

SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE DISEÑO, GESTIÓN, CONSTRUCCIÓN Y REPARACIÓN DE PAVIMENTOS URBANOS

Andrés Sotil Chávez

SENCICO
Servicio Nacional de Capacitación
Para la industria de la Construcción

Gerencia de Investigación
y Normalización

SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN
SOBRE DISEÑO, GESTIÓN, CONSTRUCCIÓN
Y REPARACIÓN DE PAVIMENTOS URBANOS
Andrés Sotil Chávez

©SENCICO
Av. De la Poesía N° 351
San Borja. Lima 41, Perú
Teléfono (01) 2116300

ISBN
Depósito legal

Se puede reproducir y traducir total y parcialmente el texto publicado siempre que se indique la fuente.

El autor es el responsable de la selección y presentación de los hechos contenidos en esta publicación, así como de las opiniones expresadas en ella, las que no son, necesariamente, las de SENCICO o del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y no comprometen a la institución.

Publicado por la Gerencia de Investigación y Normalización de SENCICO en el marco del Plan Operativo Institucional en aras de Desarrollar estudios en la línea de investigación referida a edificaciones sismo resistente y la difusión de dichos trabajos.

CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL

Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras
Presidente del Consejo Directivo Nacional

Ing. Adolfo Gálvez Villacorta
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

Ing. Dina Carrillo Parodi
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

Dra. Ana K. Rozas Valverde
Representante del Ministerio de Educación

Abog. Wigberto Nicanor Boluarte Zegarra
Representante de las Universidades

Arq. Sofía Rodríguez Larraín de Grange
Representante de las Universidades

Sr. Félix M. Rosales Gutiérrez
Representante de la Federación de Trabajadores de Construcción Civil del Perú (FTCCP)

Sr. Porfirio Fidel Buitrón Espinoza
Representante de la Federación de Trabajadores del Perú (CTP)

PRÓLOGO

El Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), es una entidad de tratamiento especial del Sector de Vivienda, Construcción y Saneamiento, que tiene como finalidad la formación y capacitación de los trabajadores de la construcción mediante la educación superior no universitaria; tanto para el desarrollo de investigaciones vinculadas a la problemática de la vivienda, edificación y saneamiento, como para la presentación de propuestas de normas técnicas de aplicación nacional.

Institucionalmente se creó el 26 de Octubre de 1976, iniciando sus operaciones al año siguiente. Cuenta con sedes en Piura, Chiclayo, Trujillo, Lima, Arequipa y Cusco, donde se ofrecen las carreras de formación técnica y profesional-técnica. Se tiene sedes para impartir cursos y capacitación ocupacional en Huancayo, Ica, Iquitos, Puno y Tacna. También contamos con Unidades Operativas en Ayacucho, Cajamarca, Moyobamba y Pucallpa y CENTRO DE Formación en Apurímac, Huancavelica, Moquegua, Madre de Dios y en los distritos de Chorrillos y Los Olivos en la ciudad de Lima, mantenemos convenios con universidades e instituciones públicas y privadas del sector vivienda, construcción y saneamiento.

Cuenta con una Gerencia de Investigación y Normalización, en donde existe información especializada relacionada con la construcción y se encuentra a disposición de los profesionales y técnicos del sector construcción y personas interesadas.

Cumplimos con difundir esos conocimientos, poniendo a disposición de la comunidad ésta publicación que motivará a los estudiantes y profesionales del sector a desarrollar investigaciones que debidamente difundidas podrán ser enriquecidas con nuevos aportes gracias a la contribución de especialistas, con el objetivo de innovar en el campo de la vivienda, construcción y saneamiento.

La misión institucional de SENCICO es proporcionar capacitación de excelencia, investigando, evaluando sistemas constructivos innovadores y proponiendo normas para el desarrollo de la industria de la construcción; contribuyendo así al incremento de la productividad de las empresas constructoras y a la mejora de la calidad de vida de la población. La visión es proyectarse hacia el desarrollo de nuevas propuestas educativas para la formación continua de los trabajadores, técnicos y profesionales, una industria de la construcción competitiva y segura, con trabajadores calificados, certificados y empleables, contribuyendo a la competitividad de las empresas y aportando estudios de investigación y normalización para el desarrollo integral de nuestro país.

Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras

Presidente Ejecutivo

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN

- Situación de los Caminos en el Perú
- Los Manuales en el Área de Pavimentos en el Perú
- Objetivo del Informe
- Metodología del Informe
- Exclusiones y Limitaciones

MARCO TEÓRICO Y DEFINICIONES

- Sistema de Gestión de Pavimentos
- Modelos de Deterioro de Pavimentos
 - Modelo de Deterioro de Pavimentos Probabilísticos-Estocásticos.
 - Modelo de Deterioro de Pavimentos Empíricos
 - Modelo de Deterioro de Pavimentos Mecánicos-Empíricos.
 - Modelo de Deterioro de Pavimentos Mecánicos.

PRIORIZACIÓN DE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

- Métodos de Evaluación Funcional
 - Índice de Serviceabilidad del Pavimento – PSI
 - Índice de Condición de Pavimento (PCI)
 - Condition Rating Survey (CRS)
 - Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER)
 - El Índice de Condición General – Overall Condition Index (OCI)
 - Índice de Rugosidad Internacional (IRI)
 - Índice de Fricción Internacional (IFI)
- Métodos de Evaluación Estructural
 - Ensayos No Destructivos (NDT)
 - Ensayos Destructivos
- Priorización de Métodos de Evaluación

EVALUACIÓN DE SOFTWARE DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS

- MicroPAVER
- RoadSoft GIS
- Utah LTAP TAMS
- StreetSaver
- Pavementview y Pavementview Plus
- PavePro Manager
- PaveAir
- HDM III y HDM IV

CARACTERÍSTICAS DE SGP PARA PAVIMENTOS URBANOS EN EL PERÚ

RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

Situación de los Caminos en el Perú

Al 2012, el Ministerio de Transportes y Comunicación (MTC) del Perú (1) reportó que de la red vial nacional bajo su administración, se tenían las siguientes cantidades:

26 017,07 km de carreteras (100%)
12 444,93 km de carreteras pavimentadas (48%)
11 150,91 km de carreteras no pavimentadas (43%)
2 421,23 km de carreteras en proyecto (9%)

Y ampliado la visión de carreteras, la DGCF (Dirección General de Caminos y Ferrocarriles) del MTC indica que el SINAC (Sistema Nacional de Carreteras) está conformado como se muestra en la Tabla 1, con un total de 137 327 km nacionales (de las cuales 10 314 km están en fase de proyecto).

Tabla 1. Sistema Nacional de Carreteras (SINAC) (1)

Red Vial	Número de Rutas	Pavimentadas		No Pavimentadas		Sub Total Existentes		En Proyecto	Total
		km	%	km	%	km	%	km	km
Nacional (*)	116	12445	53	11151	47	23596	100	2421	26017
Departamental o Regional	386	1493	7	21300	93	22793	100	6050	28843
Vecinal o Rural	4650	624	1	80000	99	80624	100	1843	82467
Total	5152	14562	11	112451	89	127013	100	10314	137327

* Actualización del inventario Básico de las Rutas de la Red Vial Nacional del SINAC - Julio 2011- R.M. Nº 618-2011-MTC/02

A nivel nacional las vías están siendo concesionadas a empresas privadas, tanto para su explotación y mejora, como para el mantenimiento por niveles de servicio y su posterior mejora. Reportes del Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público (OSITRAN) indican que el Estado Peruano ha concesionado 5363 km en 14 contratos de concesión (2) y los planes del MTC proyectan concesionar al 2016 cerca de 4740 km en 12 concesiones (3). Por otro lado, Provías Nacional reportó al 2011 que 8124 km han sido atendidas con el Proyecto Perú, que procura mejorar los niveles de servicio de carreteras de bajo tránsito y/o no pavimentadas (4). Así, alrededor de 18 000 km del SINAC estarán concesionadas y 109 000 km tienen administración estatal, siendo en su gran mayoría de la red vecinal o rural.

Es importante mencionar que estas vías están bajo la jurisdicción del MTC. Los pavimentos urbanos (aquellos en ciudades y poblaciones) están bajo la jurisdicción del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS) y un resumen similar al del MTC no se pudo encontrar en su página de internet (5) o alguna publicación similar. Sin embargo, para tener una idea, el MVCS reporta 7,3 millones de viviendas (aproximadamente 6,36 millones de casas independientes y similares, y el resto de espacios multi-vivienda). Si se asume que estas viviendas se agrupan en cerca de 6,5 millones de lotes, y cada lote tiene aproximadamente 10 metros frontales a las calles aledañas, se puede

estimar que se tienen 65 000 km-carril, o cerca de 130 000 km lineales (asumiendo calles de al menos 2 carriles, uno para cada dirección), bajo la administración de gobiernos municipales distritales y provinciales.

Las condiciones de estas vías es desconocida, pero según lo que se observa en las calles del Perú, se tienen vías con:

Pavimento flexible

Pavimento rígido

Pavimento compuesto, normalmente flexible sobre vías rígidas de 30 o más años.

Pavimento compuesto, normalmente flexible sobre vías rígidas de 30 o más años.

Pavimento adoquinado o empedrado, ya sea por temas históricos o arquitecturales.

Materiales estabilizados con asfalto o cemento

Materiales modificados o vías experimentales

Vías afirmadas

Así, se estima que bajo jurisdicción vecinal o local, sea en el ámbito del MTC o del MVCS, el Estado Peruano, vía entidades como municipalidades distritales, provinciales, o gobiernos regionales, tiene la administración de alrededor de 239 000 km de calles (130 000 km estimados del MVCS, 109 000 km del MTC).

Los Manuales en el área de Pavimentos en el Perú

Existen manuales publicados por el MTC para mantenimiento, preventivos y rutinarios, para pavimentos de bajo tráfico y no pavimentados, entre otros (6) de aplicabilidad nacional. De la misma forma, el MVCS ha publicado la Norma Técnica (NTE) CE010 Pavimento Urbanos (7) en el 2010, y actualmente esta norma está pasando por un proceso de revisión y mejora continua.

Es así que, por ejemplo, el Manual Técnico de Mantenimiento Rutinario para la Red Vial Departamental No Pavimentada (8) y el Manual Técnico de Mantenimiento Periódico para la Red Vial Departamental no Pavimentada (9) establecen que la superficie de rodadura puede ser clasificada “en función de ciertos criterios sobre los elementos y condiciones del camión y un cierto valor referencial del IRI, los cuales se presentan en la siguiente tabla: (Tabla 2)”

Tabla 2. Tabla Referencial del Estado del Camino (adaptado del MTC 8,9)

Estado del Camino	IRI de la Superficie de Rodadura
Muy mal estado	>18
Mal estado	14-18
Regular estado	10-14
Buen estado	6-10
Muy buen estado	4-6

Más aún, el mismo documento “propone conceptualmente” que se aplique “una cultura que privilegie la actuación con criterio preventivo”, cambiando el

“reparar lo dañado por evitar que se dañe”; y reconoce que económicamente hablando “es razonable afirmar que conservar una vía en buen estado (A) es menos costoso, y tendrá mayores costos si los estados iniciales son B, C, o D.” Así, se establece que para el Perú se usen los valores de IRI mostrados en la Tabla 3 para clasificar las vías pavimentadas y no pavimentadas, indicando que debe investigarse de manera rigurosa las condiciones específicas en la costa, sierra y selva.

Tabla 3. Tabla Referencial del Estado Vial, según la Rugosidad (10)

	PAVIMENTADAS	NO PAVIMENTADAS
Estado	Rugosidad	Rugosidad
Bueno	$0 < IRI < 2,8$	$IRI < 6$
Regular	$2,8 < IRI < 4,0$	$6 < IRI < 8$
Malo	$4,0 < IRI < 5,0$	$8 < IRI < 10$
Muy Malo	$5 < IRI$	$10 < IRI$

En el capítulo 0, Sección 006 de este documento se indica como responsabilidad del contratista el “establecer un sistema periódico de inspección que pueda prever y corregir a tiempo cualquier deficiencia”, así como “programa una política de mantenimiento preventivo sistemático”. Sin embargo, no se especifica cómo debe realizarse este sistema, o, a parte de los valores IRI medidos en un año determinado, no se indica cómo debe programarse a un mediano o largo plazo las actividades de mantenimiento.

Actualmente en el Perú se realizan análisis de comportamiento de pavimentos con modelos como el HDMIII y HDM4 del Banco Mundial, como lo reconoce el Manual de Carreteras del MTC publicado a inicios del 2013 (11). Estos programas (HDM=Highway Development and Management) incorporan submodelos de deterioro de pavimentos afirmados, flexibles y rígidos y son aceptados por el MTC, pero este manual (11) indica que “ingenieros proyectistas podrán utilizar otros modelos de reconocida procedencia técnica institucional y que cuenten con la aceptación previa del MTC. “Sin embargo, según se explica en el manual del MTC, el uso del HDMIII y HDM4, se limita a un análisis por proyecto, y no se usaría para un uso de un sistema complejo vial.

El manual del MT si menciona el termino de Niveles de Servicio (NdS) y provee varios indicadores a controlar y que determinen la toma de decisiones de conservación. Los indicadores usados para pavimentos afirmados (A), flexibles (F) y rígidos (R) son:

- Perfilados (A)
- Rugosidad (A, F, R)
- Espesores (A)
- Fisuras y Baches (F, R)
- Ahuellamiento y Textura Superficial (F)
- Deflexiones (F)
- Sello de Juntas (R)

Y se proveen diversos valores limitantes para la toma de decisiones de proyectos individuales, pero no tiene la visión global de un sistema de carreteras/vías jurisdiccional.

En el ámbito del MVCS, el capítulo 6 de la NTE de Pavimentos Urbanos (7) menciona el mantenimiento de pavimento, y enumera 7 actividades para realizarlo; sin embargo no indica la metodología o provee ejemplos de cómo realizarlo.

Objetivos

Los principales objetivos de este informe son los siguientes:

Hacer un resumen de las diversas metodologías existentes para la evaluación de pavimentos, sean estas funcionales y/o estructurales.

Realizar una priorización de estas metodologías, proponiendo un esquema jerárquico para su aplicación en las diversas entidades encargadas de la Gestión de Pavimentos.

Proponer, en base a las metodologías más accesibles según los recursos por entidad, un sistema de clasificación de vías que sirva para la priorización de trabajos de mantenimiento, con un enfoque técnico y económico, y que eventualmente pueda normalizarse como Norma Técnica Peruana (N.T.P.)

