

# Estudio de la condición funcional y diagnóstico condición estructural de pavimentos a nivel de proyecto: Parte 1

Guillermo THENOUX<sup>a</sup> y Paul GARNICA<sup>b,1</sup>

<sup>a</sup>Director THX Ingeniería

<sup>b</sup>Instituto Mexicano de Transporte

**Resumen.** Un programa de gestión de mantenimiento de pavimentos se puede llevar a cabo a nivel de red y/o a nivel de proyecto. Se realiza a nivel de red para cuando el objetivo es la optimización y asignación de recursos y se realiza a nivel de proyecto cuando el objetivo es garantizar que las acciones de conservación o rehabilitación que se asignen sean estratégica e ingenierilmente las correctas para asegurar que el proyecto alcance su vida de diseño. La gestión de mantenimiento de pavimentos a nivel de proyecto no solo tiene como objetivo mantener los umbrales funcionales sobre los valores especificados en el proyecto sino que y por sobre todo, mantener la integridad física del paquete estructural, que en definitiva es esto último lo que garantizará el cumplimiento de la vida útil de un pavimento. Con el advenimiento de muchas técnicas de alto rendimiento de medición de pavimentos se ha ido poniendo mayor énfasis en el monitoreo y cumplimiento de los umbrales funcionales y se ha dejado de hacer lo que los autores denominan, “gestión de ingeniería de mantenimiento” que es lo que se requiere para realizar un diagnóstico de ingeniería definir las acciones de mantenimiento que realmente garanticen el cumplimiento de la vida útil de un pavimento. El presente trabajo corresponde al primero de dos trabajos orientado a reestablecer la importancia de la ingeniería que se debe realizar en la gestión de mantenimiento de pavimento a nivel de proyecto. Este primer trabajo tiene por objetivo establecer los alcances de algunos conceptos que permitirán comprender mejor la segunda parte del presente estudio en la cual se desarrollará con mayor detalle la metodología de diagnóstico estructural, la asignación de una acción de rehabilitación estructural y su diseño. Esta primera parte del estudio ha sido redactada más como un apunte conceptual de estudio para estudiantes basado en la experiencia de los autores y no como un trabajo que reporta resultados de una investigación.

**Palabras Clave.** Pavement functional condition, pavement structural condition, pavement maintenance, pavement rehabilitation.

## 1. Introducción: Gestión a nivel de red y nivel de proyecto

Un programa de gestión de mantenimiento de pavimentos se puede llevar a cabo a nivel de red y/o a nivel de proyecto. Se realiza a nivel de red para cuando el objetivo es la optimización y asignación de recursos y se realiza a nivel de proyecto cuando el objetivo es asegurar que las acciones de conservación o rehabilitación que se asignen sean estratégica e ingenierilmente las correctas.

---

<sup>1</sup> Corresponding Author; E-mail: paul.garnica@gmail.com.

La gestión de mantenimiento a nivel de red, se enfoca en recolectar gran cantidad de datos y obtener promedios matemáticos y contrastar resultados con umbrales de condición funcional. Independientemente, si además con los datos, se desarrollan modelos predictivos de deterioro, pocas veces se exige o se incluye en los informes de gestión de mantenimiento a nivel de red, estudio de diagnóstico de ingeniería.

La gestión de mantenimiento de pavimentos a nivel de proyecto no solo tiene como objetivo mantener los umbrales funcionales sobre los valores especificados en el proyecto sino que por sobre todo, mantener la integridad física del paquete estructural, que en definitiva es esto último lo que garantizará el cumplimiento de la vida útil de un pavimento. La gestión de mantenimiento de la condición funcional y condición estructural de un pavimento a nivel de proyecto requiere de un enfoque conceptual diferente al enfoque de gestión a nivel de red.

En la actualidad se observa que cuando se realiza gestión a nivel de proyecto se ha ido poniendo mayor énfasis en el monitoreo y cumplimiento de los umbrales funcionales. Esto se debe en parte, al advenimiento de técnicas de monitoreo capaces de recolectar gran cantidad de datos que de una u otra forma terminan por distraer la atención de las causas que están produciendo el deterioro estructural.

