

Formulación de soluciones estructurales en un pavimento fundamentándose en la metodología del Cuerpo de Ingenieros del Ejército americano - PCI (*Pavement Condition Index*)

José David Muñoz Gutiérrez*

Resumen: *Dada la situación actual y la que se espera, se puede observar la importancia que tiene agilizar las operaciones de mantenimiento y rehabilitación vial en cada uno de sus pasos; es decir, entre más se optimicen los procesos para llevar a cabo dichas operaciones, la conservación del patrimonio vial será más eficiente y por lo tanto más económica. Este documento formula una serie de procedimientos prácticos y muy sencillos que buscan plantear una metodología en el diagnóstico y análisis de un pavimento flexible. El documento presenta la metodología PCI (*Pavement Condition Index*), desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano para diagnosticar un pavimento en servicio, en términos de su deterioro superficial en la calzada, integrando la información de campo existente de una forma ordenada y clara para así facilitar el diagnóstico y análisis de la vía en estudio. El objetivo principal consiste en definir sectores homogéneos y asimismo recomendar alternativas de solución en términos de fallas estructurales en un pavimento flexible. El PCI es un método que ha tenido gran aceptación en varias entidades en el mundo debido a su objetividad y al análisis cuantitativo que propone. A partir del PCI se desarrolla un programa en computador para facilitar su uso (MECAPAV, versión 1.1). Los resultados de aplicar esta metodología se orientan hacia la caracterización de una vía en rehabilitación de una forma práctica, objetiva y*

* Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Especialista en geotecnia, Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asistente y jefe de sección de Geotecnia y Vías, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

en un alto grado de detalle, para luego definir los sectores en términos de daño superficial. Se formulan una serie de alternativas de solución basándose en métodos racionales y el valor promedio del PCI de cada sector.

Abstract: *Given both the actual and the forthcoming situations, the importance of accelerating maintenance and rehabilitation procedures can be noted. While optimization of processes is increased to carry out such tasks, conservation of roadway patrimony shall be more efficient and therefore less expensive. In these regards, this work formulates a set of practical and simple procedures aimed at presenting a methodology to evaluate and analyze flexible pavements. This document presents the Pavement Condition Index Methodology (PCI), developed by the Engineers Corps of U.S. Army to evaluate a pavement under service conditions in terms of its superficial deterioration. The main objective is focused on both defining pavement's homogeneous zones and recommending alternative solutions in terms of structural failures of flexible pavements. The PCI is a method that has been welcome in many places worldwide due to its objectivity and quantitative analysis that it possesses. The results of applying this methodology are oriented towards a practical and detailed characterization of roadways operating under rehabilitation conditions that allows pavement identification in terms of zones having superficial damages. A set of alternative solutions based on both rational methods and the PCI average value of each sector are also presented.*

1. Introducción

Los costos de las operaciones de transporte suman miles de millones de pesos; el monto global puede verse seriamente afectado por las características geométricas y el estado de los caminos. A este respecto estudios especializados en Colombia indican que los costos de operación del transporte se multiplican tres o cuatro veces cuando la vía se encuentra en mal estado y asimismo afirman, que el no hacer mantenimiento oportuno de las carreteras conlleva a atender posteriormente su rehabilitación o su reconstrucción, lo cual implica, según los mismos estudios, tener que invertir tres o cuatro veces más para acondicionar la vía hasta el estado requerido para el buen funcionamiento; es decir, que los sobrecostos para la nación suman entre seis y ocho veces más por cuenta del mantenimiento deficiente y poco oportuno de la red de carreteras. [Presidencia, 1997]

Sin embargo, vale la pena destacar que se trata de sobrecostos evitables realmente y que lo que se puede y se debe lograr es consolidar un buen sistema para el

mantenimiento vial. Llevarlo a cabo significa, desde el punto de vista económico, una gran inversión; no hacerlo, significa desidia y sobre todo irresponsabilidad gubernamental para con la sociedad.

Este documento formula una metodología de trabajo en un proyecto de rehabilitación que permita diseñar un pavimento flexible con la menor incertidumbre posible. Esto conlleva a que los pasos a seguir en un diseño estén claramente definidos y que quien los aplique conozca de una forma muy objetiva las debilidades y fortalezas del pavimento a rehabilitar.

