno de los principales desafíos del desarrollo.

Podría suponerse que para evitar que el ligante se adhiera a los neumáticos bastaría con utilizar un residuo extremadamente duro. Pero esa simplificación puede generar un nuevo problema: una película muy resistente al tracking que posteriormente no desarrolle adecuadamente la unión requerida.

La ingeniería consiste precisamente en encontrar un equilibrio.

El material debería presentar:

resistencia suficiente al levantamiento durante la construcción; capacidad de formar una película continua; estabilidad durante almacenamiento y aplicación; rotura compatible con las condiciones de obra; respuesta adecuada frente a temperatura; compatibilidad con los materiales existentes y, finalmente, elevada resistencia interlaminar.

Investigaciones sobre materiales modificados para trackless tack coat han utilizado combinaciones de asfaltos modificados, polímeros y otros modificadores precisamente para alterar las propiedades térmicas, reológicas y adhesivas del residuo [6].

Esto demuestra que el desarrollo no debería reducirse a seleccionar una emulsión por penetración, viscosidad o contenido de residuo.

Necesitamos empezar a preguntarnos cómo se comporta el producto durante todo el proceso constructivo.

8. DEL CONTROL DEL PRODUCTO AL CONTROL DEL DESEMPEÑO

Tradicionalmente, muchas especificaciones de emulsiones asfálticas verifican características del producto antes de colocarlo: viscosidad, residuo, estabilidad, tamizado, carga de partícula y determinadas propiedades del ligante residual.

Estos controles continúan siendo necesarios. Pero una emulsión diseñada específicamente para evitar tracking necesita demostrar aquello para lo cual fue formulada. Por tanto, su evaluación debería incorporar tres niveles.

Primer nivel: comportamiento como emulsión. Debe verificarse que el producto pueda almacenarse, transportarse, bombearse y distribuirse uniformemente, y que presente una rotura compatible con el proceso de construcción.

Segundo nivel: resistencia al tránsito. Debe determinarse si, después del periodo establecido de rotura o curado, la película resiste el paso de neumáticos sin sufrir levantamiento o transferencia significativa. Tercer nivel: desempeño de la interfaz terminada. Después de colocar y compactar la nueva mezcla debe verificarse la capacidad de unión mediante ensayos de corte, tracción o metodologías equivalentes.

Virginia orientó precisamente su investigación hacia procedimientos de laboratorio que permitieran calificar materiales no adherentes antes de una posterior validación en campo [4].

El NCHRP Report 712 desarrolló además dispositivos y procedimientos para estudiar la resistencia interlaminar tanto en laboratorio como en obra, reforzando una idea que considero central: **el riego de liga debería evaluarse cada vez más por el**

“Una emulsión termoadherente debe aprobar dos exámenes: no levantarse cuando pasa el neumático y adherir cuando llega la mezcla asfáltica.”

desempeño que genera y no únicamente por el nombre del producto utilizado [2]. (Ver Figura 6)

9. LA DOSIFICACIÓN SIGUE SIENDO FUNDAMENTAL

La utilización de una tecnología más avanzada no elimina la necesidad de diseñar correctamente la tasa de aplicación.

Una cantidad insuficiente puede generar discontinuidades o una película incapaz de cubrir adecuadamente la textura superficial. Una cantidad excesiva tampoco es necesariamente beneficiosa y puede producir una interfase con demasiado ligante.

El NCHRP Report 712 demostró que el desempeño depende tanto del tipo de material como de la tasa residual, el tipo de superficie y la temperatura [2].

Más recientemente, el FDOT construyó secciones a escala real con diferentes tasas residuales de trackless tack. El estudio utilizó testigos, ensayos de resistencia interlaminar y carga acelerada mediante Heavy

Figura 6. Ensayo de corte de la adherencia entre capas asfálticas (adaptación en prensa Marshall)

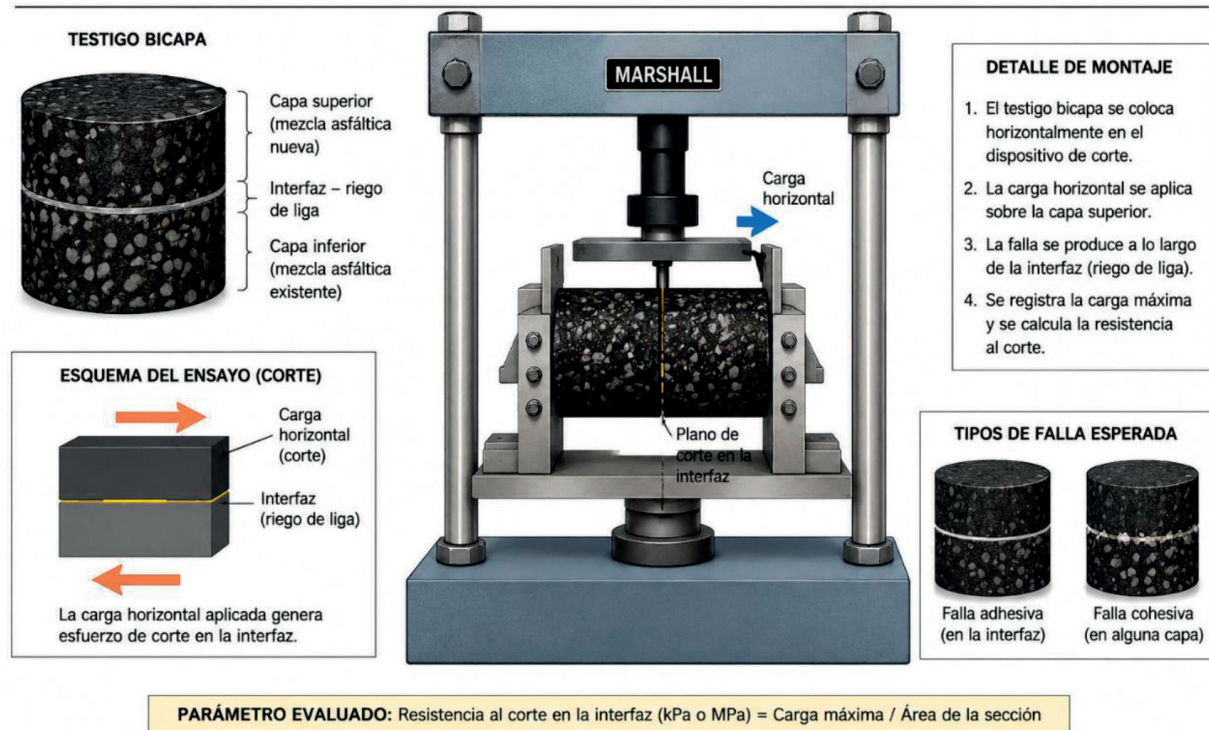


Figura 6. Esquema conceptual para la evaluación de la adherencia interlaminar mediante corte directo sobre un testigo bicapa. La carga máxima alcanzada permite cuantificar la resistencia de la interfaz y comparar el desempeño de diferentes tipos y dosificaciones de riego de liga.

Vehicle Simulator. La sección sin riego presentó deslizamientos prematuros, mientras las secciones tratadas mostraron un comportamiento claramente diferente [5]. Otro aspecto interesante del estudio de Florida fue la medición directa de la tasa residual mediante almohadillas absorbentes. Esto permite distinguir entre la cantidad de emulsión que sale del distribuidor y la cantidad efectiva de ligante que queda luego de evaporarse el agua.

Ese criterio resulta especialmente relevante cuando buscamos controlar desempeño.

No deberíamos preguntar únicamente:

¿Cuántos litros por metro cuadrado aplicamos?

También deberíamos determinar:

¿Cuánto residuo efectivo necesitamos para esta superficie y cuánto permanece realmente disponible para formar la interfaz?