Proponer las características de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) a nivel de red vial, que pueda ser aplicado por cualquier municipalidad distrital, provincial, gobierno local, regional y/o otra Entidad similar o de administración y gestión de pavimentos. Este SGP deberá complementar la Norma Técnica de Edificaciones (NTE) C.E.010 Pavimentos Urbanos del 2010, en específico en su Capítulo 6, Mantenimiento de Pavimentos, y proceder a reemplazarlo dicho capítulo.

Dejar las bases teóricas y conceptuales para la implementación de una bases de datos de comportamiento de pavimentos histórico nacional que sirva para la implementación de futuras tecnologías y el desarrollo de teorías y conceptos netamente peruanos.

Exclusiones y Limitaciones

Este informe ha sido realizado a solicitud del Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, SENCICO, que forma parte del MVCS, y por lo tanto su jurisdicción directa de administración es para con los pavimentos urbanos, reglamentado por la Norma Técnica de Edificaciones (NTE) CE.010 Pavimentos Urbanos del 2010 (7). Sin embargo, las recomendaciones en este informe pueden ser aplicables a cualquier administración de pavimentos, incluyendo la del MTC, la de Concesiones, y cualquier otra gestión privada.

El enfoque de este informe asume en un principio que las necesidades del inventario son amplias en los 130 000 km de pavimentos urbanos (estimado), y proceder a realizarlo con metodologías costosas limitaría su aplicación. Por eso se ha propuesto la implementación de la metodología más accesible económicamente hablando, y que propuesto la implementación de la metodología más accesible económicamente hablando, y que cubra con las necesidades técnicas de inspección e inventario objetivo. Esto no debería limitar a las diversas entidades en la búsqueda de metodologías más sofisticadas, indicadas también en este informe, o de la literatura en general que completamente y eventualmente sobrepase a la metodología propuesta en este informe. Sin embargo, esta metodología debe servir de base para la creación de una base de datos histórica nacional que sirva para la implementación de futuras tecnologías, como lo son la Metodología Mecanística – Empírica o puramente Mecanística.

MARCO TEÓRICO Y DEFINICIONES

Este capítulo cubrirá los conceptos básicos para el entendimiento de este informe. Así, se tratan:

Los Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) y,
Los Modelos de Deterioro de Pavimentos

Sistema de Gestión de Pavimentos

También conocido como PMS o Pavement Management System por su traducción en inglés, el Sistema de Gestión de Pavimentos o SP es una herramienta de planeamiento que se utiliza para:

Recolectar y monitorear información acerca de la condición de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción y,

Evaluar y priorizar alternativas y estrategias de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción y,

Proveer la información necesaria a los encargados de tomar decisiones de las consecuencias a largo plazo decisiones en el corto plazo.

También se dice que el SGP es el planeamiento, implementación, verificación y ajuste de las actividades tendientes a un desempeño satisfactorio de los pavimentos de un sistema o de una red vial (12), donde:

Planeamiento es la adopción de una estrategia de gestión de pavimentos, metas y programación, organización, diseño y asignación de recursos.

Implementación es la construcción de vías de acuerdo a lo diseñado y planeado. Incluye también ajustes en el proceso, ejecución del programa de mantenimiento, rehabilitación y reposición.

Verificación consiste en el contraste entre lo planeado y lo ejecutado.

Ajuste cubre las acciones correctivas y de mejora que se incorporan a un planeamiento ajustado.

Se puede indicar que un SGP incluye la recolección de datos de evaluación funcional y estructural de los pavimentos, además de la condición de los elementos de drenaje, obras de arte, señalización horizontal y vertical. Para este documento solo se cubrirán los referentes a las evaluaciones funcionales y estructurales de los pavimentos.

La evaluación funcional se enfoca principalmente en la calidad de manejo o en la textura superficial de una sección carretera. Cubre conceptos como la calidad de la manejabilidad o transitabilidad de una vía, la rugosidad de la misma, tipo/cantidad/severidad de daños y la resistencia al deslizamiento. Así,

la literatura provee varios métodos de calificación de los pavimentos según capacidades funcionales, que van desde valores de relevamiento visual (PSR, PSI), cuantificación de fallas (PCI), respuesta vehicular de la rugosidad (Rugosímetros), medición de la Rugosidad (Perfilómetros), medición de fricción (Mu Meter), entre otras.

Por otro lado, la evaluación estructural se enfoca en la capacidad estructural del pavimento medido mediante deflexiones (estáticas, vibratorias o de impulso), determinación de espesores reales de capas (calicatas, diamantinas), propiedades de los materiales (módulos, resistencia a la compresión, cantidad de asfalto, porcentaje de vacíos), entre otros.

Modelos de Deterioro de Pavimentos

Como toda herramienta de planeamiento, el SGP debe permitir prever el comportamiento de los pavimentos que están siendo evaluados. Sin embargo, calcular el deterioro de un pavimento ha probado ser por años una tarea muy complicada. A diferencia de otras estructuras civiles, estas estructuras están expuestas a la intemperie y a cargas estáticas y dinámicas de múltiples cargas y configuraciones sin protección alguna más allá de la estructura en sí. Más aún, los pavimentos son en realidad sistemas multicapa y multi-condición a lo largo de su extensión que tienen características extremadamente variables, y hacen que el comportamiento varíe literalmente entre el día y la noche.

Los métodos de predicción del comportamiento o deterioro de un pavimento se pueden clasificar en los siguientes cuatro métodos:

Modelo de Deterioro de Pavimentos Probabilísticos – Estocásticos

Un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para caracterizar una sucesión de variables aleatorias (o estocásticas) que evolucionan en función de otra variable, generalmente el tiempo. Cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad (normal, binominal, etc.) y, entre ellas, pueden estar correlacionadas o no (13). Para el SGP, la variable a evaluar contra el tiempo será la condición del pavimento medido de múltiples formas que se verán más adelante.

Hipótesis de Markov

La hipótesis de Markov es una de estas funciones de probabilidad que representa el cambio de una variable (en la SGP, la condición del pavimento) en un determinado momento en el tiempo en base a un patrón de transición desconocido (14). Es así que la hipótesis de Markov o markoviano es utilizado en pavimentos para predecir el deterioro progresivo de la estructura en relación a la información de inspecciones periódicas como las que muestra la figura 1 (cambio en el comportamiento según distintas vías o “paths” que depende de la condición del pavimento o “condition state”. El problema de utilizar un markoviano radica en definir un markoviano inicial sin información histórica (“en relación de inspecciones periódicas”). En el Perú no se tiene la costumbre de monitorear las reparaciones realizadas o el comportamiento de obras nuevas,

por lo que no se tiene un valor o conocimiento de ratios de deterioro. Entonces, para establecer un SGP en el Perú se tendrá que recurrir a otras experiencias y/o adaptaciones de las mismas. La Figura 2, por ejemplo, muestra el markoviano de deterioro aplicado en Delhi Township, Ohio (15) utilizando al PCI o Pavement Condition Index (índice de Condición del Pavimento) como variable de caracterización del pavimento.

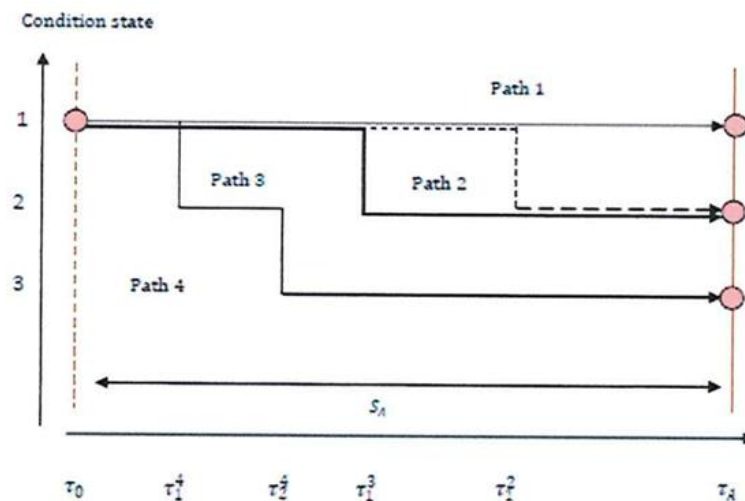


Figura 1. Condición del Pavimento en periódicas inspecciones (14)

Current Year Condition		Next Year Condition	
A1 - No Maintenance:		95%	A1
		5%	A
A - Routine Maintenance:	Funded	95%	A
	Unfunded	80%	A
B - Periodic Maintenance:	Funded	100%	B
	Unfunded	80%	B
C - Deferred Action:	Funded	95%	C
	Unfunded	50%	C
D - Rehabilitation:	Funded	100%	D
	Unfunded	65%	D
E - Reconstruction:	Funded	100%	E
	Unfunded	100%	E

Figura 2. Hipótesis de Markov de deterioro del PCI en un año (15)

Esta figura se puede interpretar de la siguiente manera:

Del 100% de pavimentos que se encontraban en condición 1 (No Mantenimiento), el 95% mantienen dicha condición y el 5% se deterioran y se convierten a nivel A (Mantenimiento Rutinario).

Del 100% de pavimentos que se encontraban en condición A, existe una porción que recibe fondos y puede ser mantenida, mientras que existe otra porción que no se mantiene por falta de fondos o decisión de la entidad.

Del 100% de la porción que si se mantiene, el 95% mantienen la condición A y el 5% se deterioran y se convierten a nivel B.

Del 100% de la porción que no se mantiene, el 80% mantienen la condición A y el 20% se deterioran y se convierten a nivel B.

Del 100% de pavimentos que se encontraban en condición B, existe una porción que recibe fondos y otra que no, similar a los pavimentos en condición A.

Del 100% de la porción que si se mantiene, el 100% vuelve a tener una condición de pavimento nuevo o que no requiere mantenimiento, A1.

Del 100% de la porción que no se mantiene, el 80% mantienen la condición B y el 20% se deterioran y se convierten a nivel D (Rehabilitación).

Del 100% de pavimentos que se encontraban en condición C (Acción Diferida), existe una porción que recibe fondos y otra que no.

Del 100% de la porción que si se mantiene, el 95% mantienen la condición C y el 5% se deterioran y se convierten a nivel D.

Del 100% de la porción que no se mantiene, el 50% mantienen la condición C y el 50% se deterioran y se convierten a nivel D.

Del 100% de pavimentos que se encontraban en condición D, el 100% de los tratados vuelven a la condición A1, mientras que el 85% de los no tratados mantiene la condición D y el 15% se deteriora a la condición E (Reconstrucción).

Los pavimentos en condición E, o se mantienen en condición E si no se tratan, o se vuelven a la condición A1 si es que reciben tratamiento.

Como se puede observar, un sistema como el mostrado ayuda, de manera muy simple, a simular el deterioro de un sistema de pavimentos, en términos de porcentaje. Lo que se requiere determinar entonces son esos porcentajes, que en el caso de la referencia son la acumulación de más 10 años de información. Para poder empezar con el SGP, para luego, en base a mediciones locales recalibrar estos porcentajes y acumular la información necesaria para robustecer este sistema o proceder al siguiente sistema o metodología.

Modelos de Deterioro de Pavimentos Empíricos

A diferencia de los modelos probabilísticos en los que se depende de determinar valores que indican ratios de deterioro, los modelos empíricos se basan en valores medidos de deterioro que se pueden interpolar, o en muchas ocasiones extrapolar. Así por ejemplo, visto desde una forma muy simple, si una medición en 5 años en un pavimento "X" indica que se generará 10% de daño piel de cocodrilo, se podría indicar que en la mitad de tiempo un pavimento "Y" de condiciones similares a "X" generaría 5% de daño, en 5 años un daño similar y en 10 años el doble del mismo.

Sin embargo, estas interpolaciones, y sobre todo las extrapolaciones no son precisas y pueden generar sobre (o baja) predicción de los deterioros, pero se entiende que son más precisos en sus resultados (o al menos tienen menor variabilidad) que los obtenidos usando ratios probabilísticos.

Es conocido, aceptado y utilizado en el mundo de los pavimentos que las guías del AASHTO 93 y sus predecesoras están basadas en métodos netamente empíricos. Su información de campo es la obtenida en el AASHTO Road Test empezada al final de la década de los 50's y se obtuvieron ecuaciones basadas principalmente en la cantidad de carga aplicada y la condición de la subrasante que, ante la inexistencia de computadoras o calculadoras, fueron llevadas a los muy conocidos nomogramas.

Por años, estos nomogramas han sido utilizados en el Perú y en el mundo, y en el manual de carreteras publicado por el MTC en el 2013 (11) se oficializó su uso en el Perú para pavimentos nuevos flexibles y rígidos. Sin embargo, estos nomogramas tienen deficiencias importantes, siendo el más relevante la invariabilidad de los mismos con respecto de condiciones climatológicas, aspecto importantísimo en el Perú. Otros aspectos no incluidos o mal representados son:

Diferentes configuraciones de tráfico aplicadas hoy a las aplicadas en los 50's y 60's cuando se hizo el ensayo.

Mejor caracterización (y variabilidad en el periodo de diseño) de las carpetas flexibles.

Mejor caracterización de las bases granulares para considerar consideraciones de humedad, plasticidad, entre otras, en su comportamiento final.

La guía AASHTO debería permitir hacer diseños orientados a vidas de servicio de 10 a 20 años, extrapolando los resultados empíricos obtenidos en el AASHTO Road Test. Pavimentos con tiempos de servicio útiles menores a 10 o 20 años son un reflejo que las condiciones de deterioro empíricas asumidas como válidas tienen errores importantes.

Estos comportamientos pobres en el Perú han llevado a la proliferación de métodos importados que puedan apoyar a los diseños AASHTO. Estos

métodos varían desde metodologías alternas como la del Asphalt Institute (AI9 o, la Portland Cement Association (PCA); hasta la importación de materiales modificados como pavimentos con polímeros naturales o sintéticos; concreto con refuerzo de fibras; entre otros.

Sin embargo, no se ha atacado el problema de raíz, que es el tratar de entender el deterioro de los pavimentos midiéndolos en campo para las diversas condiciones peruanas. La implementación de un SGP tendría como consecuencia el monitoreo continuo de los pavimentos, y se podría llegar a tener suficiente información como para llegar a encontrar ecuaciones peruanas (empíricas) que pueden ser utilizadas para predecir el comportamiento (o deterioro) de los pavimentos. Más aún, teniendo suficiente información de campo permitiría en un mediano plazo poder dar el siguiente salto en la tecnología de los pavimentos, que es el uso de métodos – empíricos.