La metodología se apoya en un programa de computador para agilizar el cálculo del valor del *Pavement Condition Index* (PCI) [Shahin y Walther, 1994] y definir la sectorización de la vía en estudio en términos de deterioro superficial de la calzada en una vía en rehabilitación para así llegar a sectores no menores de un kilómetro en donde se formulará una alternativa de solución que se podrá en un momento dado descartar o tomar.

Las soluciones que se proponen no son integrales debido a que sólo se tienen en cuenta los efectos de fatiga sobre la estructura a causa de una carga dinámica causada por los vehículos comerciales. Por esto, se debe tener presente que una solución integral tendrá necesariamente que contemplar el análisis de otros aspectos como drenaje superficial y subsuperficial.

2. Factor de equivalencia de carga por eje - Método de la AASHTO

Para establecer el deterioro de las capas asfálticas es necesario definir con certeza el número de ejes equivalentes que las mismas soportan para posteriormente llegar a un diseño de espesores de las capas, sin olvidar obviamente el resto de variables que influyen en el cálculo. Aquí se hará referencia solamente al factor de equivalencia de carga por eje debido al incremento indiscriminado y no controlado de las cargas que circulan en las vías, incrementó éste que es origen del daño prematuro en los pavimentos.

En una primera fase de investigación, se pretende evaluar el exponente n utilizado en la formulación de la Asociación Americana de Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO) para determinar los factores de equivalencia de carga por eje (FECE), bien sea simple, tandem o tridem; dicho exponente es actualmente muy utilizado en Colombia. [Murgueitio, Benavides y Solano, 1996]

$$(1) \quad FECE = (P_i/P_o)^n$$

donde:

FECE : factor de equivalencia de carga por eje.

P_1 : carga aplicada.

Po : carga de referencia.

n : exponente, generalmente constante.

Esta fase se desarrolló en dos vías administradas por el sistema de concesión (El Cortijo - Siberia- La Punta – El Vino y La Calera – Guasca) de gran importancia a nivel nacional, en las cuales se presenta un gran volumen de vehículos comerciales por lo que, teniendo en cuenta además resultados de estudios anteriores, se puede afirmar que su escogencia es representativa para analizar los factores de carga del sector transportador terrestre en Colombia. [Díaz y Medina, 1999]

En la determinación de los factores de equivalencia de carga por eje el trabajo se fundamentó en la metodología propuesta por Iserrato, Farraggi y Gaete en el VI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, en donde se utilizaron diferentes leyes de fatiga como la CRR - Bélgica, SHELL, NOTT, Pell - Brown y Hudson [Díaz y Medina, 1998], llegando a las siguientes conclusiones:

- En las cargas medidas en jornadas de 10 horas en cada una de las vías estudiadas se presentaban sobrepesos en porcentajes que oscilan entre el 20% y el 30%.
- Las presiones de inflado tomadas en vía se encontraban más altas a las que considera la AASHTO y el método Shell.
- Se presenta gran heterogeneidad en los resultados aplicando las diferentes leyes de fatiga, es decir, no se presentó convergencia en los resultados y debido a esto, fue necesario realizar un análisis estadístico severo de los resultados.
- Los valores que se obtuvieron de n se encontraban en un intervalo entre 4.5 y 5 aproximadamente para los vehículos comerciales evaluados.

Debido a lo anterior, es necesario reflexionar sobre los valores de n que se deben utilizar en el diseño, puesto que, de acuerdo con los resultados obtenidos en el pasado, se debe prestar mucha atención a esta variable y no utilizarla como un valor estándar en un momento dado. Por ello se debe garantizar que este valor sea representativo para las características existentes en cada proyecto vial, que no son necesariamente las mismas siempre. La utilización de valores erróneos de n así

como el poco control al sector transportador generará deterioros prematuros independientemente de la solución que se formule en un sector dado.