10. ¿POR QUÉ ESTA TECNOLOGÍA TIENE PARTICULAR INTERÉS PARA LATINOAMÉRICA?

Nuestras condiciones constructivas presentan características que hacen especialmente interesante este desarrollo.

En muchas regiones trabajamos con temperaturas ambientales y superficiales elevadas, precisamente una condición que puede favorecer el tracking de ligantes convencionales.

“Innovar no consiste en copiar una formulación extranjera. Consiste en comprender su principio, adaptarlo a nuestros materiales y demostrar su desempeño en campo.”

Tenemos además frentes de trabajo extensos, tránsito de obra intenso, restricciones logísticas, diferentes disponibilidades de

Figura 7. ¿POR QUÉ ESTA TECNOLOGÍA TIENE PARTICULAR INTERÉS PARA LATINOAMÉRICA?

Condiciones propias que exigen adaptar y validar el riego termoadherente a nuestra realidad



Figura 7. La incorporación de emulsiones termoadherentes en Latinoamérica requiere adaptar la tecnología a las condiciones climáticas, materiales disponibles, logística y prácticas constructivas de cada región, mediante formulación local, validación en laboratorio y verificación en campo.

asfaltos base y una presión permanente por aumentar productividad sin comprometer calidad.

Sin embargo, estas mismas diferencias nos obligan a actuar con cautela.

Una formulación desarrollada para determinado asfalto base, determinada temperatura o determinado procedimiento constructivo no debería trasladarse automáticamente a otro país.

La disponibilidad regional de ligantes, su consistencia, la naturaleza de los modificadores, las condiciones climáticas, los agregados de las mezclas y la temperatura real de colocación pueden modificar el desempeño.

Aquí se encuentra probablemente la mayor oportunidad tecnológica.

No se trata simplemente de **importar una emulsión**.

Se trata de **incorporar el principio, formular con nuestros materiales y validar el comportamiento bajo nuestras condiciones reales de construcción**. (Ver Figura 7)

11. UNA EVOLUCIÓN TAMBIÉN PARA NUESTRAS ESPECIFICACIONES

El desarrollo de emulsiones termoadhentes abre una discusión más amplia.

Durante décadas hemos elaborado muchas especificaciones indicando fundamental-

mente qué producto utilizar y qué propiedades debe cumplir antes de aplicarse.

La ingeniería moderna de pavimentos avanza progresivamente hacia otro enfoque: definir también qué desempeño debe alcanzar el sistema construido.

En este caso podríamos pensar en criterios asociados a:

resistencia al tracking; uniformidad de aplicación; tasa residual efectiva; resistencia interlaminar; respuesta frente a temperatura y comportamiento después de un periodo determinado de servicio.

Este enfoque no elimina las especificaciones tradicionales. Las complementa.

Y tiene una ventaja importante: permite que diferentes tecnologías o formulaciones compitan por alcanzar un resultado verificable.

Si dos productos cumplen los requisitos convencionales pero uno pierde una cantidad significativa de ligante por tránsito y otro conserva la película, ambos no están ofreciendo el mismo resultado constructivo. La especificación debería ser capaz de reconocer esa diferencia.

12. EL RIEGO DE LIGA NO ES UN GASTO, ES PARTE DE LA INVERSIÓN

Existe una tendencia natural en las obras a concentrarse en las partidas económicamente más importantes.

El riego de liga representa comparativamente un costo muy pequeño frente a la producción, transporte, colocación y compactación de miles de toneladas de mezcla asfáltica.

Precisamente por ello resulta contradictorio permitir que un componente relativamente económico pueda comprometer la unión entre capas cuyo costo es muy superior.

La revisión de antecedentes internacionales confirma que la adherencia interlaminar no es un detalle menor y que existen métodos para evaluarla.

Las emulsiones no adherentes a neumáticos constituyen una evolución interesante porque atacan un problema cotidiano de construcción: **la pérdida o desplazamiento del ligante antes de que este pueda cumplir su función definitiva.**

Pero tampoco deberían presentarse como una solución automática.

Su formulación debe ser adecuada. La dosificación debe diseñarse. La superficie

“**El riego de liga es un costo mínimo dentro del presupuesto, pero fallar en él pone en riesgo inversiones millonarias. Proteger la adherencia interlaminar es proteger toda la obra asfáltica.**

“**Las emulsiones termoadherentes atacan la pérdida de ligante antes de pavimentar, pero ninguna tecnología reemplaza la buena construcción: la complementa con calibración y control.**

debe encontrarse correctamente preparada. El distribuidor debe estar calibrado. La aplicación debe ser uniforme. Y el desempeño debe verificarse.

La tecnología no reemplaza a la buena construcción.

La complementa.

13. MIRANDO HACIA EL FUTURO

La ingeniería vial latinoamericana ha demostrado históricamente una gran capacidad para adaptar tecnologías desarrolladas en otros lugares a realidades geográficas, económicas y constructivas muy diferentes.

Las emulsiones termoadherentes representan una nueva oportunidad para hacerlo.

La evidencia internacional disponible demuestra que las tecnologías trackless pueden reducir el levantamiento del ligante y alcanzar elevados niveles de adherencia interlaminar. La experiencia de organis-



Figura 8. La evolución del riego de liga debe orientarse hacia soluciones verificables por desempeño, capaces de mejorar la adherencia entre capas y contribuir a pavimentos más durables bajo nuestras propias condiciones de servicio.

mos como VDOT, NCHRP y FDOT demuestran además que estas propiedades pueden medirse y convertirse en criterios objetivos de aceptación [2,4,5].

El siguiente paso debería ser nuestro.

Investigar con los asfaltos disponibles regionalmente. Desarrollar formulaciones adaptadas a nuestras temperaturas. Evaluar resistencia al tránsito. Determinar tasas residuales. Medir adherencia mediante testigos. Ejecutar tramos experimentales. Y convertir los resultados en especificaciones de desempeño.

Porque finalmente el objetivo no es producir una emulsión más sofisticada.

El objetivo es mucho más sencillo:

conseguir que las capas que diseñamos como una estructura trabajen realmente como una estructura.

Y desde esa perspectiva, el riego de liga no debería seguir siendo considerado una operación secundaria.

Puede constituir una pequeña fracción del costo de un pavimento, pero tiene una enorme responsabilidad en su comportamiento. (Ver Figura 8)

REFERENCIAS Y FUENTES

[1] **Federal Highway Administration – FHWA.** *Tack Coat Best Practices*. FHWA-HIF-16-017, 2016. Documento técnico sobre función del riego de liga, preparación de superficie, aplicación y consecuencias de una adherencia deficiente. FHWA – Tack Coat Best Practices

[2] **Mohammad, L. N.; Elseifi, M. A.; Bae, A.; Patel, N.; Button, J.; Scherocman, J. A.** *Optimization of Tack Coat for HMA Placement*. NCHRP Report 712. Transportation Research Board, National Academies, Washington D.C., 2012. DOI: 10.17226/13652. National Academies – NCHRP Report 712

[3] **Application of tack coat in pavement engineering.** Construction and Building Materials, Vol. 152, 2017, pp. 856–871. Revisión sobre materiales de riego, condiciones de aplicación, adherencia y empleo de emulsiones trackless. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.056. Artículo en Construction and Building Materials

[4] **Clark, T. M.; Rorrer, T. M.** *Trackless Tack Coat Materials: A Laboratory Evaluation for Performance Acceptance*. Virginia Transportation Research Council, Report 12-R14, 2012. Virginia Transportation Research Council – Report 12-R14

[5] **Kwon, O.; Greene, J.; Sholar, G.** *Asphalt Pavement Interlayer Bonding Study*. Florida Department of Transportation, State Materials Office, 2022. Evaluación a escala

real de tasas de aplicación, resistencia interlaminar y desempeño de trackless tack. Florida DOT – Asphalt Pavement Interlayer Bonding Study

[6] **Performance evaluation of modified asphalt based trackless tack coat materials.** Construction and Building Materials, Vol. 165, 2018, pp. 385–394. Investigación experimental sobre resistencia al tracking, corte, adherencia y comportamiento térmico de materiales modificados. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.187. Artículo sobre materiales trackless modificados

[7] **Wilson, B.; Seo, A. Y.; Sakhaeifar, M.** *Performance Evaluation and Specification of Trackless Tack*. Texas A&M Transportation Institute / Texas Department of Transportation. Report FHWA/TX-16/0-6814-1. National Transportation Library – Trackless Tack Study

SOBRE EL AUTOR:

Ingeniero Civil, Magíster en Project Management, especialista en pavimentos y tecnologías asfálticas modernas, consultor y perito en obras de ingeniería. Cuenta con más de 30 años de experiencia en diseño, producción y aplicación de emulsiones asfálticas, micropavimentos, asfaltos modificados y tecnologías de conservación vial y aeroportuaria en Perú y Latinoamérica.