Modelos de Deterioro de Pavimentos Mecánísticos-Empíricos

Para 1986, se entendió en los EEUU que los métodos empíricos tenían la limitante de la extrapolación y es así que, paralelo a los esfuerzos de mejorar la guía empírica (AASHTO 86 y AASHTO 93), se programó a un nuevo estudio que permita tener una guía de diseño que incluya los cambios en las cargas, materiales, clima y otras características importantes (16). Así, en 1987, el Congreso norteamericano autorizó SHRP-Strategic Highway Research Program o Programa Estratégico de Investigación de Carreteras. Este programa era una iniciativa de investigación aplicada que tenía como objetivo el desarrollar y evaluar técnicas y tecnologías que combatan las condiciones de deterioro de las carreteras norteamericanas y mejoren su comportamiento, durabilidad, seguridad y eficiencia (17). Este SHRP estuvo dirigido por un comité de altos ejecutivos de las agencias de transportes estatales de los EEUU (paralelo a nuestras regiones), la industria y las universidades; operando como una unidad del Consejo de Investigación Norteamericano o la National Research Council (NRC); y enfocándose primordialmente en cuatro áreas:

- Asfaltos
- Concreto y estructuras
- Operaciones carreteras (mantenimiento y seguridad en el área de trabajo)
- Comportamiento de pavimentos (el estudio de LTPP o Long –term pavement performance – comportamiento de pavimentos a largo plazo).

Este último consiste en un programa de investigación de 20 años, de los cuales los primeros 5 fueron llevados bajo la supervisión de SHRP. Desde 1991, la Federal Highway Administration (FHWA) de los EEUU ha continuado el LTPP, estudiado cerca de 2500 secciones de ensayos en carreteras en servicio de los EEUU, monitoreando y recolectando datos del comportamiento resumido en 7 módulos:

- Inventario
- Mantenimiento
- Monitoreo (deflexión, daños y perfiles)

Rehabilitación
Ensayo de Materiales
Tráfico
Clima

De las más de 100 tecnologías y técnicas evaluadas por SHRP, su principal legado es el desarrollo e implementación de SUPERPAVE, o el Superior Performance Pavement (Pavimento de Comportamiento Superior) que es la metodología de diseño de mezclas asfálticas enfocado en propiedades fundamentales del material como son los módulos de corte, viscosidad, entre otras. Superpave fue presentado en 1994 pero con la desventaja sustancial que no tenía un ensayo en mezcla que verificará el comportamiento, como si lo tienen tecnologías como el Marshall (usado extensivamente en el Perú) y el Hveem.

Para mediados de los 90's, la FHWA y la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program o Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras) tomaron dos decisiones críticas:

Autorizar en 1996 al equipo de Modelos de Superpave de la Universidad de Maryland para que desarrollen los protocolos, criterio y guía del Ensayo de Comportamiento Simple (Simple Performance Test, SPT) que apoye al Superpave, bajo el Proyecto NCHRP 9-19 (18).

En 1996 se decidió que debía desarrollarse para el 2002 una guía AASHTO mecánica-empírica que reemplace a los métodos netamente empíricos y que use el estado del arte en pavimentos hasta ese momento. Así, para 1998 se implementó el proyecto de investigación NCHRP Project 1-37A, Development of the 2002 Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, que fue otorgado a ERES Consultants Division de la Applied Research Associates, Inc. (16). Esta nueva guía debería cubrir pavimentos nuevos y rehabilitados, tanto flexibles como rígidos.

En el lado flexible, el proyecto NCHRP 1-37^a también recayó en la Universidad de Maryland bajo el liderazgo de Matthew W. Witczak, reconocido investigador en el área de pavimentos flexibles carreteros y aeroportuarios, autor de múltiples publicaciones y documentos de investigación. Ambos proyectos fueron reasignados a Arizona en 1999.

Para el año 2002 se habían llegado a dos conclusiones:

Para el proyecto NCHRP 9-19, se habían recomendado 3 SPT: El Módulo Dinámico E^* , el tiempo de Flujo F_t , y el Número de Flujo F_n ; y se recomendaba su evaluación con datos obtenidos del LTPP y otros ensayos de la FHWA (19).

Para el proyecto NCHRP 1-37A, se presentaba el primer reporte de la Guía de Diseño del 2002 que fue Publicada finalmente para marzo del 2004 (16).

Ambos avances fueron presentados en el Perú por el autor en el III Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial llevado a cabo en Lima en Agosto del 2004 (20, 21).

La Guía de Diseño del 2002 se basa en ecuaciones que tienen su conceptualización en la mecánica de los materiales (mecánicos), pero que al ser tan variables entre sí, requiere de una calibración con datos de campo (empírico) que permita entender el deterioro generado por esa ecuación mecánica.

Si la función probabilística se basaba en ratios de deterioro observados, y los modelos empíricos se basaban en comportamientos de campos observados, y los modelos empíricos se basaban en comportamientos de campo observados, y estos modelos mecánicos-empíricos se basan en comportamientos fundamentales de esfuerzo-deformación válidos para cualquier material, acercando así a la Ingeniería de Pavimentos a un entendimiento más racional como se tiene de estructuras como edificios, puentes, etc.

Sin embargo, hasta el 2002 tanto el diseño de materiales y el diseño de la estructura de pavimentos estaban divorciados una de la otra. Así, en el Perú por ejemplo, se diseña la estructura con la metodología AASHTO 93, mientras que el material asfáltico se diseña con el método Marshall y el concreto se diseña con métodos como los del ACI o PCA, pero no existe una interacción o dependencia entre ambas, como se sabe si lo hay.

Así, para el 2005 el autor, como parte del equipo investigador en Arizona State University, llegó a interrelacionar ambos diseños en el área de pavimentos flexibles, uniendo el SPT de NCHRP 9-19 recomendando el E^* con el comportamiento (o deterioro) mecánico-empírico anticipado por la metodología del NCHRP 1-37A, para ahuellamientos mediante una metodología de hojas de cálculo en MS Excel (22). Esta metodología fue entonces implementada (18) y aumentada bajo el proyecto NCHRP 9-22, "Beta Testing and Validation of HMA PRS" otorgada a Fugro Consultants, Inc (Austin, Texas) para otros deterioros como la fatiga, agrietamiento térmico y el IRI, desarrollando un programa en C++ conocido como el QRSS o Quality Related Specification Software – Programa de Especificaciones Relacionadas con la Calidad (23). Este QRSS permite utilizar las predicciones mecánicas-empíricas del programa de la AASHTO 2008 (la nueva denominación del resultado de NCHRP 1-37A) en un tiempo muy corto permitiendo la predicción de comportamiento en base a ensayos del material asfáltico en campo. Actualmente, la tecnología y estado del Arte de los Pavimentos norteamericanos está en la fase de implementación de la Guía AASHTO 2008 para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, y de la QRSS para la construcción en pavimentos flexibles.

Modelos de Deterioro de Pavimentos Mecanísticos

Lo anterior marca un enorme salto en la tecnología de los pavimentos. Sin embargo, su fundamental error está en la simulación del comportamiento de los materiales, en especial de los agregados y las mezclas asfálticas

En esta última, por ejemplo, se ha dado el salto de entender que la mezcla asfáltica no tiene un comportamiento uniforme en los 10 o 20 años de vida de servicio (uso de $a_1 = 0,44$ para pavimentos flexibles en el AASHTO 93, para dar un caso). En el AASHTO 2008 se permite caracterizar a la mezcla asfáltica desde temperaturas muy frías hasta muy calientes, y con tráficos rápidos y lentos, con el ensayo del módulo dinámico E^* .

Sin embargo, este ensayo se realiza de tal forma que la mezcla asfáltica tenga un comportamiento lo más elástico posible, con deformaciones bajas. Esto se conoce que no es así, teniendo los materiales asfálticos un comportamiento visco elástico. Este componente viscoso es sumamente complejo de representar y predecir. Por lo tanto, la AASHTO 2008 o MEPDG (Mechanistic – Empiric Pavement Design Guide 9 se basa en una relación de laboratorio entre los comportamientos resilientes o elásticos y los comportamientos permanentes o plásticos, y de esta forma se evita el análisis viscoso. Esta aproximación lleva a errores, que aunque asumidos como menores, pueden llevar a un error en la predicción de deterioros.

Así, una escuela de pensamiento en la ingeniería de pavimentos basa su enfoque de estudio en el análisis de visco-elasticidad y en la representación más mecánica de los pavimentos, abandonando el empiricismo y basándose exclusivamente en la mecánica de los materiales.

Así, por ejemplo, se puede entender la visco-elasticidad de las mezclas asfálticas con el principio de superposición de Boltzman (24), que representa la dependencia con el tiempo que tiene la respuesta No-Newtoniana del material. Otros métodos incluyen el entendimiento de la viscosidad con los modelos de Maxwell, Kevin, Prandtl y Burgers (25) Para llegar a este tipo de modelación que permita la predicción de deterioro aún falta investigación, y por eso en este informe no los cubre en mayor detalle, pero sí reconoce que en el futuro a largo plazo la ingeniería de pavimentos debería orientarse a esas metodologías.

Queda claro de este capítulo que el SGP a implementar en este informe se debe fundamentar en principios probabilísticos-empíricos, desarrollando un programa de monitoreo similar al SHRP y LTPP norteamericanos, que permitan el salto a una metodología empírica que permita sustentar la implementación en el mediano plazo de modelos mecanísticos-empíricos como el AASHTO 2008 (MEPDG) y el QRSS.

Entonces se convierte en una prioridad fundamental de este programa de trabajo el entender el deterioro del pavimento, y para eso existen múltiples metodologías (funcionales y estructurales) y tasas de medición que pueden ser usadas para este fin. El siguiente capítulo cubre estas metodologías.

PRIORIZACIÓN DE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, los pavimentos se deterioran gradualmente debido a los efectos ambientales, cargas de tráfico y otros factores. Los recursos para el mantenimiento y reparación de carreteras pueden ser administrados eficientemente si el dinero es invertido en el momento y lugar correcto, conociendo las condiciones actuales de la red de pavimento y la velocidad de deterioro. Por ello, muchas entidades han reconocido los beneficios de la realización de inspecciones del pavimento para evaluar su condición existente asignar todos para su comportamiento (26)

Sin embargo, la adquisición de datos sobre condiciones del pavimento necesarias para su gestión puede resultar costosa y consumir mucho tiempo, por lo que es importante seleccionar las áreas de inspección de acuerdo a los recursos disponibles. La información sobre la cantidad de fallas que determinan la condición del pavimento puede ser medida o estimada de manera manual y automatizada. La definición de este enfoque de recopilación de datos se basa en las siguientes metodologías:

Medición de las condiciones del pavimento - La información de las fallas del pavimento son cuantificadas para calcular la condición del pavimento de acuerdo a la caracterización de los tipos de fallas y severidad, lo cual puede ser respaldado por mediciones específicas.

Estimación de los datos de las condiciones del pavimento - La cuantificación de las fallas son estimadas en función al criterio del inspector. Así, se observan las condiciones del pavimento y se clasifican en secciones, con o sin las estimaciones de las fallas.

Recopilación Manual de Datos - Esta recopilación de datos consiste en “procesos donde las personas se involucran directamente, observando y midiendo las propiedades del pavimento” (27) En las inspecciones manuales, las fallas son medidas desde un vehículo en movimiento (inspecciones parabrisas) o por caminantes en el pavimento.

Recopilación automatizada de datos - La recopilación automatizada consiste en “procesos que utilizan tecnologías de la imagen o equipos de sensores” (27) Estas tecnologías pueden estar equipadas por completo en unidades móviles o por separado en remolques.

De esta manera, para tener un SGP que se pueda mantener en el tiempo, es importante que los métodos de recopilación y análisis de datos sean seleccionados de acuerdo a los criterios técnicos y recursos económicos disponibles de la entidad local. Las siguientes secciones proporcionan detalles sobre algunas metodologías de inspección de pavimentos y sistemas de clasificación adoptados por los gobiernos locales de Estados Unidos.

A pesar de que existan variaciones entre las metodologías, los ejemplos muestran una gama de complejidades en términos de procedimientos de

inspecciones utilizadas en los SGP. A continuación se presentan métodos tanto de evaluación funcional como estructural.

Métodos de Evaluación Funcional

Índice de Serviceabilidad del Pavimento - PSI

Este concepto fue desarrollado durante el AASHO Road Test. Antes de este ensayo, no había una definición ampliamente aceptada de comportamiento que pudiera considerarse en el diseño de pavimentos. La inclusión de la Serviceabilidad como factor en el diseño de pavimento es una de las características más importantes de las metodologías empíricas desarrolladas a partir del AASHO Road Test (28)

La serviceabilidad actual (Present Serviceability) fue definida como la habilidad de una sección específica de pavimento de soportar tráfico mixto, de alto volumen y alta velocidad en su condición existente.

La calificación de serviceabilidad actual individual (individual present serviceability rating) fue definida como una calificación individual subjetiva de una sección específica de la Vía y que oscila entre 0 y 5. Del AASHO Road Test se determinó que un valor cercano del PSR - Present Serviceability Rating - al 2,9 significaba que el pavimento estaba en condición aceptable, mientras que un valor de 2,5 o menos correspondía a una condición inaceptable.

Luego, con las mediciones de campo de ahuellamientos, grietas, parches, entre otras, se generaron ecuaciones empíricas de PSI que tengan una correlación con el PSR obtenido. Así, el PSI es la cuantificación objetiva en base a datos reales de la medición subjetiva del PSR. Debido al cambio de condiciones, y las limitaciones del AASHO Road Test explicado anteriormente para las condiciones -de hoy (tanto en EEUU como en Perú), esta metodología ha entrado en desuso, sin embargo es importante mencionar porque es la precursora de todos los métodos a ser mostrados a continuación.

Índice de Condición del Pavimento (PCI)

La metodología de las inspecciones del índice de Condición del Pavimento (PCI) fue desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., aprobada por 121 American Publics Works Association - Asociación Americana de Trabajos Públicos y el ASTM Internacional, y documentada en el ASTM D6433, Método de prueba estándar para las inspecciones de condiciones de pavimentos de caminos y estacionamientos (29). La metodología PCI es un sistema de clasificación que mide la integridad del pavimento y las condiciones de funcionamiento de la superficie, basado en una escala de 100 puntos. De acuerdo a esta metodología, la red de pavimentos se mide por ramas (calles individuales), secciones (segmento de pavimento) y unidades de muestra de inspección.

Una unidad de muestra es un segmento seleccionado de pavimento de un tamaño requerido que se inspecciona a detalle. Por ejemplo, las unidades de

muestra son aproximadamente de 2500 ± 1000 pies cuadrados de superficie ($230 \pm 90 \text{ m}^2$) y, cuando se realizan inspecciones futuras, solo se selecciona un porcentaje de estas unidades al azar. Las inspecciones sobre las condiciones del pavimento se realizan mediante la identificación del tipo, severidad y cantidad de fallas de acuerdo a los procedimientos de muestreo sistemático.