El objetivo de este trabajo en su "Parte 1" no es re-definir términos utilizados en la gestión de pavimentos pero si poner en contexto del presente estudio el alcance de los conceptos y términos que se van a utilizar específicamente en este paper. El alcance que tienen algunos términos utilizados en esta área de la ingeniería de pavimentos en muchas ocasiones se encuentra definido en alguna normativa o manual y esto impide a muchos ingenieros ampliar una discusión conceptual. La discusión que se propone en el presente trabajo no tiene como objetivo discutir la semántica de los términos sino más bien el enfoque de ingeniería que se le dará en el presente trabajo.

Para efecto del presente trabajo, la palabra mantenimiento aplicado a la gestión de pavimento engloba dos términos:

- Conservación → asociado al mantenimiento de la condición funcional.
- Rehabilitación → asociado al mantenimiento condición estructural.

Se ocupa la palabra mantenimiento principalmente debido a que en el idioma Inglés se utiliza Maintenance para englobar todas las acciones conservación y reparación. También, en la práctica existe un tercer término asociado al mantenimiento el cual es "Reparación" el cual, un poco por obviedad, no se discute en el trabajo.

## **2. Alcance conceptos condición funcional y condición estructural de pavimentos**

En la presente sección se revisará a nivel conceptual los conceptos de Condición Funcional y Condición Estructural aplicados a pavimentos.

Las exigencias asociadas a la condición y estado de un pavimento han evolucionado en el tiempo y estas son más específicas y exigentes en la medida que los requerimientos exigidos a los proyectos viales han ido en aumento. En la actualidad se recomienda distinguir por separado los requerimientos de la Condición Funcional y Condición Estructural de un pavimento a la hora de diseñar y mantener un pavimento, debido a que no necesariamente se relacionan una con otra, como lo lleva implícito, por ejemplo, el método AASHTO 93 a través de su umbral de diseño PSI (Índice de Serviciabilidad Presente). En buena medida también el método MEPDG mezcla requerimientos funcionales con estructurales. El diseño estructural de pavimento debería ser conceptualmente similar al de una estructura como puente, edificio u otra estructura, en

donde se resuelve el diseño estructural en base a tensiones y deformaciones y los problemas funcionales según el objetivo y requerimientos funcionales de la estructura.

Se entiende por condición o calidad funcional de un pavimento los aspectos relacionados con la calidad operacional que ofrece un pavimento desde el punto de vista las características superficiales de la capa de rodadura. A medida que evolucionan y aumentan las exigencias de operación de las vías, se ha ido aumentando la lista de requerimientos (u objetivos) funcionales para el pavimento. Los principales requerimientos funcionales para un pavimento responden a objetivos operacionales que debe cumplir un proyecto vial. En particular una estructura de pavimento además de garantizar capacidad estructural, deberá cumplir con los siguientes objetivos funcionales:

- Confort de conducción del usuario.
- Costo operacional de vehículos pesados y livianos.
- Seguridad.
- Impacto ambiental.

La exigencia o el nivel de exigencia de cada uno de estos requerimientos dependerán del tipo e importancia de la carretera siendo en la actualidad, las autopistas urbanas las que podrían demandar las mayores exigencias y los caminos de Bajo Volumen de Tránsito (BVT), las menores exigencias.

La Tabla 1, presenta una relación entre los requerimientos funcionales de un pavimento y los parámetros de medida que se utilizan en el presente. En las últimas 4 décadas ha habido un desarrollo importante de equipos para auscultación de pavimentos lo cual ha permitido mejorar los rendimientos de levantamiento de dato. No obstante lo anterior, se comienza a presenta en muchos informes de gestión una situación en donde “los arboles no dejan ver el bosque” debido a la inmensa cantidad de datos que se pueden auscultar. Para cuando se trata de una gestión de pavimento a nivel de red los programas computacionales pueden realizar el trabajo de transformar los datos en información útil para decisiones “macro” sin embargo, para una gestión de nivel de proyecto, la asignación de una acción de mantenimiento requiere además de estudios y análisis de ingeniería.