Se viene CONVITRAN 2027

No te quedes sin participar

El evento más importante
del año en infraestructura vial

“Conectando caminos,
impulsando el desarrollo y
construyendo el futuro de la
infraestructura vial.”

ORGANIZA:



SÍGUENOS



COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UNA BTE/MARE CON EMULSIÓN ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS



Ing (MSc) Jorge Luis Yamunaque Miranda

Consultor Senior Especializado en Pavimentos.

RESUMEN:

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros pueden mejorar el desempeño de las BTE o BEE/MARE como capas estructurales, al incrementar la cohesión, adhesividad y resistencia frente a cargas repetidas, humedad y deformaciones permanentes. Sin embargo, estas mejoras deben demostrarse mediante ensayos de desempeño, considerando la composición de la mezcla, compactación, humedad y, especialmente, el curado. En este contexto, un MR de 2,000 - 2,500 MPa puede ser técnicamente sustentable cuando está respaldado por resultados de laboratorio representativos y contrastados con el comportamiento en campo. Por tanto, el polímero potencia el desempeño de la mezcla, pero no garantiza por sí mismo un mayor MR.

En términos generales, la Base Negra con Emulsión es una mezcla usualmente de mayor contenido de ligante, lo que le confiere mayor potencial de cohesión y rigidez. Se diferencia de la BTE o BEE (Base Tratada o Estabilizada con Emulsión)/MARE por la naturaleza, proporción de sus componentes y mecanismo de desarrollo de su capacidad estructural.

Para una BTE/MARE estructural, la emulsión asfáltica modificada con polímeros puede mejorar la cohesión, adhesividad y respuesta ante cargas repetidas, respecto de una emulsión convencional. No obstante, estas ventajas deben demostrarse mediante el diseño y ensayos de desempeño, y no asumirse únicamente por la incorporación del polímero.

La modificación polimérica mejora las



propiedades reológicas y mecánicas del residuo asfáltico, incrementando potencialmente su cohesión, adhesividad y estabilidad viscoelástica frente a variaciones térmicas y cargas repetidas. En una BTE/MARE estructural, estas mejoras favorecen el desarrollo de la resistencia, estabilidad y compatibilidad modular necesarias para transmitir y distribuir eficientemente las cargas hacia las capas subyacentes. Entre los principales beneficios potenciales de una emulsión modificada con polímeros pueden señalarse los siguientes:

► **Mayor cohesión del material:** el residuo asfáltico modificado puede desa-

rollar una unión más resistente entre las partículas de agregado y entre las distintas fracciones que conforman la mezcla. Esto puede favorecer la integridad de la capa y reducir la pérdida de material bajo la acción del tránsito.

► **Mejor adhesividad ligante-agregado:** la modificación puede contribuir a una unión más estable entre el ligante y la superficie mineral, reduciendo la susceptibilidad al desprendimiento y al debilitamiento de la mezcla cuando existe presencia de agua.

► **Mayor resistencia a la deformación permanente:** una adecuada modificación polimérica puede incrementar la

estabilidad del sistema ligante-agregado y reducir su susceptibilidad al flujo o acumulación de deformaciones bajo cargas repetidas, particularmente a temperaturas elevadas.

- **Mejor comportamiento viscoelástico:** el polímero puede modificar la relación entre los componentes elásticos y viscosos de la respuesta del ligante, permitiendo una recuperación parcial de las deformaciones y una menor acumulación de deformación permanente ante sollicitaciones cíclicas.
- **Mayor resistencia al daño por humedad:** cuando la modificación mejora efectivamente la adhesión y cohesión del sistema, puede reducirse la pérdida de resistencia asociada a la acción combinada del agua y las cargas de tránsito. No obstante, esta propiedad debe verificarse mediante ensayos específicos de susceptibilidad a la humedad.
- **Mejor comportamiento frente a la fatiga:** una matriz adecuadamente modificada puede presentar una respuesta más favorable frente a ciclos repetidos de carga, disminuyendo la velocidad de acumulación y propagación del daño. Esta ventaja depende fuertemente de la formulación, contenido de ligante, granulometría, grado de compactación y condición de curado.

“La emulsión asfáltica modificada con polímeros puede mejorar la cohesión, adhesividad, resistencia a la humedad, fatiga y deformación, optimizando el desempeño estructural de la BTE/MARE.

Desde el punto de vista estructural, estas mejoras pueden traducirse en una mayor rigidez y estabilidad de la capa, siempre que la BEE/MARE sea adecuadamente diseñada y procesada conforme a la metodología aplicable (AASHTO R 117-23). En determinadas formulaciones, se han obtenido valores de Módulo Resiliente (MR) del orden de 2,000 - 2,500 MPa, consistentes con rangos estimados mediante retrocálculo a partir de deflexiones medidas en campo. Esta concordancia constituye un elemento de validación del comportamiento mecánico de la mezcla, al permitir contrastar el desempeño obtenido en laboratorio con la respuesta estructural efectiva de la capa construida.

No obstante, debe tenerse especial cuidado al interpretar estos valores. El MR no es una propiedad que dependa exclusivamente del tipo de emulsión, sino que resulta de la interacción de múltiples variables que intervienen en la formación y

evolución de la BTE/MARE. Entre ellas se encuentran la granulometría y naturaleza del agregado, porcentaje y características del material reciclado, contenido y tipo de emulsión, contenido de agua, grado de compactación, características del residuo asfáltico, temperatura, condición de humedad y evolución del curado.

En particular, en una BTE/MARE existe una diferencia importante respecto de una mezcla asfáltica convencional elaborada en caliente: la estructura resistente del material se desarrolla progresivamente durante la consolidación y el curado.

Inicialmente, la mezcla contiene agua asociada al sistema de emulsión, a la humedad de los agregados y a la necesidad de pre-humectación. A medida que ocurre la rotura de la emulsión, se produce la separación de las fases y el establecimiento progresivo de una película de ligante que, junto con la compactación y la pérdida de agua, permite que el material alcance sus propiedades mecánicas.

Por ello, la modificación polimérica no sustituye el proceso de consolidación ni el curado. Un ligante modificado puede proporcionar mejores características al sistema asfáltico, pero si la mezcla presenta una compactación insuficiente, humedad excesiva, drenaje deficiente o un curado incompleto, no necesariamente desarrollará el nivel de resistencia esperado. En

“El desempeño estructural de una BTE/MARE se desarrolla progresivamente con la compactación y el curado; por ello, el MR de diseño debe reflejar condiciones reales de humedad, temperatura y servicio.”

otras palabras, el polímero puede mejorar el potencial de desempeño del ligante, pero dicho potencial debe materializarse mediante una adecuada fabricación, colocación, compactación y evolución del material en obra.