Se han definido 39 tipos de fallas (20 para pavimentos de asfalto y 19 para pavimentos de concreto) y tres tipos de severidad (alta, media y baja) según el ASTM 2009 y luego en su actualización del 2011. Cada combinación de tipo de falla, severidad y extensión tiene un valor deducido asociado, el cual se determina mediante los gráficos disponibles para cada tipo de falla y encontradas en la norma ASTM. Las fallas consideradas como más perjudiciales para el pavimento (por ejemplo, grietas por fatiga) tienen valores deducidos mayores a las fallas menos críticas (por ejemplo, grietas transversales). Una vez que se determina el valor deducido de cada tipo de falla, se suman para obtener un valor total deducido de la unidad de muestra. Luego, este valor es ajustado de acuerdo al número de fallas registradas y se restan a partir de la puntuación perfecta de 100 para determinar el PCI de la unidad de muestra. Un promedio ponderado de todos los PCI de las unidades de muestras inspeccionadas es utilizado para representar las condiciones del pavimento. Muchos programas de SGP pueden calcular el valor del PCI en base a los datos de entrada registrados en el software, e inclusive existen diferentes empresas internacionales que han desarrollado equipos de alto rendimiento para la captura de información mediante sistemas de grabación de imágenes. Así por ejemplo, PASCO Corporation ha desarrollado un sistema desde 1960 denominado ROADRECON que permite operar y captar imágenes a 80 km/h y con tamaños de 5 m de ancho. Del mismo modo, el sistema francés GERPHO también permite la acumulación de información en una película de 35 mm que luego es extraída y analizada mediante una mesa especial de diseño (30).

Condition Rating Survey (CRS)

La CRS (o Relevamiento de Calificación de Condición) es usada por el IDOT (Departamento de Transporte de Illinois) para representar las condiciones del pavimento. Los valores del sistema de calificación comprenden un rango de 1,0 a 9,0, incrementado cada 0,1. Una calificación de CRS de 1,0 indica una falla total del pavimento, mientras que un valor de 9,0 de CRS, una superficie recién construida de pavimento. El resumen del sistema de clasificación se detalla a continuación:

Malo (1.0 S CRS S 4.5) — El pavimento es totalmente deficiente y necesita de una mejora inmediata.

Regular (4.6 S CRS S 6.0) — El pavimento se está acercando a una condición que probablemente requiera de una mejora a corto plazo.

Satisfactorio (6.1 S CRS S 7.5) — El pavimento está en el rango de condiciones aceptables a buenas condiciones y no necesita una mejora.

Excelente (7.6 S CRS 5 9.0) — E1 pavimento esta en excelentes condiciones.

Este manual fue desarrollado en abril del 2004 y proporciona varias imágenes de las clasificaciones de las fallas para ayudar al inspector a seleccionar adecuadamente un valor del CRS para la sección analizada. Es importante tener en cuenta que la metodología CRS es considerada como una inspección basada en mediciones, pero es utilizada como una metodología de estimación debido a que el manual contiene una serie de fotografías que muestran la variedad de condiciones del pavimento asociadas a un valor de CRS. Además, como IDOT ha desarrollado algoritmos para incorporar la medición de la rugosidad y ahuellamiento en el cálculo del comportamiento del pavimento, esta metodología solo es utilizada para inspeccionar carreteras estatales, pues no es aplicable para sistemas viales locales (26)

Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER)

PASER (o Calificación y Evaluación Superficial del Pavimento) es un sistema de clasificación visual de la condición superficial del pavimento en una escala de la 10, donde 1 representa un estado de falla y 10, un pavimento con excelentes condiciones. El procedimiento PASER se basa en una serie de fotografías y descripciones para cada categoría de clasificación y es utilizado por el inspector para evaluar el estado general de un segmento de pavimento.

La condición general de una calzada se determina número (ej., pavimento nuevo 0 en mal estado). Luego, las fallas del pavimento son evaluadas y el inspector selecciona la calificación apropiada como se indica en el manual. Los pavimentos, individualmente, pueden no tener todos los tipos de fallas que figuran en la clasificación, pero la descripción general debe coincidir con lo que se observa en campo. La escala de calificación PASER puede traducirse generalmente en las siguientes categorías de mantenimiento y reparación:

PASER 9 y 10 - No requiere mantenimiento.

PASER 8 - Poco o ningún mantenimiento.

PASER 7 - Mantenimiento de rutina (parches o sellados menores)

PASER 5 y 6 - Tratamiento de conservación (revestimiento del sellado)

PASER 3 y 4 - Mejoras estructurales y nivelación (superposición o reciclado)

PASER 1 y 2 - Reconstrucción

Las inspecciones periódicas son necesarias para proporcionar datos actuales y útiles de evaluación. El método recomienda que la calificación PASER sea actualizada cada dos años y, de ser posible, anualmente (31).

El Índice de Condición General - Overall Condition Index (OCI)

El OCI es una metodología que no solo se basa en el relevamiento de fallas como el PCI, sino que también incluye datos como la manejabilidad y el drenaje. Así, el OCI no es otra cosa que un promedio ponderado que toma en cuenta a los daños medidos en un 80%, y en 10% a la manejabilidad y el drenaje, respectivamente (32)

La calificación se divide en 5 categorías, con valores de OCI:

Muy pobres que requieren rehabilitación o reconstrucción total de 0 a 24.

Pobres, con necesidad de recapeo estructural de 25 a 47.

Promedio o Justos, requiriendo mantenimiento preventivo de 48 a 67.

Pavimentos en buen estados de 68 a 87 con necesidad de mantenimiento rutinario.

Pavimentos en excelente estado que no requieren actividad en el momento de evaluación que tienen valores OCI de 88 a 100.

Índice de Rugosidad Internacional (IRI)

Como se indicó anteriormente, el PSI se puede calcular con una ecuación que lo correlaciona ahuellamiento, agrietamiento y parches. Sin embargo, es el perfil longitudinal o también llamada rugosidad la que provee la mejor variable de correlación (33). Así, se pudo determinar que la correlación de PSR/PSI vs. Rugosidad mejoraba marginalmente (5%) con la inclusión de datos como el ahuellamiento o el agrietamiento. Por este motivo, muchas agencias dependen exclusivamente de la rugosidad para estimar el PSI.

Existen diversos métodos de rugosidad, tanto directos (perfilómetros) como indirectos (medidores de respuesta vehicular). Por ejemplo, el Maysmeter era el método indirecto utilizado en 48 de los 50 estados de los EEUU (34) e implementado por 22 agencias estatales en la década de los 80's. Sin embargo, un reciente estudio indica que en la actualidad 36 estados han virado al uso de perfilómetros, utilizando el IRI o Índice de Rugosidad Internacional como la unidad de medida de rugosidad directa, debido a su invariabilidad con respecto de factores como la presión de llanta, suspensión del vehículo, velocidad vehicular, etc., como si lo es el Maysmeter (28)

El IRI es producto del Experimento de Rugosidad de Caminos Internacional (International Road Roughness Experiment) realizado en Brasil en 1982 con el apoyo del Banco Mundial y the implementado en los EEUU en 1987 (28). El IRI resume el perfil superficial longitudinal en la huella de la llanta y se calcula en base a datos recolectado por un levantamiento topográfico o vía un perfilómetro mecánico que mide el perfil a unos 80 km/h. El IRI expresa la rugosidad en unidades de pulgadas sobre milla 0 de m/km.

Índice de Fricción Internacional (IFI)

La Asociación Mundial de Caminos solvento un estudio de armonización de los diversos métodos para medir fricción disponibles a 1992, en la cual participaron 16 países, incluyendo el estudio en 54 locaciones en EEUU y Europa, incluyendo 51 sistemas diferentes de medición. De este estudio resultó el IFI, que estandariza la dependencia de la fricción con respecto de la velocidad de la llanta (35)

Esto se hizo para entender y minimizar accidentes relacionados a hidroplaneo, tanto en carreteras como en pavimentos aeroportuarios. En Perú se realizan con mayor énfasis en los últimos, mientras que en el ámbito carretero, el avance en la medición de fricción es aún insipiente.

Métodos de Evaluación Estructural

Los métodos empleados para la evaluación estructural pueden ser destructivos o no destructivos, dependiendo del grado de alteración física producida a los materiales durante el proceso de evaluación (36)

Ensayos No Destructivos (NDT)

Los ensayos no-destructivos o NDT (Non-Destructive Testing) consisten en la medición de deflexiones superficiales, radio de curvatura, y otras características de respuesta superficial, que puedan ser utilizadas para determinar potenciales conductas de falla como la eficiencia en la transferencia de carga de las barras en los pavimentos rígidos, variables mecánicas como el módulo elástico, espesores de carpetas de rodadura y presencia de vacíos significativos debajo de losas de concreto.

En este reporte solo se cubren aquellos NDT que analizan la condición general del pavimento, y en base al tipo de carga que se aplican se pueden clasificar en tres tipos: cargas estáticas o de movimiento lento, vibración constante, y cargas de impulso (28).

NDT Estáticos

En esta categoría los aparatos más utilizados son:

La viga Benkelman (el usado por preferencia en el Perú)

El deflectómetro LaCroix.

El deflectómetro de California.

Desarrollada en 1952 por A.C. Benkelman de la Western Association of State Highway Organizations (WASHO) Road Test, esta viga tiene denominación ASTM D4695 y AASHTO T256 y consiste en una probeta de medición (measurement probe) amarrada a una viga de referencia (support beam) apoyada por tres patas como se ve en la Figura 3.

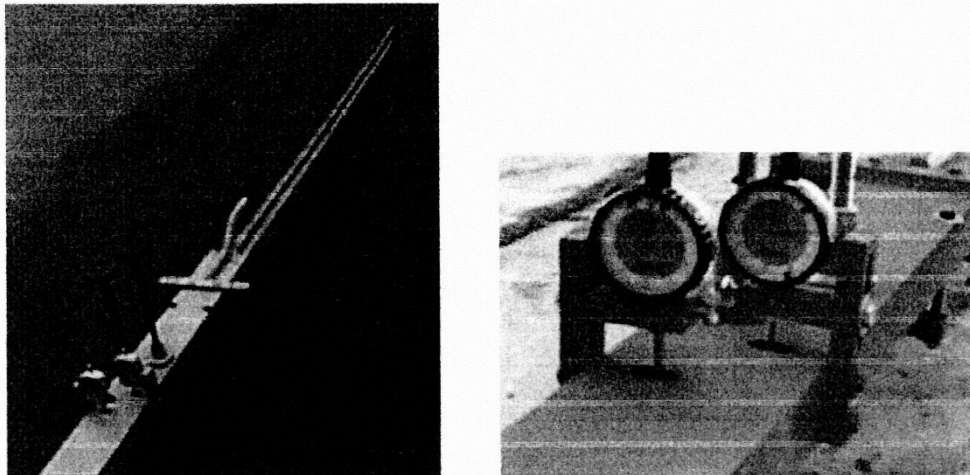


Figura 3. Viga Benkelman y Diales de Medición

La deflexión en un lado de la probeta se mide del otro lado de la misma. La probeta se coloca entre las llantas traseras duales de eje simple de un camión cargado, normalmente que pese 18-kips. La deflexión de rebote de la probeta se mide cuando el camión se mueve lentamente. En base a ecuaciones predeterminadas, y tomándolo con tiempo (el proceso es lento) se puede determinar el perfil de un pavimento.

Este método es ampliamente utilizado y conocido en la comunidad pavimentera peruana, sin embargo, como grandes desventajas se reconocen que es difícil tener una referencia inmóvil para las medidas de deflexión, por más que el vehículo se mueva muy lento; además que las cargas lentas no son representativas de las cargas e impulsos provocados por el tráfico pasante y que por lo tanto, no pueden ser aplicadas directamente a un método mecanístico o mecanístico-empírico de diseño de pavimentos.

NDT de Vibración Constante

El Dynaflect y el Road Rater son los dispositivos más conocidos de este tipo. Las deflexiones son generadas por equipos vibradores que imponen cargas sinusoidales a una carga estática, para siempre asegurar que hay una carga aplicada sobre el pavimento. Sensores de velocidad o aceleración se aplican directamente debajo de la carga y a distancias específicas como a cada 30 cm. Sin embargo, problemas con el método incluye el hecho de que las cargas aún no son representativas, a pesar de que el problema del sistema referencial si se soluciona a comparación de la metodología anterior. La Figura 4 muestra diversos equipos y la configuración típica, que como gran paso tecnológico tiene el haber eliminado la necesidad del trabajo manual en la evaluación y medición de carga.

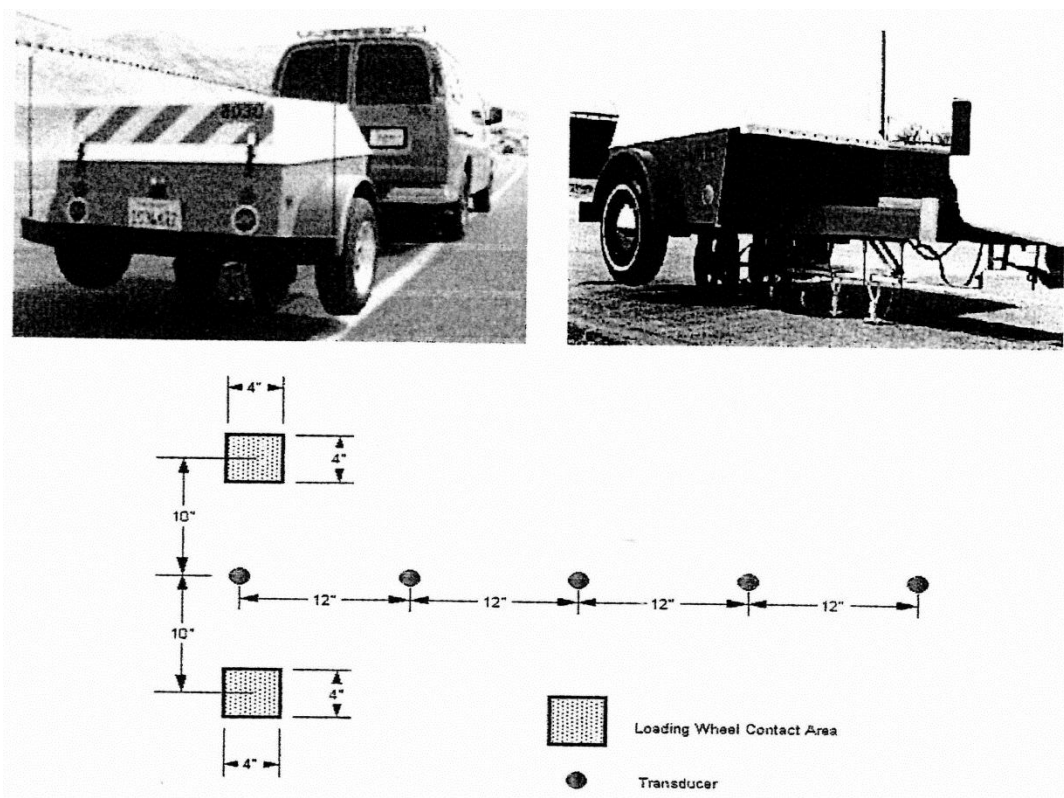


Figura 4. Configuración y Equipos de NDT Vibratorio Constante (3 7)

NDT de Cargas de Impulso

Son ensayos que se realizan con equipos que emiten fuerzas de impulso en la superficie del pavimento. En esta categoría se encuentran los Deflectómetro de Impacto o FWD (Falling Weight Deflectometers). Al cambiar el monto del peso y la altura de caída, diferentes fuerzas de impulso se pueden generar. Siguiendo la tecnología de los equipos de NDT de Vibración constante, su operación es simplificada de la siguiente manera:

Se mueve el equipo al lugar del ensayo

Se baja la placa de carga y medidores hidráulicamente, eliminando así la mano de obra como en la viga Benkelman.