**Tabla 1.** Objetivos funcionales versus parámetros funcionales.

Objetivos Funcionales	Parametros Medición Condición Funcional					
	IRI	Fricción	Ruido	Splash and Spray	Ahuellamiento o Deformación	Apariencia
Confort Usuario Vehículo	+++	+++	+	++	++	+
Costo Operacional Vehículos	+++					
Seguridad Vial		+++		+++	+++	++
Impacto Ambiental.			+++			

Nota 1: Los indicadores de importancia de cada parámetro representan la visión de los autores y pueden modificarse parcialmente atendiendo a otras experiencias y proyectos.

Nota 2. Se suele incorporar también la medición de porcentaje de grietas como un parámetro asociado a condición funcional pero, en términos prácticos las grietas no evalúan un objetivo funcional específico.

Para cuando se trate de monitoreo a nivel de red, la asignación de una acción de conservación para restaurar un parámetro de condición funcional debe tener en consideración los resultados de la evaluación de la condición estructural de un pavimento. Es posible, que a partir de la primera mitad de la vida útil de una estructura de pavimento se requiera planificar algún tipo de rehabilitación estructural por lo cual la oportunidad de una acción de conservación debe considerar necesariamente la evolución de la pérdida

de la capacidad estructural para optimizar las actuaciones de conservación con las actuaciones de rehabilitación.

A continuación se presenta un resumen con una breve discusión conceptual de los diferentes parámetros de medición, asociado a los requerimientos funcionales de una estructura de pavimento (en este trabajo solo se discute IRI y fricción por límite de extensión de la publicación).

*Índice de Regularidad Superficial (IRI):* El IRI es utilizado principalmente para: evaluar el confort de conducción (se asemeja conceptualmente al PSI de AASHTO [1] y en particular a la componente SV (Slope Variance)). Igualmente se utiliza para evaluar los costos de operación (junto con las características geométricas y la localización geográfica de una vía, el IRI es uno de los principales factores que afecta los costos de operación de los vehículos en carreteras con velocidades medias superiores a 60 km/h) [2]. El costo de operación puede llegar a crecer a una tasa del 2 al 4% por unidad de rugosidad IRI, aumentando significativamente más para valores de IRI superiores a 6 – 8 m/km.

El IRI de un pavimento no solo tiene una estrecha relación con los costos operacionales de un vehículo sino que además puede tener una incidencia significativa en la evolución futura del deterioro estructural de un pavimento. Existen dos tesis independientes, respecto de la relación entre IRI y evolución del deterioro. La primera tesis relaciona el aumento en la tasa de deterioro de un pavimento que presenta un mayor IRI, con la carga dinámica que sufre la estructura debido a la mayor irregularidad superficial; esta tesis ha sido demostrada principalmente en pavimentos de hormigón que experimentan escalonamiento o alabeo. La segunda tesis, establece una relación directa entre la calidad constructiva general de un pavimento y su IRI inicial. Esta última tesis se aplica principalmente tanto a pavimentos asfálticos como de hormigón en donde, a mejor IRI de terminación constructiva, significa menor variabilidad en el proceso de construcción y por ende mayor probabilidad de durabilidad del pavimento. Esta última tesis no aplica en aquellos proyectos que luego de terminado son cepillados para alcanzar el IRI requerido por las especificaciones. En este caso es posible que luego del cepillado, se cumpla el IRI pero seguramente detrás, habrá falencias constructivas que se manifestaran a mediano plazo cuando el pavimento se encuentre en servicio).

*Fricción Superficial (Resistencia al Deslizamiento):* La resistencia al deslizamiento (fricción) que presenta la carpeta de rodado de un pavimento está determinada por micro y macro textura. La presencia de una superficie lisa sin micro y macro textura (principalmente sin micro-textura) produce deslizamiento por un efecto conocido como “visco-planeo” (no “hidro-planeo”) lo cual reduce a un valor nulo la fricción.