Esta consideración es fundamental para la determinación del MR de diseño, el cual debe representar, en la medida de lo posible, la condición estructural y de servicio prevista para la capa, en correspondencia con su aporte al Número Estructural (SN) requerido del pavimento. Por ello, las probetas de ensayo deben elaborarse y acondicionarse bajo condiciones de compactación, humedad, temperatura y curado representativas de las que razonablemente se desarrollarán en campo, de modo que el MR adoptado constituya un parámetro realista, verificable y técnicamente sustentable para el dimensionamiento estructural.

Asimismo, resulta conveniente distinguir entre un MR obtenido inmediatamente después de la compactación y un MR de-

terminado después de un periodo definido de curado. La diferencia entre ambos valores puede ser significativa y constituye una manifestación del desarrollo progresivo de la estructura interna de la BTE/MARE. En consecuencia, comparar directamente resultados obtenidos bajo diferentes condiciones de curado o humedad puede conducir a conclusiones incorrectas sobre la capacidad estructural del material.

La comparación con resultados de retrocálculo de campo debe realizarse bajo el mismo criterio. El módulo obtenido mediante retrocálculo representa una estimación del comportamiento estructural efectivo del sistema de capas en servicio y no necesariamente coincide de manera directa con el MR de una probeta de laboratorio.

Las diferencias pueden deberse, entre otros factores, al estado de humedad de la estructura, temperatura, grado de consolidación, heterogeneidad de la capa, envejecimiento, interacción con las capas adyacentes y metodología empleada en el retrocálculo. Por ello, una coincidencia del orden de 2,000 - 2,500 MPa constituye un elemento de consistencia o validación, pero no debería interpretarse como una equivalencia absoluta entre ambas magnitudes.

Desde esta perspectiva, no resulta técnicamente válido establecer una relación determinista del tipo “emulsión modificada = mayor MR”. El efecto de la modificación

“La modificación polimérica no garantiza por sí sola un mayor MR; su aporte debe comprobarse mediante mejoras medibles en cohesión, adhesividad, resistencia a la humedad, deformación y cargas repetidas.”

polimérica debe evaluarse comparando, bajo condiciones equivalentes de diseño, compactación, curado, humedad y temperatura, el comportamiento de la mezcla elaborada con emulsión convencional frente al obtenido con emulsión modificada.

La demostración técnica debería orientarse, por tanto, a comprobar que la modificación polimérica produce una mejora cuantificable en las propiedades que gobiernan el comportamiento estructural de la BTE/MARE. Entre ellas se encuentran la cohesión, adhesividad, resistencia a la deformación permanente, susceptibilidad a la humedad, respuesta frente a cargas repetidas, evolución del MR durante el curado y, cuando corresponda al nivel de diseño, resistencia y vida frente a fatiga.

En términos simples, pero técnicamente sustentables, la relación puede expresarse de la siguiente manera: la utilización de una emulsión modificada con polímeros puede mejorar la cohesión, adhesividad y estabilidad del ligante, favoreciendo una mejor

interacción ligante-agregado y, con ello, una mayor resistencia frente a la humedad, las deformaciones permanentes y las cargas repetidas. Estas mejoras, conjuntamente con una adecuada compactación y un proceso de curado apropiado, permiten desarrollar las propiedades mecánicas de la BTE/MARE y obtener un MR representativo de su condición de servicio. En conjunto, estos aspectos proporcionan el respaldo técnico necesario para sustentar la utilización de dicho MR en el diseño estructural. En consecuencia, el empleo de una emulsión modificada con polímeros en una BTE/MARE estructural debe sustentarse en evidencia experimental y no únicamente en las características nominales del ligante. No se trata de asumir que la incorporación de polímeros incrementará automáticamente el MR, sino de demostrar que, para una determinada formulación y bajo condiciones

adecuadas de compactación, humedad y curado, la modificación polimérica permite obtener una mezcla con mayor cohesión y estabilidad, capaz de desarrollar un MR suficientemente alto, estable y reproducible para representar su comportamiento en servicio y sustentar técnicamente su utilización en el diseño estructural.

Por tanto, un valor de MR del orden de 2,000 - 2,500 MPa puede ser técnicamente sustentable para una BTE/MARE cuando se encuentre respaldado por resultados de laboratorio obtenidos bajo condiciones representativas, adecuada repetibilidad de los ensayos y, preferentemente, correlación o contraste con el comportamiento observado en campo. La conclusión debe formularse en términos de desempeño demostrado de la mezcla, y no como una propiedad inherente a cualquier emulsión modificada con polímeros.

EN CONCLUSIÓN, la modificación polimérica potencia el desempeño de la BTE/MARE, pero su capacidad estructural efectiva depende de la interacción entre ligante, mezcla, compactación, curado, condiciones de servicio y compatibilidad modular con las capas subyacentes. Por ello, el MR de diseño debe ser representativo, reproducible y experimentalmente verificable, constituyendo un parámetro técnicamente defendible para el dimensionamiento. Este enfoque sustenta estructuras recicladas y estabilizadas de alto desempeño, orientadas a pavimentos sostenibles y, bajo condiciones debidamente verificadas, con potencial de vida prolongada o perpetua.



Repsol Asfaltos

Construyendo los caminos del Perú

En Repsol, estamos comprometidos con el desarrollo del Perú, construyendo caminos que conectan oportunidades, progreso y bienestar en cada región del país.

Tenemos soluciones innovadoras para seguir impulsando la infraestructura y el crecimiento de un país que no se detiene.

Contamos con variedades de asfalto para cada proyecto

PEN 60/70

PEN 85/100

PEN 120/150

Conoce más
escaneando el QR



SISTEMA TECNOLÓGICO INTEGRADO PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS EN INFRAESTRUCTURA VIAL MEDIANTE ECD, BIM 7D, SIG E INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA ANÁLISIS PREDICTIVO

 **Dr. Ing. Gerber Josafatt Zavala Ascaño**

Especialista en Gestión de Proyectos y Transformación Digital

RESUMEN

La gestión de activos en Infraestructura vial requiere transformar información procedente de diferentes fuentes de evaluación en decisiones coordinadas de mantenimiento, rehabilitación y priorización durante el ciclo de vida de la infraestructura vial. La fragmentación entre inventarios, datos de condición, información espacial y procesos de decisión limita la capacidad de los gestores para establecer estrategias integradas a nivel de red y de proyecto. El presente trabajo desarrolla una arquitectura tecnológica integrada para la gestión de activos en Infraestructura vial, basada en la articulación de evaluaciones superficial, funcional y estructural, información de tránsito, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Modelado de Información para la Construcción

en dimensión 7D (BIM 7D), un Entorno Común de Datos (ECD) y herramientas de Inteligencia Artificial (IA) para análisis predictivo. La metodología integra el Índice de Condición del Pavimento (PCI), el Índice de Regularidad Internacional (IRI), resultados de deflectometría, información de tránsito y procedimientos de sectorización por diferencias acumuladas para establecer tramos homogéneos y unidades de análisis. Estos datos son organizados dentro de un Modelo de Información del Activo (AIM) y vinculados espacialmente para facilitar su trazabilidad, actualización y análisis. La incorporación de modelos de IA permite evaluar escenarios de deterioro y apoyar la determinación del momento y tipo de intervención. El enfoque fortalece la conexión entre la gestión estratégica a

nivel de red y la evaluación técnica a nivel de proyecto, constituyendo una arquitectura de soporte para decisiones basadas en condición, desempeño, trazabilidad y ciclo de vida del activo vial.

Palabras clave: *Gestión de activos viales; BIM 7D; Inteligencia Artificial; Entorno Común de Datos.*

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de activos en Infraestructura vial requiere información técnica confiable, actualizada y estructurada para conocer la condición de la infraestructura, anticipar su evolución y definir oportunamente estrategias de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción. Los sistemas de gestión de la infraestructura vial permiten convertir inventarios, evaluaciones de condición y mediciones de desempeño en insumos para preservar el nivel de servicio de la red vial.