Se realiza el ensayo bajando la carga según lo especificado, y estas cargas si son representativas de las cargas experimentadas por el pavimento, a diferencia de las cargas de vibración estáticas.

Se miden las deflexiones y al finalizar se levanta el equipo y se procede a mover al siguiente punto de prueba. Los resultados son almacenados en una computadora y se evitan los errores humanos de transferencia de información.

Dynatest, KUAB y Phoenix son las empresas más reconocidas que proveen equipos de FWD, HWD (deflectómetro pesado para aeropuertos o carreteras de carga pesada) y LWD (deflectómetro ligeros que sirven para capas granulares o capas muy finas).

Ensayos Destructivos

En evaluaciones destructivas se perfora el pavimento para determinar su espesor, el estado de agrietamiento, densidad, humedad, segregación, condición in-situ de las capas granulares, etc. y se obtienen muestras que serán luego ensayadas en el laboratorio. En este documento no se cubren dichas tecnologías porque estas ampliamente explicadas en manuales de procesos constructivos, como [05 del MTC.

Priorización de Métodos de Evaluación

Como se puede resumir de este capítulo, existe una gran variedad de métodos para la evaluación de pavimentos, tanto en calidad, precisión y precio. En el Perú, la práctica ha llevado que se utilicen o soliciten métodos como la viga Benkelman (clásico) y el IRI (más actual), con algún uso del PCI con toma de datos manual.

Para el SGP ha implementarse en las entidades locales, municipales y regionales, debe de tenerse en cuenta el grado de precisión que se desea obtener, la cantidad de fondos disponibles, la amplitud del sistema, las condiciones de tráfico, entre otras variables, para empezar con el inventario y posterior monitoreo. Se recomienda que se escoja un método de amplio alcance y bajo presupuesto que permita hacer una primera evaluación general del sistema, para luego ir suplementando la información según la necesidad con mediciones más complejas, y por lo tanto, costosa. De esta forma se irá elaborando la base de datos que se requerirá eventualmente para dar los saltos de SGP probabilísticos, a SGP empíricos y eventualmente a SGP mecánicos -empíricos.

Así, se recomienda el uso de las siguientes evaluaciones en orden de prioridad, basados en los costos para realizarlo, la experiencia necesaria de realizarla, la disponibilidad de recursos humanos o equipos automatizados para realizar el trabajo y el tamaño y tráfico del sistema:

Evaluación Funcional con 61 PCI.

Evaluación Funcional con los perfilómetros que resultan en valores IRI.

Evaluación Funcional de fricción usando el valor de IFI, donde se requieran como en pavimentos aeroportuarios o de similar condición en las carreteras o Vías urbanas.

Ensayos No Destructivos que pueden ser con la viga Benkelman por su uso extendido en el Perú. Sin embargo, se recomienda abandonar este método porque no es aplicable a métodos mecánicos-empíricos, como Si 10 son los métodos con equipos FWD, HWD, y LWD.

Evaluación Destructiva

Esta no es una lista obligatoria, más si una recomendación. Lo que si, por uniformidad el dato inicial de medida de condición del pavimento se recomienda sea medida en unidades PCI o Pavement Condition Index, y más aún, se recomienda que esta norma ASTM sea reglamentada bajo denominación N.T.P. con variaciones locales en el Perú, para considerar daños que no estaban contemplados en la norma norteamericana.

Definida la variable de caracterización de deterioro, lo que se requiere es cubrir los diversos programas de computadora que existen en la literatura para poder analizar la información obtenida con los métodos de medición tratados en este capítulo, así como también la presentación de los sistemas para la toma de decisiones por las autoridades correspondientes.

Evaluación de Softwares de Gestión de Pavimentos

Como parte de este informe, una variedad de programas de software para la SGP ha sido investigada. Los programas son desarrollados normalmente con el apoyo de entidades estatales o federales norteamericanos, universidades, consultoras o empresas de software y su costo varía entre gratis (condicional) a precios elevados.

Además, los productores de estos programas ofrecen servicios como apoyo en la implementación del software, inspecciones de las condiciones del pavimento, entre otros.

Las siguientes secciones presentan detalles sobre las características y costos algunos softwares disponibles en el mercado norteamericano. Se termina el resumen de estos programas con el método comúnmente usado en el Perú, que es la metodología del HDM III y HDM IV.

MicroPAVER

MicroPAVER fue desarrollado a mediados de 1980 por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU (US Army Corps of Engineers, USACE) para ayudar al Departamento de Defensa a gestionar el mantenimiento y reparación de su inventario de pavimentos (3 8). Los principales partidarios de MicroPAVER son las Fuerzas Aéreas de EE.UU, el Ejército de EE.UU, la Marina de EE.UU, la Administración Federal de Aviación (FAA) y la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Los clientes de MicroPAVER incluyen más de 600 organismos y empresas de consultoría MicroPAVER es una herramienta de

decisiones para el desarrollo efectivo de mantenimiento y reparación de carreteras, canes, estacionamientos y campos de aviación.

Este software permite el almacenamiento y creación de inventario de una red de pavimentos, clasificación de las condiciones del pavimento, comportamiento del pavimento según sus proyecciones de desarrollo, análisis de las proyecciones de las condiciones del pavimento, y determinación de las necesidades de mantenimiento y reparación a través del análisis de distintos escenarios de presupuesto (3 8).

Por ello, el inventario de MicroPAVER consiste en las relaciones entre la red, ramas y secciones del pavimento. Además de los campos de datos estándar, el inventario tiene campos definidos por el usuario para satisfacer sus necesidades específicas de gestión y la información sobre las condiciones del pavimento pueden ser actualizadas automáticamente en función a la información del historial de trabajo especificado por el usuario. Los datos de la inspección de campo (tipo de falla, severidad y cantidades) pueden ser registrados en MicroPAVER para calcular el PCI e indicar la condición del segmento de pavimento. Asimismo, se puede ingresar 31 software imágenes y comentarios sobre la sección inspeccionada.

La modelación de las proyecciones en MicroPAVER permite identificar grupos de pavimentos con características similares (“familia de pavimentos”) como tráfico, clima y otros factores que influyen en el comportamiento del pavimento. Estos modelos utilizan la información del historial de las condiciones del pavimento. De esta manera, los análisis con MicroPAVER permiten examinar los cambios en las condiciones del pavimento mediante la comparación de la información de inspecciones pasadas y presentes, familias de pavimentos, y fechas de últimas construcciones para determinar la efectividad de las estrategias de mantenimiento y reparación. Las futuras condiciones sin ningún tipo de mantenimiento también son estimadas. Finalmente, estos resultados pueden ser observados en un mapa del Sistema de Información Geográfica (GIS) junto con tablas y gráficos adjuntos en el reporte para los modelos de proyecciones de las condiciones, tal como se muestra en la Figura 5.

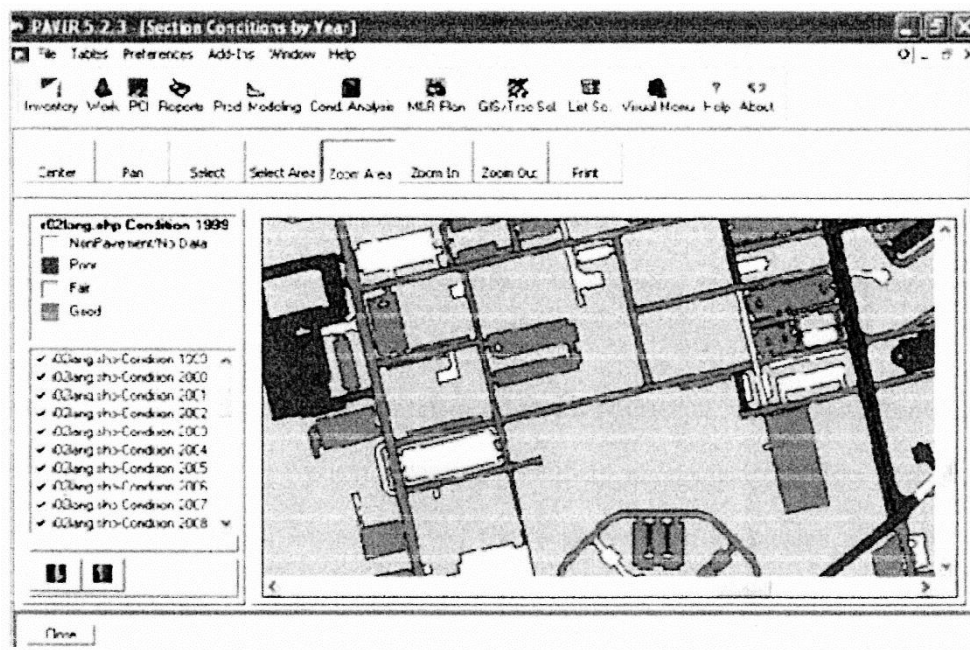


Figura 5. Análisis de las condiciones del pavimento y resultados de la planificación de trabajos en el software Micro PAVER (38)

La planificación de mantenimiento y reparación permite analizar el cronograma de trabajo, presupuesto, alternativas de mantenimiento y estrategias de reparación. Los planes de trabajo son especificados de acuerdo a las necesidades del usuario, quien se encarga de especificar las prácticas para la gestión del pavimento y costos. Además, hay cinco herramientas de reporte en MicroPAVER, incluyendo las tablas de resumen, reportes estándar, reportes de re-inspección, reportes definidos por el usuario y reportes del GIS. Las tablas de resumen permiten graficar y comparar dos variables en la base de datos, y los reportes estándar incluyen los listados de segmentos, historial de trabajo, condiciones del segmento y reportes de las condiciones de la sección inspeccionada (38)

RoadSoft GIS

Ese programa fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Transporte de Michigan en la Universidad Tecnológica de Michigan y ha sido utilizado en todo el estado por más de 10 años. Los clientes de RoadSoft GIS incluyen al Departamento de Transporte de Michigan, la FHWA, más de 200 ciudades y localidades, y casi 100 organismos de carreteras en Michigan y todo EEUU.

RoadSoft es capaz de almacenar información sobre las carreteras: señaléticas, alcantarillas, barandas, marcas en el pavimento, conteos de tráfico, entre otros. Para cada característica, además de la información relativa, se pueden almacenar los siguientes criterios:

- Ubicación con referencia lineal o en coordenadas GPS.
- Descripción física

Información sobre su construcción, mantenimiento, inspección y clasificación.

El módulo de SGP de RoadSoft permite clasificar las superficies del pavimento según el sistema de calificación PASER. Para ayudar en la recopilación de datos, se puede configurar una computadora con localizador GPS con RoadSoft GIS para permitir el registro de información mientras se inspecciona la calzada. En caso de utilizar el sistema PASER y la computadora con GPS, las inspecciones pueden realizarse en un vehículo que se desplace entre 15 y 30 mph. La Figura 6 muestra la pantalla de entrada de datos de RoadSoft para el módulo de un inventario vial (26, 39)

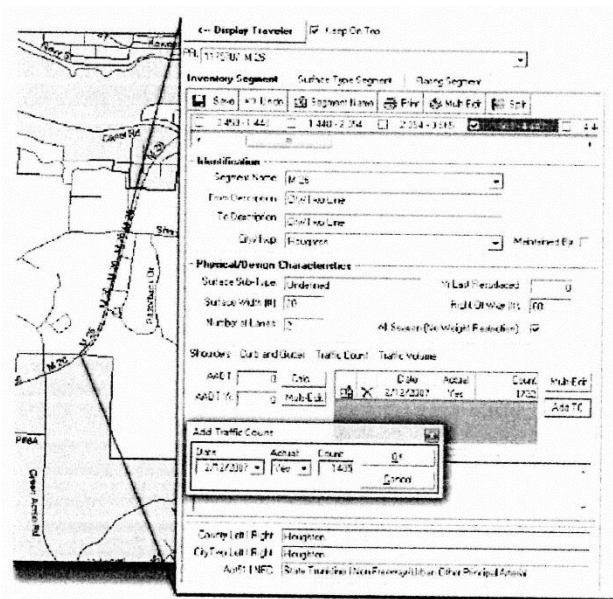


Figura 6. Interfase del módulo de inventario vial (26, 39)

El módulo de inventario vial permite al usuario introducir información sobre aspectos legales, características físicas y estado de la calzada. Los segmentos de carreteras en la base de GIS pueden estar Vinculados a los datos de la inspección, historial de construcción, volumen de tráfico, mantenimiento programado, así como a los datos del inventario. Cuando un índice se introduce al programa, se genera un modelo de deterioro para determinar la vida útil restante del pavimento. Este modelo utiliza la calificación de deterioro y tipo de superficie para generar una vida útil esperada del segmento y determinar cuando este sector alcanzara el umbral de mantenimiento crítico.

Por ello, el módulo de evaluación estratégica de RoadSoft permite al usuario determinar el plan de mantenimiento de la red vial basada en diferentes tipos de superficie. Además, en este módulo, el usuario puede definir los tratamientos de mantenimiento en dólares o millas de carriles durante la duración del plan para generar graficas basadas en estos tratamientos, mostrando el dinero gastado, porcentaje de condiciones del pavimento, comportamiento de las millas de carriles y vida útil promedio para cada año del plan. Algunos ejemplos de estos gráficos se muestran en la Figura 7.