Eventualmente puede ocurrir pérdida de la resistencia a la fricción, al producirse una deformación longitudinal en la huella del carril (“ahuellamiento” mezcla asfáltica o deformación resiliente de materiales granulares). Este último efecto puede dar origen a la acumulación de agua y producir efecto de “hidro-planeo” el cual, en este último caso, se pierde resistencia a la fricción más bien a alta velocidad que al momento de frenado. Hidroplaneo es una de las principales razones por la cuales se debe limitar el “ahuellamiento” y/o deformación permanente, de la sección transversal de un pavimento; el aspecto estructural es importante pero desde el punto de vista funcional, es secundario.

El método de diseño geométrico AASHTO asume un coeficiente de fricción longitudinal mínimo para el cálculo de la distancia de frenado y un coeficiente de fricción transversal mínimo para el cálculo del radio de curvatura horizontal y peralte. Existen una serie de equipos desarrollados en importantes centros de investigación, para medir diferentes tipos de índices de fricción o índice de rozamiento pero, estos no se relacionan

entre sí debido a las diversas formas en que se realiza la medición y la dificultad propia de este tipo de medición en particular. No obstante, en opinión del autor, el mayor problema radica en que ningún equipo puede medir directamente los parámetros de fricción (longitudinal y transversal) utilizados por el método de diseño AASHTO y este sigue siendo un problema no-resuelto ingenierilmente.

Aun cuando existan dificultades no resueltas para poder definir y medir la fricción de los parámetros de diseño geométrico, esta condición funcional debe ser correctamente administrada en proyectos viales. Idealmente se debe auscultar los tramos de carretera en diferentes estaciones y poner énfasis en segmentos críticos del trazado. Ejemplo de segmentos críticos podrían ser: aproximación a semáforos, aproximación a pasos peatonales, pistas de desaceleración, ramales de enlaces, curvas verticales y horizontales, y en general en donde la diferencia entre la velocidad de diseño entre dos tramos consecutivos (con diferente velocidad de diseño) sea mayor a 20 - 40 km/h (dependiendo de la pendiente y otros factores de la sección transversal) [3].

### 3. Diagnóstico condición estructural

Se entiende por condición estructural al nivel de integridad física y mecánica en que se encuentra la sección de una estructura de pavimento en su conjunto y al estado de cada una de las capas que conforman la estructura, incluyendo la subrasante.

El diagnóstico de la condición estructural de un pavimento tiene como objetivo explicar las causas de la patología y sintomatología de las fallas que presenta un pavimento y se realiza sobre la base de mediciones de terreno y evaluación visual de experto. Las mediciones de terreno permiten contar con los datos para comprender las patologías y sintomatología (patrón como se presentan las fallas).

El diagnóstico debe ser realizado por un ingeniero con experiencia en materiales y diseño estructural y no se recomienda que sea de otra forma; por ejemplo el uso de catálogos de fallas no permite realizar un diagnóstico acertado si el profesional no es experto y al mismo tiempo si el profesional es experto no requiere de un catálogo de fallas. En general, un catálogo de fallas servirá para realizar monografías más detalladas del estado del pavimento en diferentes periodos de su vida útil pero no para llevar a cabo un diagnóstico de la condición estructural.

Basado en las hipótesis tradicionales de diseño de estructuras, los criterios generales de falla estructural de un material son: deformación y agrietamiento por tensiones inducidas por las cargas de tránsito [4]. Las tensiones por carga de tránsito pueden verse incrementadas por variaciones térmicas y asentamiento diferencial de la sub-rasante en donde el incremento de tensiones por estos dos últimos efectos son diferentes para pavimento de asfalto y pavimento de hormigón. En particular, se espera que una estructura de pavimento de asfalto falle por deformación y/o agrietamiento y una estructura de pavimento de hormigón solo por agrietamiento. Aunque en último término si ambos pavimentos se diseñan correctamente solo deberían fallar por agrietamiento por fatiga al acercarse al término de su vida útil. También, por razones obvias, se espera que la falla se manifieste solo en la capa superior; las capas inferiores nunca deberían ser intervenidas a no ser que se trate de un proceso de re-construcción.