Una limitación relevante de los esquemas de gestión es la fragmentación de la información. Los datos asociados con inventario vial, condición superficial, regularidad, respuesta estructural, tránsito, geometría, drenaje y características de la plataforma pueden generarse mediante procedimientos y fuentes diferentes, dificultando su análisis conjunto y su utilización dentro de un proceso continuo de toma de deci-

siones. Esta situación restringe la capacidad de relacionar el diagnóstico técnico de cada tramo con la priorización de intervenciones, la programación de recursos y el seguimiento del desempeño durante el ciclo de vida del activo.

El problema adquiere especial importancia cuando la gestión debe desarrollarse simultáneamente a nivel de red y de proyecto. A nivel de red se requiere identificar sectores prioritarios, comparar condiciones y establecer políticas de conservación; a nivel de proyecto se necesitan evaluaciones detalladas, sectorización, diagnóstico y selección de soluciones técnicas. La ausencia de una estructura integrada puede generar discontinuidades entre ambas escalas.

La transformación digital permite articular fuentes de información heterogéneas dentro de una arquitectura común. Los SIG aportan la dimensión espacial; BIM y el AIM estructuran información asociada con el ciclo de vida; el ECD facilita la organización, trazabilidad y disponibilidad de la información; y la IA puede apoyar el análisis de series históricas y escenarios de deterioro. Integradas con PCI, IRI, deflextometría, tránsito y sectorización, estas tecnologías permiten vincular el monitoreo del activo con la decisión de gestión.

En este marco, el objetivo del trabajo es desarrollar y describir una arquitectura tecnológica integrada para la gestión de

activos en Infraestructura vial, articulando inventario, evaluaciones superficial, funcional y estructural, tránsito, sectorización, SIG, BIM 7D, ECD e IA para análisis predictivo, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones de mantenimiento, rehabilitación y priorización a nivel de red y de proyecto.

2. METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DEL PAVIMENTO

La metodología se estructura como un proceso secuencial de recopilación, evaluación, transformación e integración de información destinado a convertir datos proveniente de análisis y, posteriormente, en insumos para la toma de decisiones. El proceso considera inventario vial, tránsito,

condición superficial, desempeño funcional y respuesta estructural, complementados con procedimientos de sectorización y representación georreferenciada.

2.1. Caracterización e inventario del activo vial

La primera etapa comprende la identificación y organización de los componentes físicos del activo. El inventario considera geometría, drenaje, estructura del pavimento y plataforma, incluyendo longitudes y anchos de calzada, pendientes, características de capas, obras de drenaje y propiedades del soporte. Esta información constituye la referencia física sobre la cual se incorporan las evaluaciones periódicas y permite asociar registros con tramos, sectores, carriles y unidades de análisis.

Figura 1. Integración de la representación del activo y su información técnica dentro del Modelo de Información del Activo: (a) representación digital de la infraestructura y (b) inventario georreferenciado con atributos asociados.



2.2. Evaluación de condición y desempeño

La caracterización del pavimento integra cuatro dimensiones: evaluación superficial mediante PCI, evaluación funcional mediante IRI, evaluación estructural mediante deflectometría y tránsito como variable de demanda. Cada indicador representa una dimensión diferente del comportamiento: el PCI caracteriza deterioros superficiales; el IRI aporta información sobre regularidad; la deflectometría permite analizar la respuesta estructural; y el tránsito representa las solicitaciones acumuladas. Su utilización conjunta per-

“La integración del inventario vial, tránsito e indicadores PCI, IRI y deflectometría permite obtener un diagnóstico integral del pavimento, optimizando la evaluación de su condición superficial, funcional y estructural para una gestión eficiente y una toma de decisiones fundamentada”.

mite construir un diagnóstico más completo que el obtenido mediante indicadores aislados.

Tabla 1. Información principal y función dentro del sistema de gestión

Dimensión	Dato o indicador	Función en la gestión
Inventario	Geometría, drenaje, estructura y plataforma	Caracterización y localización del activo
Superficial	PCI	Identificación y clasificación de deterioros
Funcional	IRI	Evaluación de regularidad y desempeño funcional
Estructural	Deflectometría / FWD	Análisis de respuesta y capacidad estructural
Demanda	Tránsito y ejes equivalentes	Representación de solicitaciones sobre el pavimento
Espacial	SIG	Vinculación georreferenciada de condición e inventario
Temporal	Historial y modelos de IA	Análisis de evolución y escenarios de intervención

Figura 2. Resultados PCI



Figura 3. Evaluación estructural / FWD

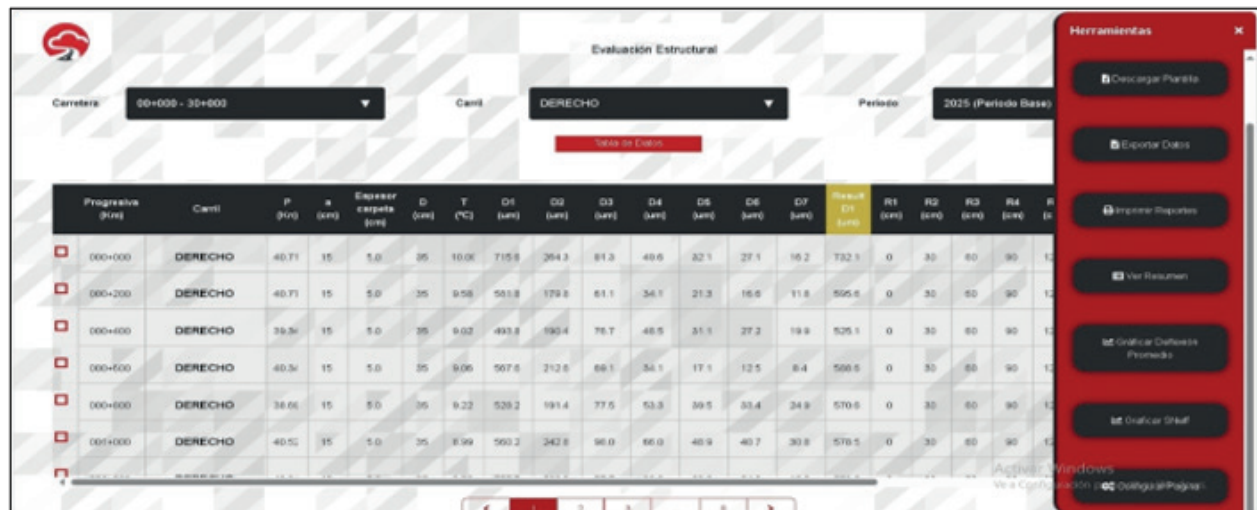
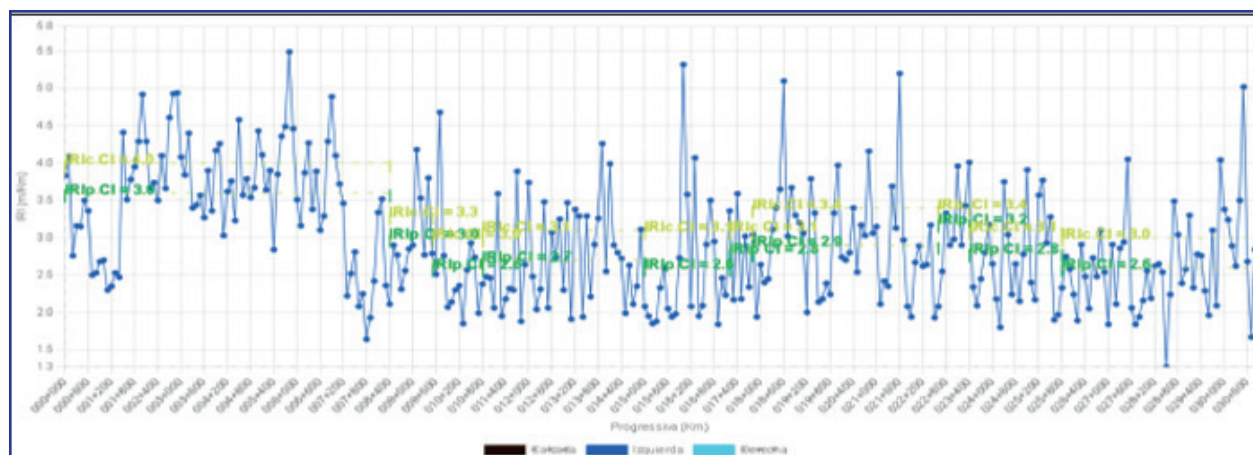