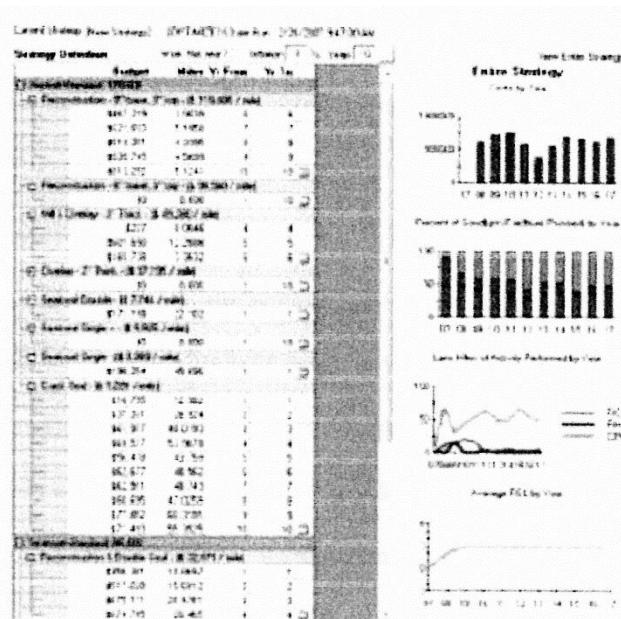


Figura 7. Módulo de Evaluación de Estrategias (26, 39)

RoadSoft GIS tiene más de 50 reportes estándar para cada tipo de característica vial y puede generar una serie de informes personalizados mediante la herramienta de filtro. Los datos de los informes generados pueden ser exportados para su uso en otros programas y todo archivo en GIS puede ser exportado a otras aplicaciones de este sistema.

Utah LTAP TAMS

El Transportation Asset Management Software (TAMS) fue desarrollado por la Utah Local Technical Assistance Program (LTAP) de la Universidad Estatal de Utah (40). El software TAMS permite a las agencias locales de Utah, de forma gratuita, el mantener, preservar y mejorar sus calles y caminos. TAMS incluye una interfase GIS que permite al usuario seleccionar las características individuales de transporte. Se puede acceder manualmente a todas las opciones o usando la interfase GIS. En el principal formato de inventario, los usuarios pueden agregar, cambiar y consultar los datos relacionados a una característica específica. Este módulo es capaz de almacenar más de 20 atributos físicos con las condiciones de falla del pavimento. A partir de este inventario, el resultado del nivel de servicio o vida útil restante, y el tratamiento recomendado pueden ser determinados en base a las necesidades de la entidad encargada.

El usuario es capaz de aplicar un tratamiento virtual o múltiples tratamientos a cualquier parte de la red vial, y ver el rendimiento general y costos asociados. El usuario también puede añadir futuras fechas de proyectos sobre trabajos de mantenimiento y rehabilitación, y el programa calcula automáticamente la nueva vida útil restante del segmento.

El TAMS es capaz de realizar consultas personalizadas y crear reportes personalizados que pueden ser exportados a Microsoft Word o Excel. Además, hay varios reportes predefinidos para los datos de condiciones, datos de inventario y recomendaciones de tratamiento. Los gráficos circulares están disponibles para comparar los criterios como fallas principales, clasificación funcional y Vida de servicio restante. El usuario también puede crear gráficos de rendimiento que comparen las condiciones del pavimento y tratamientos aplicados para determinar el uso óptimo de recursos. Algunos pantallazos de la referencia se incluyen en la Figura 8.

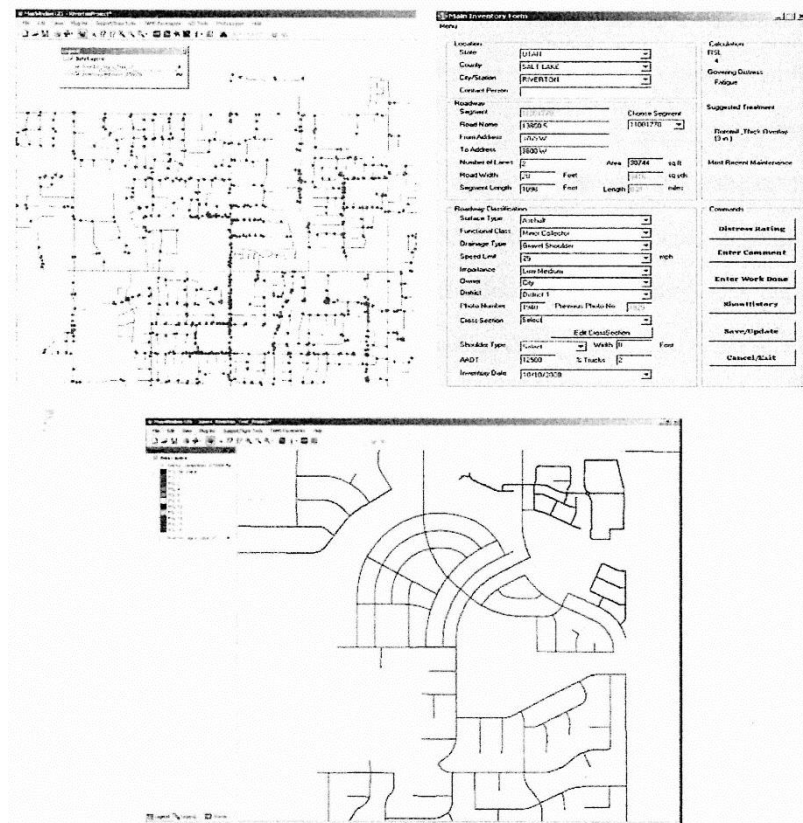


Figura 8. Pantallazos del Utah LTAP TAMS (40)

4.4. StreetSaver

StreetSaver fue desarrollado por la Metropolitan Transportation Commission (Comisión Metropolitana de Transporte, MTC), institución para la planificación de transporte, financiamiento y coordinación de los nueve condados en el área de San Francisco, California (41). StreetSaver ha sido utilizado durante más de 20 años por más de 100 usuarios en San Francisco y más de 250 usuarios en todos los EEUU y a nivel internacional.

Este software utiliza el PCI modificado como el método para la calificación de la condición de la superficie del pavimento. El PCI en StreetSaver es calculado en base a siete tipos de falla y tres niveles de severidad. Por ejemplo, las fallas para pavimentos flexibles incluyen la piel de cocodrilo, las fisuras por bloque, distorsiones, fisuras longitudinales y transversales, parches y acometidas por servicios públicos, ahuellamiento y depresiones, y desgaste y desprendimiento (peladuras por intemperismo). Una vez que el PCI ha sido determinado, StreetSaver genera una curva de deterioro, tal como se muestra en la Figura 9.

StreetSaver también permite al usuario realizar análisis basados en presupuestos con restricción. Los análisis de presupuesto requerido permiten conocer el monto necesario de dinero para garantizar un predeterminado nivel de condición del pavimento. Por ello, los análisis de escenarios consideran un grupo de secciones de pavimentos recomendadas para un tratamiento basado en los presupuestos especificados por el usuario. El programa es capaz de almacenar múltiples escenarios presupuestales, los cuales pueden ser comparados de acuerdo a las condiciones de la red de pavimentos y las restricciones de los diferentes presupuestos. El análisis basado en eventos permite al usuario comparar los diferentes impactos causados por eventos como los tratamientos de mantenimiento en un segmento de pavimento. El análisis de selección de proyectos permite al usuario designar segmentos de la red Vial para ejecutar escenarios específicos personalizados según los programas de rehabilitación.

StreetSaver tiene 30 reportes y gráficos estándar, así como, un asistente de reportes personalizado que permite construir reportes individualizados. Finalmente, otros productos opcionales desarrollados por las empresas consultoras están disponibles a un costo adicional (por ejemplo, vínculos GIS, módulos de vista y recopiladores electrónicos de datos).

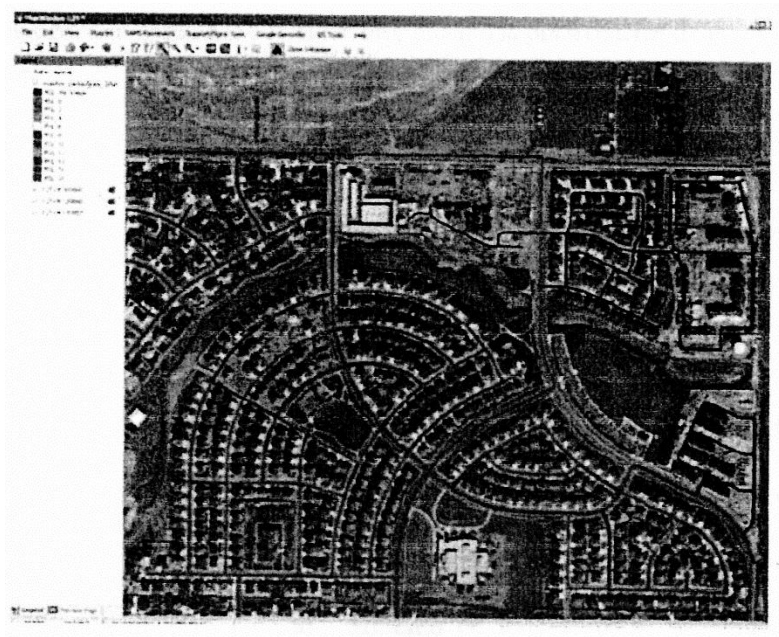


Figura 9. StreetSaver – curvas de deterioro (41)

4.5. PAVEMENTview y PAVEMENTview Plus

PAVEMENTview y PAVEMENTview Plus fueron desarrollados por Cartegraph, ubicada en Dubuque, Iowa (42). El software PAVEMENTview es un componente del sistema Cartegraph que permite a los usuarios gestionar los pavimentos mientras que los otros programas solo permiten a las organizaciones la posibilidad de supervisar una variedad de características (señaléticas, marcas en el pavimento, puentes, aguas pluviales, alcantarillado, agua, luces, entre otros). PAVEMENTview incluye un módulo de inventario de tramos de carretera y bases de datos para la clasificación, tipo/dimensión/material, estructura y detalles de la geometría de cada segmento de pavimento. PAVEMENTview Plus permite la posibilidad de crear las siguientes opciones:

- Escenarios de planificación de mejoras capitales

- Modelación del comportamiento del nivel de la red vial y segmento

- Cronograma de requerimientos de presupuesto

- Árboles de decisión definidas por el usuario según las preferencias de mantenimiento.

- Cálculos de calificación de la red principal para los segmentos de carretera que pueden utilizarse para priorizar los planes de trabajo.

- Matriz de decisión política de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción creada por los usuarios.

En PAVEMENTview, el usuario puede introducir datos de las condiciones de cada unidad de muestra inspeccionada en un segmento de carretera. Las bibliotecas de fallas en línea con imágenes e información de fallas están disponibles para ayudar en la recopilación de datos. Después de introducir todos los datos de inspección en el programa, el Índice General de la Condición (OCI) de un segmento de pavimento es calculado. El futuro rendimiento de dicho segmento es determinado y se estima la vida útil restante. Después de calcular la vida útil restante, las actividades de mantenimiento rutinario y periódico pueden ser programadas en el software y los registros históricos de la actividad pueden almacenarse.

PAVEMENTview tiene opciones para personalizar el programa según las necesidades del usuario. El usuario puede cambiar el nombre de los campos, crear formularios personalizados, añadir campos personalizados para realizar un seguimiento adicional de la información. Para una personalización adicional, la empresa puede adjuntar documentos de fotos digitales, archivos electrónicos y CAD (diseño asistido por computadora) a los registros individuales.

PavePro Manager

PavePRO Manager es un software de gestión de pavimentos desarrollado por Infrastructure Management Services (IMS), una empresa privada de consultoría (43). Este programa proporciona un inventario vial, integración al GIS e imagen visual digital, reportes funcionales y escenarios presupuestales. Además, almacena la información de las fallas del pavimento, rugosidad, ahuellamiento, condiciones de bermas, drenaje y condiciones ambientales. El usuario es capaz de añadir un módulo para el almacenamiento de imágenes digitales y, dentro de este módulo, el usuario puede cargar una secuencia de imágenes fijas o archivos de videos digitales que pueden estar asociados con una determinada calle, segmento de vía o componente.

El inventario de la base de datos de PavePRO almacena información para los segmentos o secciones de bloque. Este inventario incluye nombres de calles, límites, tipo de pavimento, longitud, ancho del campo, entre otros. Cada atributo puede ser utilizado para ordenar y filtrar los datos. Asimismo, mediante la integración con ArcView GIS, el usuario puede generar mapas o realizar consultas en cualquier campo de información de la base de datos de la gestión del pavimento. Un usuario puede definir o modificar cualquier parte de la red y, aun así, mantener el vínculo con GIS.

Al realizar el análisis de la red de carreteras, PavePRO considera la superficie de falla, tráfico, carga de camiones, rugosidad, ahuellamiento, drenaje, cunetas y alcantarillas, y las condiciones del clima. Así, el análisis realizado por el software esté basado en la vida útil restante evaluada, la cual ayuda a estimar las necesidades de rehabilitación e inversión para un determinado periodo. El análisis también incluye indicadores sobre la forma en que el pavimento puede responder a las cargas y Como puede comportarse con las diferentes opciones de rehabilitación o mantenimiento. Para determinar las estrategias de rehabilitación y mantenimiento, el software analiza diez estrategias para cada año de análisis y selecciona la opción que presenta el mayor beneficio para la red. El usuario puede definir el presupuesto anual y las estrategias de rehabilitación son entonces seleccionadas en base a la relación costo-beneficio, o el usuario puede definir un nivel de servicio y luego seleccionar la estrategia de mantenimiento o rehabilitación óptima.

El software también permite evaluar, almacenar y recuperar varios escenarios condicionales. Los reportes generados por PavePRO son personalizados por el usuario y pueden ser exportados a un número de diferentes aplicaciones, tales como Microsoft Excel. El programa puede ser utilizado con la información recopilada por dispositivos automatizados de recolección, o por inspecciones manuales y actualizaciones.

PAVEAir

La Administración de Aviación Federal (FAA) norteamericana ha desarrollado el PAVEAir, un programa de dominio público gratuito y basado en una aplicación en línea que ayuda a las organizaciones en la evaluación, gestión y mantenimiento de sus pavimentos. El PAVEAir está diseñado para satisfacer

los requerimientos de los SGP aeroportuarios como se define en la Advisory Circular (AC) 150.5380-7A. Características importantes de este programa son el tener un módulo de mantenimiento y rehabilitación, un módulo de análisis costo-beneficio y apoyo del programa MicroPAVER explicado en secciones anteriores. La Figura 10 muestra un ejemplo de la interfase posible con este programa, que fue desarrollado con visión aeroportuaria, pero permite su aplicación a pavimentos carreteros.