La homogeneidad de los materiales, la calidad de construcción y otras variables pueden ser causas contributorias que pueden afectar la durabilidad de un pavimento tanto positiva como negativamente. También, es posible que fallas de materiales o fallas

constructivas deriven en fallas que a veces son interpretadas como fallas estructurales pero no en su origen no lo son. Por ejemplo:

- Para el caso de pavimentos de hormigón, escalonamiento no debería considerarse como falla estructural debido a que es una falla que se debe resolver con técnicas constructivas y no con el espesor de la capa.
- Para el caso de asfalto la deformación plástica de la mezcla (ahuellamiento) puede interpretarse como una deformación estructural y no se resuelve con un mayor espesor de capa sino que con el diseño de mezcla.

Tanto la deformación como el agrietamiento estructural son de magnitudes muy pequeñas y en su inicio son imperceptibles por el observador común. En general cuando este tipo de falla estructural comienza a ser visible por el ojo humano significa que el pavimento ya entró en una fase más acelerada de pérdida de su integridad estructural. Es debido a esto último que un levantamiento visual de daños suele entregar información relativamente tarde no obstante, seguirá siendo útil para el diagnóstico de experto.

La Figura 1, muestra un ejemplo de la evolución esperada de un pavimento asfáltico a partir de cualquier modelo estructural (Ejemplo: AASHTO 93). Se observa que aunque el umbral de diseño (PSI = 2,0 o 2,5), no se ha alcanzado de igual modo el pavimento muestra una condición de falla estructural avanzada. Esto es debido a que el usuario de la prueba AASHTO (evaluadores) percibían, que aun en condiciones similares a la Foto 4 de Figura 8, la Serviciabilidad que le otorgaba un pavimento en estas condiciones, era aceptable. No obstante lo anterior, desde un punto de vista netamente estructural el pavimento ha comenzado a fallar una vez que se forman las primeras grietas (pérdida de su integridad física y mecánica). Del mismo modo, una vez que se inicia la falla estructural de una capa, el deterioro comienza a progresar con una tasa significativamente mayor. En este caso las grietas comienzan a conectarse y la integridad de la capa estructural se debilita traspasando una parte importante de los esfuerzos a las capas inferiores pudiendo generar una reacción en cadena que puede llevar al colapso de la estructura.

Es por esta razón, que en el caso que se ha considerado realizar rehabilitación tipo refuerzo en base recarpeteo estructural (overlay o sobre-capa) es muy importante realizarlo antes de que las grietas comiencen a conectarse y este se transforme en piel de cocodrilo porque las capas inferiores o sub-rasante pueden haber sufrido algún tipo de daño (un diagnóstico de experto puede determinar si hay daño en capas inferiores y su posible efecto secundario).

Cuando se alcanza una condición de agrietamiento, mayor previo a un recarpeteo, normalmente se debe fresar y reemplazar la o las capas asfálticas, perdiendo una importante parte de la capacidad estructural remanente de un pavimento. Por ejemplo si un pavimento de asfalto tiene un espesor de 12 cm su vida estructural estaría calculada para 1,5 millones de Ejes Equivalentes ( $R = 90\%$ ,  $PSI_{final} = 2,5$ ). Si la rehabilitación es tardía y considera fresar y reemplazar la capa asfáltica, la vida útil del pavimento se extenderá a un máximo de 1,5 Millones de Ejes Equivalentes (más/menos). Si por lo contrario, si se rehabilita antes de que el deterioro estructural progrese y se coloca directamente una capa de refuerzo de 4 cm entonces, la vida útil en Ejes Equivalentes de diseño se extenderá en más de 8 Millones de Ejes Equivalentes.

Para llevar a cabo el diagnóstico con el menor grado de incertidumbre, tan importante como los datos obtenidos de mediciones antiguas y actuales de terreno, se debe contar con: proyecto de ingeniería original e información "as built" (diseño y especificaciones); información de construcción (metodología de construcción y datos del control de calidad); Toda esta información; junto con las solicitaciones de carga real y

futura permitiría al ingeniero diseñador pronunciarse sobre el estado presente y evolución futura de las condiciones estructurales de un pavimento.