Figura 4. Evaluación del IRI



2.3. Sectorización y unidades homogéneas

Una vez integrados los indicadores de condición, se aplica sectorización por diferencias acumuladas para identificar segmentos con comportamiento relativamente homogéneo. El análisis puede organizarse por tramo, carril y unidades de muestra. La sectorización transforma mediciones longitudinales en unidades de gestión y permite evitar decisiones uniformes sobre longitudes que presentan variaciones significativas. El flujo metodológico se resume en la secuencia: medición → indicador → sectorización → sector homogéneo → diagnóstico → estrategia de intervención. **(Ver Figura 5)**

2.4. Integración espacial

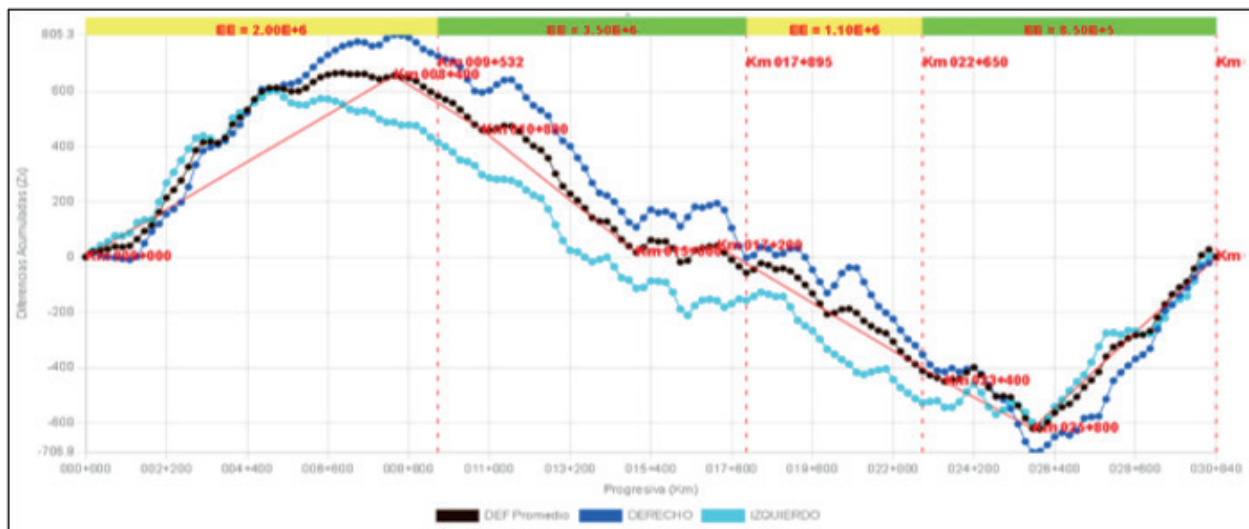
Los sectores homogéneos y sus indicadores se vinculan a la localización mediante SIG. La representación georreferenciada

permite visualizar la distribución espacial de la condición, relacionar resultados con los componentes del inventario y establecer correspondencia entre datos técnicos y activo físico. En este enfoque, el SIG no se limita a producir mapas: constituye la referencia espacial que integra información de diferentes campañas y fuentes asociadas a un mismo sector vial.

3. ARQUITECTURA TECNOLÓGICA PARA LA GESTIÓN DE ACTIVOS

La metodología anterior genera información de múltiples fuentes y escalas. Para utilizarla de manera continua se propone una arquitectura formada por SIG, AIM/BIM 7D, ECD e IA aplicada al análisis predictivo. Cada componente cumple una función distinta y complementaria dentro del ciclo de gestión.

Figura 5. Sectorización de tramos homogéneos mediante el método de diferencias acumuladas aplicado a indicadores de condición del pavimento



3.1. Entorno Común de Datos

El ECD constituye el núcleo de integración de información. Su función es organizar y mantener disponibles inventarios, registros de evaluación, indicadores de condición, resultados de análisis, antecedentes de intervención y documentos asociados. Bajo principios de gestión de información de la serie ISO 19650, el ECD favorece la continuidad entre campañas de evaluación y etapas del ciclo de vida, evitando que cada estudio genere una base aislada sin trazabilidad con el activo.

3.2. Modelo de Información del Activo y BIM 7D

La información consolidada se organiza dentro de un Modelo de Información del Activo (AIM), orientado a representar

el activo durante operación y mantenimiento. BIM 7D se emplea como estructura para relacionar elementos físicos del pavimento y la infraestructura vial con información técnica, historial de condición, intervenciones realizadas y necesidades futuras. El valor de esta estructura reside en que cada evaluación pasa a formar parte de una secuencia histórica del activo, y no únicamente de una fotografía de condición correspondiente a una fecha determinada. (Ver Figura 6 y 7)

3.3. Integración SIG–AIM–ECD

La integración puede interpretarse mediante tres preguntas básicas: el SIG responde dónde se encuentra el activo o problema; el AIM/BIM organiza qué información técnica e histórica posee; y el

Figura 6. Modelo tridimensional del activo / acceso al AIM.



Figura 7. Inventario georreferenciado + ficha de activo.



ECD establece dónde y cómo se gestiona la información vigente que sustenta la decisión. La combinación permite relacionar ubicación, características físicas, indicadores de condición, antecedentes y necesidades de intervención dentro de una estructura común.

3.4. Inteligencia Artificial para análisis predictivo

Sobre la información consolidada se incorpora una capa de análisis predictivo. Los modelos de IA pueden analizar variables como PCI, IRI, deflexiones, tránsito e historial de intervenciones para apoyar la evaluación de escenarios de deterioro y del momento de intervención. Su función es complementar el diagnóstico de condición y no sustituir el criterio de ingeniería. Conceptualmente, el proceso relaciona estado actual + comportamiento histórico + demanda → escenario futuro → soporte para la decisión.

4. GESTIÓN A NIVEL DE RED Y DE PROYECTO

La gestión de activos en pavimentos requiere operar en dos escalas complementarias. A nivel de red las decisiones se orientan a comparar activos, establecer prioridades, distribuir recursos y estructurar programas de conservación. A nivel de proyecto se analiza con mayor detalle la condición de sectores específicos para

“La integración de SIG, AIM/BIM 7D, ECD e inteligencia artificial permite centralizar información técnica e histórica, garantizar la trazabilidad de las evaluaciones y fortalecer la gestión eficiente de activos viales durante todo su ciclo de vida.”.

determinar necesidades de intervención y seleccionar soluciones técnicas. La eficiencia del sistema depende de la capacidad de conectar ambos niveles mediante una estructura común de información.