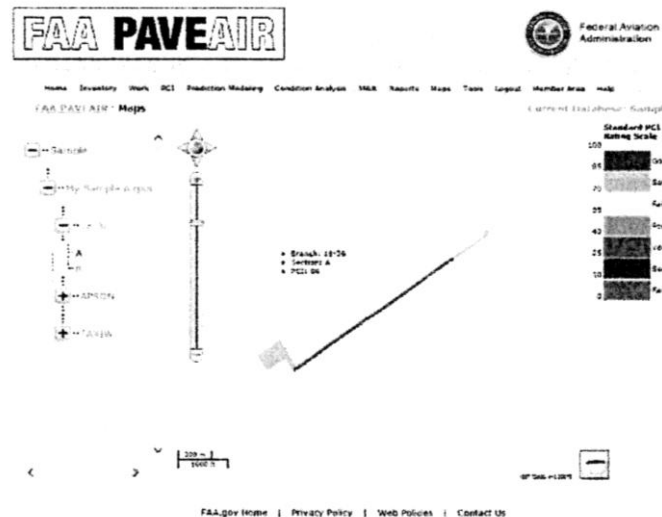


Figura 10. Ejemplo de interfase y resultados con programa FAA PaveAir (44)

4.8. HDM 111 y HDM IV

En 61 Perú, la Ley marco N° 27293 crea el Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) que reglamenta la evaluación económica de proyectos viales a ser aplicado en todas las entidades y empresas del sector público no financieros que ejecuten proyectos de inversión con recursos del Estado (45). La ley recomienda el uso del Model HDM, el cual permite el cálculo de los costos de los usuarios en la vía para situaciones de mantenimiento pre-establecidas, de cuya comparación se logran los beneficios que sustentaran la aceptabilidad del proyecto, al ser comparados con la inversión y sus respectivos costos de mantenimiento.

El HDM contiene módulos de caracterización del tráfico, de caracterización de los costos y procesos de construcción, módulos de deterioro y mantenimiento, y módulo de análisis costo-beneficio. Para el concepto de SGP, el modulo más importante es el de deterioro y mantenimiento, que se basan en estudios empíricos realizados en Brasil por Geipot en 1982 y Paterson en 1987 (45). Hay que entender entonces, que como toda relación empírica, la extrapolación fuera de las condiciones del análisis inicial trae errores que pueden o no ser significativos en las predicciones de comportamiento futuro, y por lo tanto en el análisis de costos beneficios que son tan usados de la metodología HDM. Así, a pesar de ser el método recomendado por la ley marco del SNIP, debe

tenerse claro que estos análisis tienen errores intrínsecos que se deben tener en cuenta y que eventualmente deberían ser sobrepasados.

Se resume de estos análisis de diversos software disponibles que:

Se puede realizar el SGP con una o varias unidades de medición, y que se puede usar el dato recomendado en la norma, o que se pueden adaptar a las necesidades de la agencia que utiliza el programa. Así, la característica de adaptación es importante en cualquier programa de SGP.

Dependiendo de la necesidad y disponibilidad, un programa de SGP puede incluir el inventario de elementos adyacentes a los pavimentos como son las alcantarillas, señaléticas, barandas, veredas, marcas, etc. Sin embargo, esta característica puede ser omitida en un inicio, e implementada eventualmente, según la necesidad de la agencia, nuevamente mostrando la adaptabilidad del programa.

Los modelos de deterioro pueden o no estar claramente definidos en el uso del programa. Sin embargo, es claro que la extrapolación de dichos modelos a ciegas traerá errores que pueden ser contraproducentes con las predicciones de deterioro. Por eso, es importante que el programa tenga el modelo de deterioro bien definido y que sea variable o calibrable para condiciones locales, si es que se tienen los datos para realizar dichas tareas.

Los SGP deben ser lo más gráficos posibles en la entrega de los resultados. Así, deben incluir la capacidad de graficar la tendencia de costos (graficas de líneas, barras, etc.) y la localización de los pavimentos, generalmente realizado con capacidades GIS, Google Earth o similares. Además, debe ser capaz de proveer comparaciones de varias opciones para el análisis de los encargados de la toma de decisiones, y proveer reportes ya sea en formato MS Word o MS Excel.

Estas recomendaciones serán fundamentales para el desarrollo de un SGP en el Perú.

5. Características de SGP para Pavimentos Urbanos en el Perú

Se puede concluir de las secciones anteriores que en el Perú la normativa referente a mantenimiento de pavimentos esté referida a las acciones concretas de mantenimiento, y se muestra de forma conceptual la importancia de evitar la generación de daños en los pavimentos, dando algunos valores límites (IRI, ahuellamiento, baches, deflexiones, entre otros), pero aplicándolo a un ámbito más de proyecto que a un análisis amplio de un sistema, ya sea la longitud lineal de una concesión carretera, o la conjunción de pavimentos en una jurisdicción como lo puede ser un municipio distrital o provincial; y no profundizan en el tema de la planificación, la sustentación y la toma de decisiones.

Es por esto que este capítulo provee un resumen de las principales características que deberá tener el SGP para los pavimentos urbanos en el Perú administrados por las municipalidades y gobiernos locales, que tendría aplicación directa en todos los pavimentos bajo la jurisdicción del MVCS (estimados 130,000 Km) y además en las vías concesionadas y no concesionadas del MTC. Su aplicación directa es a los caminos pavimentados e incluye la pavimentación progresiva de la red no pavimentada.

El SGP deberá cubrir los siguientes aspectos:

Inventario del sistema vial, que incluya la clasificación de vías pavimentadas y no pavimentadas; pavimentadas flexibles, rígidas y compuestas; no pavimentadas afirmadas o estabilizadas; funcionalmente entre vías expresas, arteriales, colectoras o locales; con alto, medio o bajo tráfico; entre otras clasificaciones.

Inspección del sistema vial, a ser realizada inicialmente con el método del PCI. Este método ha sido escogido por su fácil aplicación, bajo costo y objetividad, y pensando en la magnitud de los pavimentos a relevar en todo el país (cerca de 130 000 Km urbanos - estimado). Sin embargo, también se indica que se pueden usar otros métodos adicionales que suplementen la información, según la disponibilidad de fondos y equipos.

Clasificación del Sistema Vial, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM o según las necesidades de la entidad de gestión, variando desde valores PCI o (colapsado) a 100 (excelente). Esto se puede ver claramente en la Figura 11.

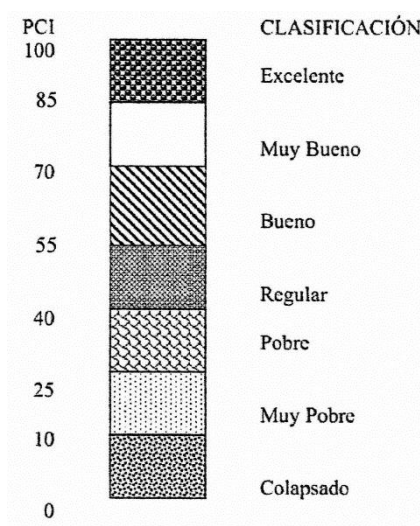


Figura 11. Escala de PCI sugerida por ASTM 6433-11 (traducido, 29)

Se reconoce que esta metodología solo se reduce a vías pavimentadas y tal vez existan condiciones en el Perú que la norma no contempla y deberá esto ser evaluado más adelante con investigaciones nacional, regionales y/o locales que permitan eventualmente llevarlo a nivel de N.T.P., pero para cubrir la clasificación de vías no pavimentadas, se recomienda que el PCI de estas vías sea fijado en un valor de 25 (muy pobre). Puede suceder que en algunas ocasiones alguna vía no pavimentada tenga una transitabilidad inclusive mejor que una vía pavimentada fallada, pero esto se sabe no se sostendrá en el tiempo a menos que se mantenga la condición de la vía no pavimentada, y por lo tanto se fija este valor de 25. Sin embargo, si el evaluador cree conveniente que este valor deba subir, lo puede hacer según su experiencia y entendiendo que valores altos de PCI pueden posponer la pavimentación de esta vía. Más aún, si los valores de la vía no pavimentada son peores que PCI=25, también lo podría indicar con este valor designado.

Más aun, los valores mostrados en la Figura II, según la economía y necesidad de la jurisdicción, podría ser cambiada, como indicaron algunos programas de software en el capítulo respectivo.

Así, la Tabla 4 muestra un ejemplo de resultados de cuantificación de secciones de cualquier jurisdicción en el Perú.

Tabla 4. Ejemplo Hipotético de Cuantificación y Clasificación de Secciones

Condición	Vías Expresas	Vías Arteriales	Vías Colectoras	Vías Locales	Todo el Sistema
% en Jurisdicción	5%	15%	35%	45%	100%
Excelente	30%	10%	5%	5%	7.00%
Muy Bueno	40%	20%	10%	5%	10.75%
Bueno	20%	15%	15%	10%	13.00%
Regular	10%	20%	20%	10%	15.00%
Pobre	- -	10%	15%	15%	13.50%
Muy Pobre	- -	20%	25%	35%	27.50%
Colapsado	- -	5%	10%	20%	13.25%

Esta tabla puede ser conseguida para todo tipo de pavimento, o puede ser segmentado para pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos compuestos (la jurisdicción respectiva debería determinar donde se colocarían las vías no pavimentadas, siendo lo más probable que se coloquen en el tipo que se usaría para la pavimentación).

Determinación del Tipo de Mantenimiento a los Pavimentos del Sistema Vial, a ser realizada siguiendo los diversos manuales disponibles del MT C, y la literatura en general, bajo la denominación de mantenimientos rutinarios, preventivos, periódicos y/o correctivos. Según la clasificación realizada en el ítem previo, el SGP deberá tener una recomendación de qué hacer con los pavimentos, como el que se muestra en la Tabla 4 basado en experiencias norteamericanas para el tratamiento de

pavimentos según la clasificación PCI mostrada en la Figura 11 y la denominación usada en el Perú (rutinarios, correctivo, etc.). Nótese que se proponen actividades para todas las clasificaciones con excepción a la condición regular. La experiencia ha podido determinar que existen condiciones de deterioro tales que gastar en mantenimiento puede llegar a ser contra-productivo y por lo tanto, pavimentos que presenten PCI de 40 a 55 es mejor que se dejen deteriorar a condiciones de rehabilitación mayor, y por eso no se propone actividad de mantenimiento alguna.

Estimación de Recursos para realizar los mantenimientos seleccionados, y este dato es netamente local ya que los costos de reparación, mantenimiento y construcción varían según los recursos locales, y por lo tanto variarían en costa, sierra y selva; norte, centro y sur del país. Estos costos deberán llevarse a costo unitario por m² de pavimento para que puedan tomarse las decisiones respectivas, clasificándolo según la Tabla 5. La Figura 12 (PCI vs Tiempo con costos en \$/pie²) muestra un ejemplo de cómo podría realizarse esto, pero como se indicó anteriormente, esto tiene que realizarse de manera local. Finalmente, para la toma de decisiones, la SGP debería tener una interfase (normalmente GIS) que permita visualizar el sistema vial codificada para ver donde se encuentran las calles y avenidas con mayor deterioro, permitir la comparación de múltiples escenarios, y además deberá reportar sus resultados en formatos compatibles con 61 MS Excel y/o MS Word.

Tabla 5. Categorización del PCI vs. Tipos de Mantenimiento (adaptado, 46)

Índice de Estado Superficial del Pavimento- Categorías de Acción		
Rango de Índice de Estado	Categoría de Acción	Descripción
100 a 85	Excelente Mantenimiento Preventivo o Mínimo.	Pavimento en condición muy buena; no requiere acciones de mantenimiento correctivo inmediatas; ocasionalmente pueden requerir acciones de mantenimiento mínimo preventivo.
85 a 70	Muy Bueno Mantenimiento Correctivo Menor.	Pavimento en condición buena, con fallas incipientes que requieren acciones de mantenimiento correctivas inmediatas y/o en el corto plazo.
70 a 55	Bueno Mantenimiento Correctivo Mayor o Intensivo.	Pavimento en condición dudosa o regular, con fallas evidentes que requieren acciones de mantenimiento correctivo frecuentes y probablemente una rehabilitación a mediano plazo. Comprende tres tipos de acción: 1 Condición dudosa mantenimiento correctivo mayor. 2 Sellado de superficie. 3 Reencarpado delgado.
40 a 25	Pobre Rehabilitación - Refuerzo Estructural.	Pavimento en condición deficiente con fallas en proceso de generación, que requieren una rehabilitación en el corto plazo para evitar la generalización de daños irreversibles.
< 25	Muy Pobre y Colapsado Rehabilitación-Reconstrucción.	Pavimento en condición muy deficiente, con fallas severas generalizadas que requieren una rehabilitación mayor, probablemente con alto porcentaje de reconstrucción, en el corto plazo.

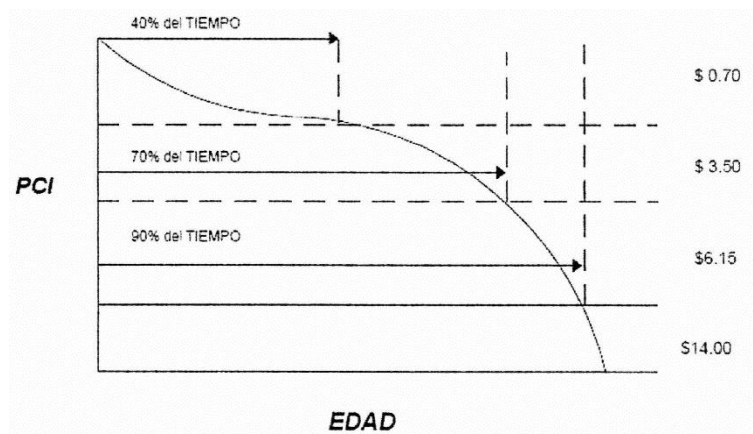


Figura 12: Evolución del PCI en el tiempo frente a los gastos de intervención (47)

Planificación del Mantenimiento del Sistema de Pavimentos, en esta etapa se requerirá proyectar el futuro comportamiento de los pavimentos. Como se indicó existen diversas metodologías en la literatura, siendo la más utilizada en el Perú el método del HDMIII y HDM4 del Banco Mundial. Sin embargo, se ha mostrado que estos métodos tienen errores inherentes que pueden afectar la toma de decisiones. Por eso, se recomienda utilizar primeros métodos de deterioro probabilísticos - estocásticos, para luego en el mediano plazo poder pasar a modelos de deterioro empíricos (similares a los desarrollados por los estudios brasileiros del HDM, pero peruanizados). Esta implementación permitirá que los pavimentos dejen de ser “mantenidos” bajo el pensamiento clásico de reparación post-problema, y la decisión sobre que vías se arreglan y que vías se dejan en su condición actual deje de estar orientada a decisiones políticas más que técnicas o análisis técnico-económicos.