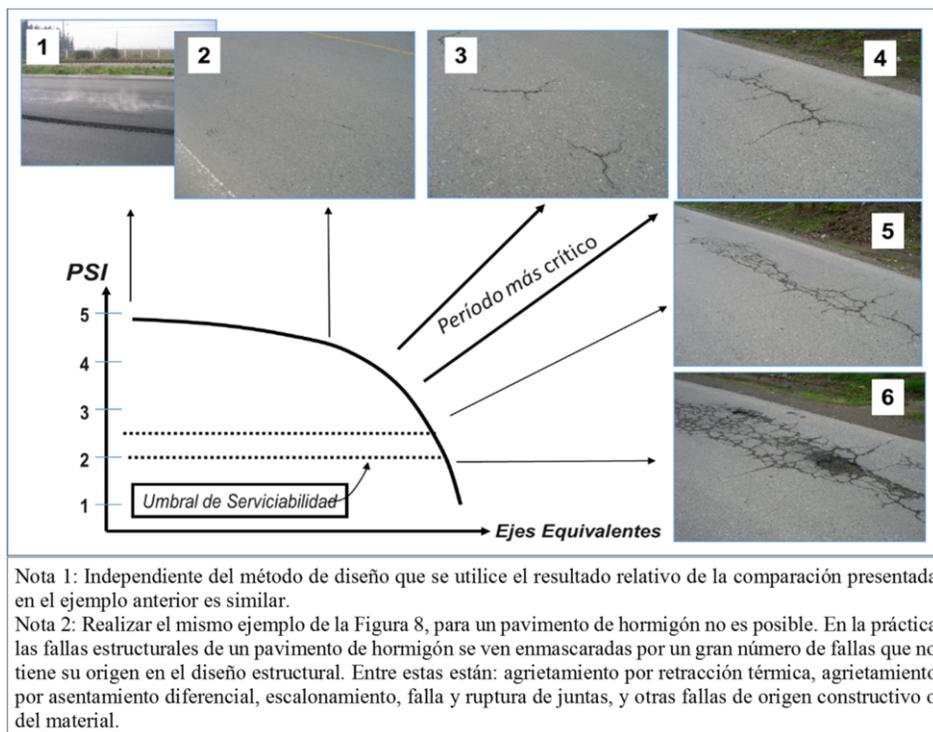


Figura 1. Ejemplo modelo de deterioro estructural pavimento asfáltico.

#### 4. Patología y sintomatología

En la presente sección se discutirá a nivel conceptual los términos Patología y Sintomatología aplicado conceptualmente al estudio de la Condición Estructural de un pavimento a nivel de proyecto.

Diagnosticar deterioro de pavimento requiere identificar no solo las causas que dan origen a las fallas (patologías) sino que además la sintomatología con que se presentan estas. El estudio de la sintomatología con que se presentan los diversos tipos de patologías es parte vital de la metodología para la evaluación de la condición estructural de un pavimento debido a que los pavimentos de asfalto y hormigón pueden experimentar otras formas de deformación, grietas y fallas las cuales no están asociadas a las hipótesis de diseño estructural pero, producirán igual o mayor deterioro físico de la estructura y eventualmente ser la causa que da origen a la falla y/o el colapso de un pavimento. Esto último es la razón por la cual evaluación de la condición estructural de un pavimento puede llegar a ser muy compleja.

El estudio de la sintomatología de deterioro permite determinar o reforzar las hipótesis que prueban el origen de las patologías. Conceptualmente, la sintomatología de un deterioro se puede presentar localizada o generalizada, a continuación se presenta un resumen de esta clasificación.