4.1. Gestión a nivel de red

La gestión a nivel de red constituye la dimensión estratégica. Inicia con la caracterización de los tramos y la organización del inventario, a la que se incorporan indicadores de condición superficial, desempeño funcional, respuesta estructural, tránsito e historial de intervenciones. La representación georreferenciada facilita la comparación de tramos y la identificación espacial de sectores que requieren mayor atención. El resultado es una jerarquización de necesidades, no el diseño definitivo de una solución. (Ver Figura 8)

Figura 8. Integración de indicadores para la evaluación de la condición y desempeño del pavimento: (a) PCI, (b) respuesta estructural mediante FWD y (c) IRI.

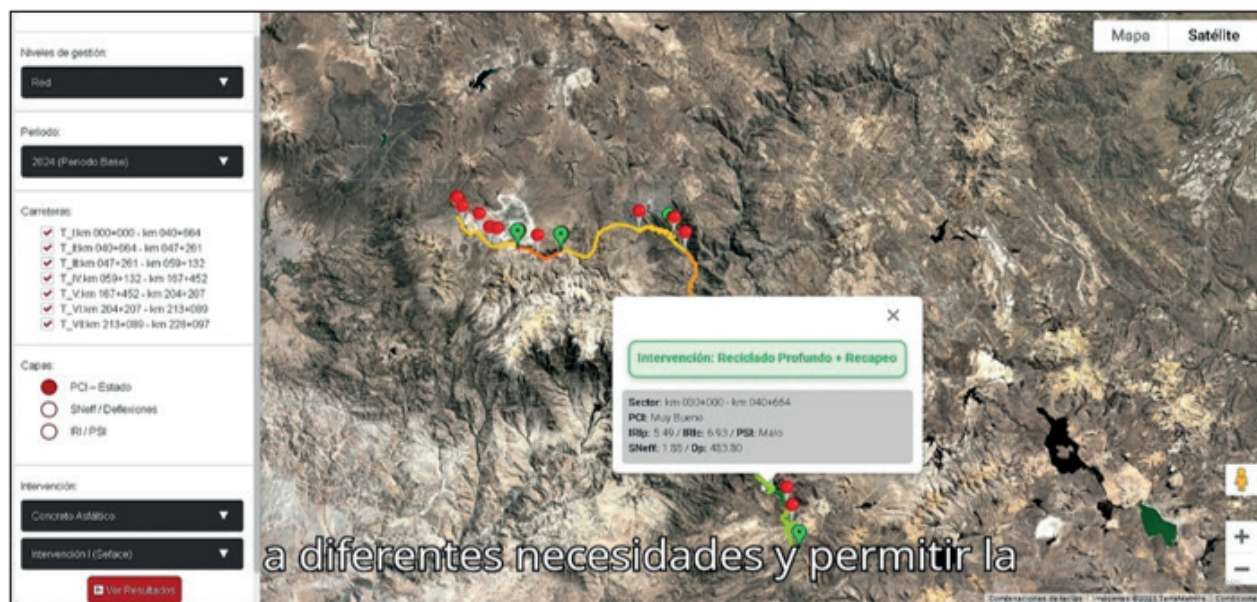


Tabla 2. Diferenciación e integración entre gestión a nivel de red y de proyecto

Componente	Nivel de red	Nivel de proyecto
Objetivo	Priorizar necesidades y programar intervenciones	Definir diagnóstico y solución técnica
Unidad de análisis	Red y tramos	Sectores, carriles y unidades de muestra
Información	Inventario e indicadores consolidados	Datos detallados de condición y desempeño
Tipo de decisión	Estratégica / multianual	Técnica / operativa
Resultado	Programa priorizado	Tratamiento o intervención
Retroalimentación	Actualiza prioridades de la red	Genera nuevos datos de desempeño

4.2. Gestión a nivel de proyecto

Una vez identificado un tramo prioritario, la gestión se traslada al nivel de proyecto. En esta escala se requiere caracterización detallada mediante tránsito, PCI, IRI, deflectometría, sectorización y análisis por carriles o unidades de muestra. Este nivel permite reconocer variaciones internas que pueden quedar ocultas en indicadores agregados y definir tratamientos diferenciados en función de la condición real de cada sector. (Ver Tabla 2)

4.3. Sectorización como vínculo entre priorización e intervención

La sectorización cumple una función crítica en la transición entre ambas escalas. Un

tramo puede ser priorizado mediante indicadores consolidados a nivel de red, pero el análisis detallado puede revelar sectores con comportamientos distintos. La secuencia tramo priorizado → evaluación detallada → sectorización → diagnóstico por sector → tratamiento diferenciado evita aplicar soluciones uniformes donde la variabilidad del pavimento exige respuestas específicas. La integración se completa mediante retroalimentación: después de la intervención, la nueva información de condición se incorpora al ECD y actualiza el AIM, de modo que el desempeño observado vuelva a formar parte de la evaluación de red. Se establece así un ciclo continuo red → proyecto → intervención → seguimiento → red. (Ver Figura 9)

Figura 9. Representación georreferenciada de la condición del pavimento y de las necesidades de intervención para la gestión a nivel de red.



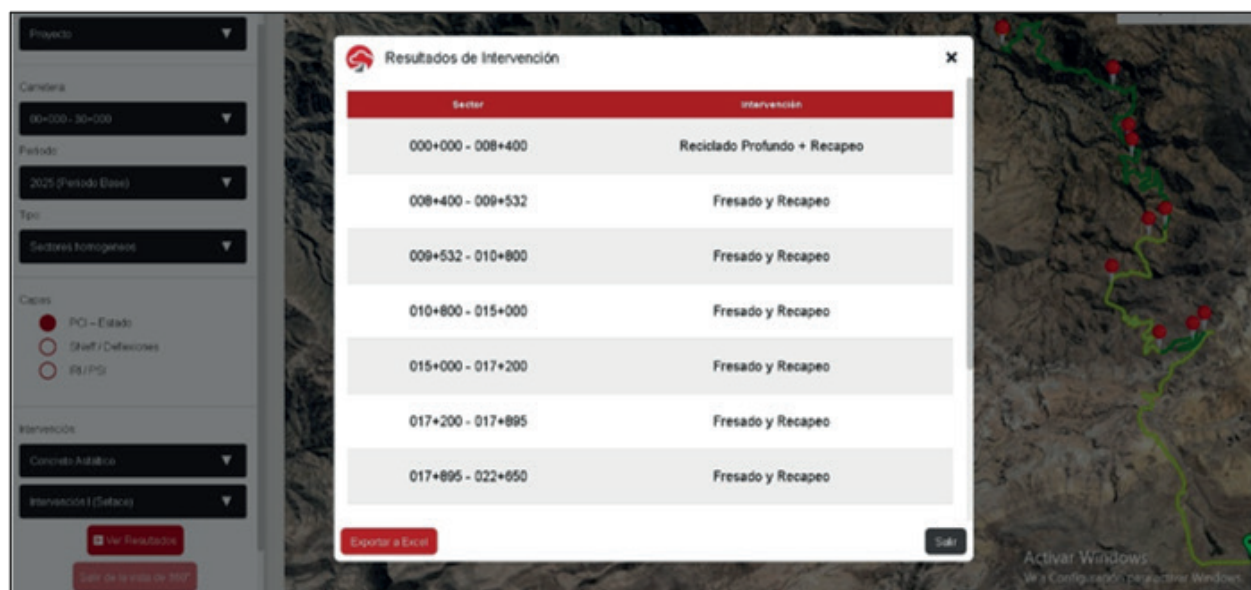
5. PLANIFICACIÓN DE INTERVENCIONES Y ANÁLISIS PREDICTIVO

La planificación de intervenciones es la etapa en la cual la información obtenida mediante monitoreo y evaluación se transforma en alternativas de mantenimiento o rehabilitación. La decisión debe considerar condición actual, desempeño, demanda de tránsito, variabilidad espacial de los indicadores, historial del activo y evolución esperada. El enfoque integra PCI, IRI, deflectometría, tránsito y sectorización con procedimientos de decisión y modelos de IA para apoyar la selección y priorización de estrategias.