Programa de Trabajo y Medición del Comportamiento, consistirá en realizar los trabajos de mantenimiento planificados y la subsecuente medición de condición para actualizar la información respectiva. Cuando se definen los porcentajes de sectores a ser tratados ya sea con mantenimientos rutinarios, periódicos, rehabilitaciones o reconstrucciones, se proceden a definirlos a nivel de expediente técnico en las calles y sectores específicos.

Monitoreo, el SGP propuesto requerirá de información sustentadora para generar cambios en los modelos de deterioro probabilístico - estocástico, y más adelante en sus modelos empíricos. Por eso se tendrá que determinar: el plan de monitoreo de las secciones y esto se puede realizar según las necesidades de las vías y/o condiciones económicas de la entidad.

6. Resumen, Conclusiones y Recomendaciones

Este informe ha cubierto el Estado del Arte en el Perú del diseño, gestión, construcción y reparación de los pavimentos en el Perú, tanto carreteros como urbanos, indagando en los manuales disponibles, publicados por los sendos ministerios encargados de la administración de pavimentos (MTC y MVCS)

Así, se ha concluido que sobre el tema de diseño, construcción y reparación la literatura es diversa y provee suficiente información a los ingenieros para realizar los respectivos trabajos. Sin embargo, es en la gestión donde aún quedan espacios que cubrir, y este informe es un esfuerzo inicial para encontrar las características necesarias para la futura implementación de un Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP)

En la actualidad, el pensamiento de gestión de pavimentos está más orientado en reparar lo malogrado y muy malogrado en vez de orientarse a un pensamiento más moderno de mantener lo muy bueno y bueno en ese estado y prevenir su deterioro. Los manuales del MTC sugieren el realizar un SGP y dan propuesta de algunos pasos a seguir (8, 9, 10, 11) y el manual respectivo del MV CS (7) provee pasos para realizarlo pero no es específico en que metodologías seguir, o que debería incluir.

Este informe ha concluido que un SGP a aplicarse en el Perú debería tener las siguientes características:

Utilizar como unidad de medición inicial el índice de Condición de Pavimento o Pavement Condition Index, PCI, actualmente normado internacionalmente con el ASTM D6433-11 (19). Esta elección se debe a que se requiere de un instrumento objetivo de bajo costo que permita categorizar las vías peruanas que se estiman son cerca de 260 000 Km (entre concesionadas y no concesionadas, del MTC y del MVCS). Con mayores fondos y sofisticación, y/o en base a necesidad, se pueden recurrir a otras metodologías como el IRI, IFI, Ensayos No Destructivos, Destructivos, entre otros.

Tener la capacidad de ser adaptable a condiciones y necesidades de la agencia administradora de los pavimentos. Las condiciones son tan variables en el Perú que tener un SGP inflexible para todo el país sería tan ineficiente como importar metodologías extranjeras, como en la actualidad se realiza.

Dentro de esa flexibilidad, el SGP debería ser capaz de analizar datos asociados a los pavimentos, como condición de alcantarillas, señaléticas, barandas, veredas, etc. Sin embargo, para el SGP nacional inicial se recomienda enfocarse primero en los pavimentos y dejar la opción de caracterización de estos elementos según la necesidad de cada entidad.

Utilizar modelos de deterioro claros y que permitan la adaptación o calibración local. Debido a lo insipiente de la acumulación de información

en el Perú, se recomienda que el SGP inicial utilice modelos de deterioro probabilísticos - estocásticos, en vez de los modelos empíricos importados. Con la información acumulada de 5 a 8 años, se puede pasar entonces a relaciones empíricas, y en 10 a 15 años se puede pensar en el salto a modelaciones mecánicas - empíricas como ocurre hoy en los EE.UU. y otros países de la región, que ya tienen años de información acumulada.

Ser lo más gráficos y claro posible en sus reportes. En temas de costos y proyecciones deben de proveer reportes en gráficos de líneas, barras, y otras formas; mientras que en la localización de los pavimentos, deben tener capacidad de representación gráfico vía programas como el GIS, Google Earth o similar aplicación. Además, deben ser capaces de proveer la comparación de múltiples escenarios y proveer reportes en MS Word y MS Excel.

Por lo tanto, las recomendaciones al solicitante, SENCICO, para mejorar la condición de los pavimentos urbanos son las siguientes:

Continuar con la mejora continua de la Norma Técnica de Edificaciones (NT E) CE.010 Pavimentos Urbanos (7), y en donde no se encuentre permitir la utilización de los conceptos ampliamente explicados en los manuales del MTC en lo concerniente al diseño, construcción y reparación de pavimentos.

Modificar el capítulo 6 de dicha NTE CE.010 que trata de Mantenimiento de Pavimentos por un Manual de Gestión de Pavimentos, especificando los detalles a realizar por cada administración municipal, regional, y similar; o en su defecto, presentar dicho manual que será un documento individual por 10 extensión que se prevé tendrá, incluyendo un programa de computadora (software).

Solicitar, por lo tanto, la generación de dicho Manual de Sistema de Gestión de Pavimentos (SGP) que deberá tener las características indicadas previamente. Además, el generador de dicho manual deberá proveer la capacitación respectiva y proveer algún ejemplo aplicativo de dicho manual, con trabajo de campo incluido.

Dentro de la solicitud de generación de ese manual, también deberá solicitarse la evaluación del ASTM D6433-II para su aplicación en el Perú, ya que en la realización de este informe se pudo notar que hay algunos aspectos que esa norma no cubre y que debería ser aclarada. Una vez analizada la norma, debería proponerse que se vuelva Norma Técnica Peruana o N.T.P.

Ya que el SGP será adaptable y calibrable, deberá haber una entidad que controle y gestione los diversos esfuerzos a realizarse en las distintas zonas, además de dedicarse a velar por la apropiada implementación del SGP. Por lo tanto, se propone que el SENCICO, dentro de sus departamentos y oficinas existentes, y como parte del

MVCS, cree una unidad de investigación aplicada a la infraestructura vial que tenga como objetivo el desarrollar y evaluar técnicas y tecnologías que combatan las condiciones de deterioro de las carreteras peruanas y mejoren su comportamiento, durabilidad, seguridad y eficiencia (adaptado de 17, objetivos del SHRP norteamericano). Esta entidad, o consejo de expertos, deberá tener miembros del Estado, la industria, y las universidades, con capacidad de encargar estudios de investigación no solo a consultoras, sino que primordialmente a universidades, activando la relación sociedad-universidad que es casi inexistente en el Perú.

10. Referencias

- Portal del MTC www.mtc.gob.pe
- OSITRAN. Nata de Prensa N0. 40. Carreteras concesionadas representan el 35% de la red vial nacional. Oficina de Relaciones Institucionales del 12/08/2011.
- Peru21. El MT C impulsar concesiones viales por US\$3, 000 millones hasta el 2016. Entrevista del 5 de Julio del 2012 al ministro Carlos Paredes. <http://peru21.pe/2012/07/05/economia/mtc-impulsara-concesiones-viales-us3000-millones-hasta-2016-2031828>
- Portal de Provias Nacional. Proyecto Perú. 2011. [En línea] 04 de Abril de 2011. [Citado el: 20 de Abril de 2011.] www.proviasnac.gob.pe.
- Portal del MVCS. www.vivienda.gob.pe.
- Portal de Reglamentos, Manuales y Directivas del MTC. http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manuales.htm.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Norma Técnica de Edificaciones (NTE) CE. 010 Pavimentos Urbanos. 2010.
- Ministerios de Transportes y Comunicaciones. Manual Técnico de Mantenimiento Rutinario para la Red Vial Departamental No Pavimentada. Aprobado por la Resolución Directoral No 015-2006-MTC/14 del 22 de marzo del año 2006.
- Ministerios de Transportes y Comunicaciones. Manual Técnico de Mantenimiento Periódico para la Red Vial Departamental No Pavimentada. Aprobado por la Resolución Directoral No 015-2006-MTC/14 del 22 de marzo del año 2006.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Las especificaciones técnicas generales para la conservación de carreteras. Aprobado por la Resolución Directoral No 015-2007-MTC/14 del 27 de agosto del año 2007.

- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Carreteras. Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y Pavimentos. Marzo del 2013.
- Metodología de Investigación. Propuesta para temas de Ingeniería Civil. Gestión de Pavimentos. Consulta del 24 de setiembre del 2013. http://www.ingenieria.peru.com/gestion_pavimentos/gestion_de_pavimentos.htm
- Wikipedia. Proceso Estocástico. Búsqueda virtual de la definición de Proceso Estocástico. 2013. Wikimedia Project.
- Suharman, H. Development of A Practical Model for Pavement Management Systems. Kyoto University, Japon, 2012
- Kaloush, K Delhi Township Pavement Management System Software. Ohio, EEUU, 2002
- ARA, Inc., ERES Consultants Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Illinois, EEUU. Marzo 2004.
- Halladay, M. The Strategic Highway Research Program: An Investment That Has Paid Off Federal Highway Administration, Public Roads, Volume 61, Number 5, March/April 1998.
- Witczak M. W. NCHRP Report 580. Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC. 2007.
- Witczak M. W., Kaloush K. E., Pellinen, T., El-Basyouny M. M., y Von Quintus, H. NCHRP Report 465. Simple Performance Tests for Superpave Mix Design. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC. 2002.
- Witczak, M. W., y Sotil, A. Últimos Avances de Superpave: Buscando un Ensayo que Acompañe al Método. III Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia, Agosto de 2004.
- Witczak, M. W., El-Basyouny, M. M., Baena, J. M. y Sotil, A. Implementación en el Perú de la Nueva Guía de Diseño de Pavimentos Nuevos y Rehabilitados del 2002 (NCHRP 1-3 7A). III Congreso Nacional de Obras de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia Agosto del 2004.
- Sotil, A. Use of the Dynamic Modulus E^* Test as Permanent Deformation Performance Criteria for Asphalt Pavement Systems. Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Tempe, Arizona, EEUU, 2005

- Fugro Consultants, Inc., Arizona State University. NCHRP Report 704. A Performance-Related Specification for Hot-Mixed Asphalt. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, DC. 2011.
- Tschoegl, N.W. The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 1989.
- Mamlouk, M. S., y Zaniewski, J. P. Materials for Civil and Construction Engineers. 3^{ra} Edición. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EEUU, 2011.
- Wolters, A., Zimmerman, K., Schattler, K. y Rietgraf, A. Implementing Pavement Management Systems for Local Agencies - State-of-the-Art/State-of-the-Practice. Reporte preparado para la Illinois Center for Transportation. Diciembre 2011.
- Flintsch, G. y McGhee, K. K. NCHRP Synthesis of Highway Practice 401: Quality Management of Pavement Condition Data Collection, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2009.
- Huang, Y. H. Pavement Analysis and Design. 2da Edición. Pearson Education Inc. Upper Saddle River, New Jersey, EEUU, 2004.
- ASTM. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Surveys. Designación D6433-11. 2011.
- Richter, C. A., y Witczak, M. W. Non-destructive testing in SHRP'S long-term pavement performance studies. Documento #19 en Highway Research: Sharing the Benefits. Redwood Press Limited, Melksham, Wiltshire, Gran Bretaña, 1991.
- Walker, D., L. Entine, and S. Kummer, Pavement Surface Evaluation and Rating PASER Manual, University of Wisconsin — Madison, Transportation Information Center, Madison, WI, 2002.
- Town of Millbury. Pavement Management systems (PMS). Central Massachusetts Regional Planning Commissions. Massachusetts, EEUU, 2009.
- Zaniewski, J. P., Hudson, W. R., High, R. y Hudson, S. W. Pavement Rating Procedures. Contrato No. DTFH61-83-C-00153, Federal Highway Administration, Washington, DC. 1985.
- Epps, J. A., y Monismith, C. L. Equipment for Obtaining Pavement Condition and Traffic Loading Data, NCHRP synthesis of Highway Practice No. 126. Transportation Research Board, Washington, DC, 1986.

- Hall, J. W., Smith, K.L., Titus-Glover, L, Wambold, J.C., Yager, T. J. y Rado, Z. NCHRP Web-Only Document 108: Guide for Pavement Friction. Transportation Research Board. Washington, DC, 2009.
- Menéndez, J. R. Ingeniería de Pavimentos. 3ra Edición. Fondo Editorial ICG. PT-47.Lima, Peru, 2012.
- Pavement Interactive. Pavement Management - Pavement Evaluation - Deflection. Publicado el 21 de enero del 2010, Consultado el 29 de setiembre del 2013 de [http://www.pavementinteractive.org-\"article/deflectionom\"](http://www.pavementinteractive.org-\)
- Paver™. MicroPAVER™, <http://www.paverteam.com>. Última actualización de Marzo del 2013 y consultado el 29 de setiembre del 2013.
- Michigan Technology University. RoadSoft GIS, Center for Technology and Training www.roadsoft.org. Consultado el 29 de setiembre del 2013
- Utah Transportation Center. Transportation Asset Management Software. Utah Local Technical Assistance Program, 2011. <http://www.utahltap.org/software/tams.php>. Consultado el 29 de setiembre del 2013.
- Metropolitan Transportation Commission. StreetSaver Products. Página web www.mtcpsms.org/products/indexhtml. Consultado el 29 de setiembre del 2013. Cartegraph Products. Cartegraph. 2012. WWW.cartegraph.com/products.html. Consultado el 29 de setiembre del 2013.
- Infrastructure Management Services. PavePRO Manager. Página web de empresa IMS. www.ims-rst.com/pavepro.shtml. Consultado el 29 de setiembre del 2013.
- Federal Aviation Administration. FAA PaveAir. <http://faapaveair.faa.gov/Default.aspx> Consultado el 29 de setiembre del 2013.
- Chang, C.M. y Melendez, J. Aplicabilidad del Modelo HDM en la Evaluación de Proyectos Viales. Artículo dentro de Pavimentos: Un Enfoque Integral. PT-32. ICG, Instituto de la Construcción y Gerencia. Setiembre 2012.
- Secretaria de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Estado de Baja California. Normas Técnicas de Proyecto y Construcción para obras de Vialidades del Estado de Baja California. Mantenimiento de Pavimentos. California, EEUU. 2004.
- Smith, R., Freeman, T, y Chang, C. Gestión de Infraestructura Vial. 1ª Edición, 2006. Fondo Editorial ICG.