Deterioro Localizado: En general existen dos formas en que se puede presentar un deterioro localizado:

- Deterioro localizado sin patrón de repetición determinado: Este tipo de deterioro se presenta sin un patrón específico y por lo general su causa es producto de situaciones singulares relacionadas a acontecimientos puntuales del proceso de construcción o calidad constructiva. Normalmente este tipo de deterioro localizado es difícil de predecir.
- El deterioro localizado con patrón determinado: Este tipo de deterioro que se presenta de forma puntual pero con un grado de regularidad a lo largo de tramos homogéneos por lo general, tiene origen en alguna parte del proceso constructivo y que ha ocurrido de forma sistemáticamente. Ejemplo: inicio y término de faena, otros. Normalmente este tipo de deterioro localizado, con algún grado de información del historial de construcción puede ser fácil de diagnosticar su origen.

Deterioro Generalizado: El deterioro generalizado se manifiesta de forma repetitiva con un patrón similar a lo largo tramos homogéneos del proyecto y se puede presentar de forma continua o discreta. Este tipo de deterioro puede ser más fácil de diagnosticar y cuantificar su efecto en el futuro desempeño del pavimento no obstante, según la intensidad que se presente la o las patologías al momento de la evaluación, puede resultar más difícil poder aislar la causa principal que dio origen a la falla. Cuando los problemas de deterioro generalizado se presentan con un patrón de repetición regular y a su vez se presenta en forma relativamente prematura (primeros años de vida útil), el origen de las fallas se puede encontrar en:

- Diseño estructural inadecuado por sub-estimación de parámetros de diseño.
- Especificaciones técnicas inadecuadas o insuficientes.

Cuando los problemas de deterioro generalizado se pueden presentar tempranamente en un proyecto o correspondería que ocurrieran cercano al término de su vida útil. Cuando el fenómeno ocurre tempranamente, el origen de las fallas se puede encontrar además en:

- Diseño estructural inadecuado por cambio en condiciones de proyecto (principalmente tránsito).
- Diseño de mezclas: Diseño inadecuado para el tipo de materiales que se dispone y/o para condiciones de solicitaciones de tránsito y clima. Particularmente tiene relación con la selección de materiales y dosificación.
- Errores de ejecución, problemas recurrentes de control de calidad de los materiales y/o procesos constructivos. Según jerga de gestión de calidad: “falla común” del proceso.
- También, cae dentro de esta categoría deterioros generalizados dentro de ciertos tramos específicos producto de variabilidad de las condiciones de la subrasante o suelo de fundación. Esto debido a que los métodos de diseño utilizan valores medios de capacidad de subrasante para el diseño de estructural y siempre cabe la posibilidad de encontrar sub-sectores con valores de soporte menor.

## 5. Conclusiones y reflexiones finales

El hecho que en la actualidad existan un importante número de equipos de auscultación de pavimentos, los cuales permiten tomar gran cantidad de datos. Esta importante

cantidad de datos no solo genera importante información para la gestión de mantenimiento de pavimentos sino que permite construir modelos de deterioro de los proyectos. No obstante lo anterior, en la práctica la tendencia de la gestión de mantenimiento de pavimentos se ha encauzado más en una gestión a nivel de red y de acuerdo a la experiencia de los autores, cada vez se distancia más con la ingeniería requerida para la gestión de mantenimiento a nivel de proyecto.

Las actuaciones de mantenimiento a nivel de proyecto además, de mediciones y evaluaciones económica, requiere realizar un diagnóstico y un proyecto de ingeniería que justifique técnicamente la solución de conservación o rehabilitación que se asigne.

El trabajo queda limitado por la extensión máxima exigida, por lo cual se enfoca a elaborar sobre los principales conceptos que se deben diferenciar entre gestión de mantenimiento nivel de red versus nivel de proyecto.

## **Referencias**

- [1] B Al-Omari, MI Darter, Relationships between international roughness index and present serviceability rating, Transportation Research Record, 1994
- [2] MW Sayers, On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile, Transportation Research Record, 1995
- [3] JF Paniati, J True, Interactive highway safety design model (IHSDM): Designing highways with safety in mind, Transportation Research Circular, 1996
- [4] YH Huang, Pavement analysis and design (Chapter 9), Prentice Hall, 1993