5.1. Selección de estrategias

Las intervenciones pueden organizarse conceptualmente en conservación preventiva, mantenimiento o recuperación superficial y rehabilitación. La selección debe realizarse según la condición superficial, funcional y estructural del sector, además de la demanda de tránsito y antecedentes del activo. Los umbrales específicos deben definirse según los criterios técnicos adoptados para cada red o proyecto; por ello, el presente trabajo no establece valores universales de intervención. (Ver **Figura 10**)

Tabla 10. Asignación de estrategias de mantenimiento y rehabilitación en función del diagnóstico de sectores homogéneos del pavimento.



5.2. Componente predictivo

La conservación de información histórica permite incorporar la dimensión temporal. En lugar de responder únicamente cuál es el estado actual del pavimento, el sistema puede apoyar la evaluación de cómo podría evolucionar su condición y en qué momento conviene revisar una intervención. Esta capacidad favorece la transición desde una gestión predominantemente reactiva hacia una gestión preventiva y con componente predictivo.

5.3. Priorización bajo recursos limitados

A nivel de red, múltiples activos compiten por recursos limitados. Por ello, la necesidad técnica no constituye automáticamente la prioridad final. La priorización debe considerar conjuntamente condición, desempeño, tránsito, localización, historial, evolución esperada y restricciones presupuestarias. La arquitectura propuesta no reemplaza el proceso institucional de asignación de recursos, pero proporciona una base técnica trazable para comparar necesidades y sustentar decisiones.

6. DISCUSIÓN: INCIDENCIA EN LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS VIALES

La principal contribución del enfoque propuesto no reside en digitalizar de forma independiente procesos existentes, sino en establecer relaciones entre información

“La integración de indicadores técnicos, información histórica y herramientas digitales permite anticipar el deterioro del pavimento, priorizar intervenciones y optimizar recursos, impulsando una gestión vial preventiva, eficiente y fundamentada en decisiones técnicas.”.

que puede encontrarse distribuida entre diferentes evaluaciones, bases de datos y etapas de gestión. La integración de inventario, PCI, IRI, respuesta estructural, tránsito, sectorización, SIG, AIM, ECD e IA configura una cadena continua entre observación del activo y decisión.

6.1. De indicadores independientes a un diagnóstico integrado

PCI, IRI y deflectometría representan dimensiones diferentes del comportamiento del pavimento. Analizados por separado proporcionan información parcial; integrados dentro de una misma unidad espacial y temporal permiten una caracterización más completa. El cambio conceptual consiste en pasar de bases de datos de auscultación a unidades de información asociadas con decisiones de mantenimiento y rehabilitación.

6.2. De tramos generales a unidades homogéneas de gestión

La sectorización permite reconocer que la condición de un tramo no necesariamente es uniforme. El análisis por sectores homogéneos, carriles y unidades de muestra posibilita decisiones diferenciadas y evita generalizar un tratamiento sobre longitudes con respuestas distintas. Así, una red puede priorizarse por tramos, pero la intervención se define con mayor detalle por sectores.

6.3. De información dispersa a trazabilidad durante el ciclo de vida

El AIM y el ECD permiten que una evaluación deje de ser un producto aislado y pase a formar parte de la historia del activo. La secuencia evaluación → decisión → intervención → seguimiento → nueva evaluación genera progresivamente información para comprender el comportamiento del pavimento y revisar futuras decisiones. Esta trazabilidad constituye una condición clave para vincular gestión de red y de proyecto.

6.4. De gestión reactiva a gestión con capacidad predictiva

El análisis de información histórica mediante modelos de IA añade una dimensión temporal al sistema. La finalidad es apoyar

“La integración de PCI, IRI y deflectometría permite diagnósticos más completos del pavimento, facilitando decisiones precisas de mantenimiento y rehabilitación vial”.

“La trazabilidad de información histórica y el análisis predictivo mediante inteligencia artificial permiten anticipar intervenciones y fortalecer la gestión preventiva de activos viales”.

la comparación de escenarios y anticipar la necesidad de revisar una intervención antes de alcanzar estados críticos.

6.5. Aplicabilidad

La arquitectura es aplicable conceptualmente a organismos responsables de redes viales, concesionarias, equipos de conservación, supervisión y unidades de planificación que requieran integrar inventario, evaluaciones de condición, localización espacial y procesos de priorización. Su valor reside en estructurar una misma base de información para decisiones estratégicas y técnicas, manteniendo trazabilidad entre ambas escalas.

CONCLUSIONES

- La integración de inventario, tránsito, condición superficial, desempeño funcional y respuesta estructural dentro de una misma arquitectura permite transformar datos de auscultación en insumos de un proceso continuo de gestión del activo. PCI, IRI y deflectometría aportan dimensiones complementarias que adquieren mayor utilidad cuando se analizan conjuntamente y se vinculan con unidades espaciales de gestión.
- La sectorización por diferencias acumuladas articula evaluación y decisión al transformar mediciones longitudinales en sectores homogéneos susceptibles de diagnósticos e intervenciones diferenciadas. Esto reduce el riesgo de adoptar soluciones uniformes sobre tramos con variaciones significativas entre sectores o carriles.
- La integración de SIG, BIM 7D, AIM y ECD permite asociar la condición del pavimento con ubicación, características físicas, historial de evaluaciones e intervenciones y documentación técnica. Esta estructura favorece la trazabilidad y continuidad de la información durante el ciclo de vida.
- La principal incidencia sobre los sistemas de gestión de activos viales radica en conectar la gestión a nivel de red con

“La integración de indicadores técnicos y herramientas digitales permite optimizar diagnósticos, priorizar intervenciones y fortalecer la gestión de pavimentos”.

“La transformación digital convierte datos técnicos en decisiones estratégicas, garantizando trazabilidad, eficiencia y continuidad en la gestión de activos viales”.

la gestión a nivel de proyecto. La primera prioriza necesidades y estructura programas; la segunda realiza diagnóstico detallado y define intervenciones. La retroalimentación posterior actualiza el conocimiento de la red.

- La incorporación de IA aplicada al análisis predictivo añade una dimensión temporal y puede apoyar la evaluación de escenarios de deterioro y del momento de intervención. Su función es complementar el diagnóstico y el criterio de ingeniería, no sustituirlos.
- La arquitectura proporciona una base para que la priorización considere simultáneamente condición, desempeño, localización, demanda, historial,

evolución esperada y restricciones presupuestarias. Su aporte se concentra en fortalecer el soporte técnico y la trazabilidad de las decisiones cuando distintos activos compiten por recursos limitados.

- La transformación digital de la gestión de la infraestructura vial debe entenderse como la construcción de una arquitectura integrada de información y toma de decisiones orientada al ciclo de vida. El aporte central consiste en convertir datos de evaluación en información trazable y esta, a su vez, en decisiones de priorización, mantenimiento, rehabilitación y seguimiento dentro de un sistema de gestión de activos viales.

REFERENCIAS

1. International Organization for Standardization (ISO). (2024). ISO 55000:2024. Asset management — Vocabulary, overview and principles. 2nd ed. Geneva, Switzerland: ISO.
2. World Road Association (PIARC). (2019). Road Asset Management Manual. Paris, France: PIARC.
3. International Organization for Standardization (ISO). (2018). ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles. Geneva, Switzerland: ISO.
4. International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 3: Operational phase of the assets. Geneva, Switzerland: ISO.
5. ASTM International. (2024). ASTM D6433-24. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
6. ASTM International. (2025). ASTM D4694-09(2025). Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International. DOI: 10.1520/D4694-09R25.
7. Sayers, M. W., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. A. V. (1986). The International Road Roughness Experiment: Establishing correlation and a calibration standard for measurements. World Bank Technical Paper No. 45. Washington, DC, USA: The World Bank.