3. Metodología empleada

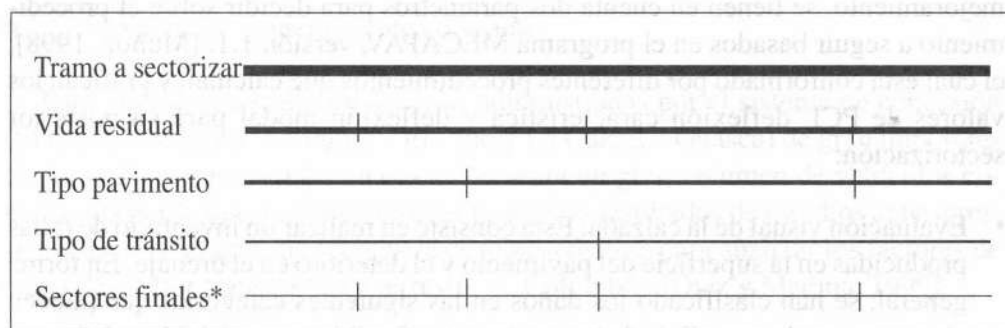
Dentro de la evaluación global del pavimento con fines de reconstrucción o mejoramiento, se tienen en cuenta dos parámetros para decidir sobre el procedimiento a seguir basados en el programa MECAPAV, versión 1.1. [Muñoz, 1998], el cual está conformado por diferentes procedimientos que calculan y grafican los valores de PCI, deflexión característica y deflexión modal para su posterior sectorización:

- Evaluación visual de la calzada: Esta consiste en realizar un inventario de fallas producidas en la superficie del pavimento y el deterioro en el drenaje. En forma general, se han clasificado los daños en las siguientes categorías que pueden observarse en la superficie de los pavimentos flexibles y semirígidos: deformaciones, fisuras, desprendimientos y otros daños en la calzada (exudaciones, pulimento, afloramiento de llenante, etc.). Los parches se involucran debido a que la existencia de éstos influye en alto grado en la alternativa de solución debido a que el alto porcentaje de parcheo implica en un momento dado que se descarte la posibilidad de reciclar, puesto que la base reciclada pierde sus niveles de calidad y homogeneidad.
- La condición estructural: Este concepto se refiere a la capacidad del pavimento para amortiguar y disipar de una forma gradual las cargas de tránsito sobre la subrasante en la actualidad. Como parámetros indicativos se puede usar el parámetro denominado *deflexión Benkelman* [Muñoz, 1998], que representa la recuperación elástica, medida sobre la vertical, de la superficie del pavimento cuando deja de actuar la carga producida por una rueda doble de determinadas características. El radio de curvatura es el indicativo de la elástica y, asociado con el valor de deflexión, ofrece una idea razonablemente clara de la forma en que el paquete estructural responde a la sollicitación por cargas colocadas en la superficie.

Con estos dos parámetros se puede decidir sobre el estado global del pavimento, dado que en los casos de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción, no es necesario darle el mismo tratamiento a toda la vía, sino que se deben identificar sectores o tramos de condiciones similares para poder determinar en cada uno, el tratamiento más apropiado según el estado actual. Antes de entrar a evaluar los parámetros mencionados anteriormente, es necesario tener cierta información preliminar sobre las condiciones de la vía, con el fin de poder dividir la calzada en

tramos que presentan cierta homogeneidad teniendo en cuenta los factores de vida residual, tipo de pavimento y nivel de tránsito. Para esto, se presenta a continuación un ejemplo de como podría ser la sectorización teniendo en cuenta las variables antes mencionadas. (Figura 1)

Figura 1. Definición de sectores comunes



* Estos sectores serán tramos obligados en los que la vía se dividirá para su posterior caracterización.

Luego de haber determinado unos tramos en términos de los factores anteriormente anotados, se procede a determinar sectores que estarán definidos en función del estado superficial de la calzada y de la evaluación deflectométrica.

En cuanto a la evaluación visual de la calzada, aparte de la simple identificación de los tipos de falla encontrados en la vía, éstos se cuantificarán para así poder identificar el grado de deterioro de la vía y decidir el tipo de obra a realizar en los diferentes tramos de la vía, los cuales se puede decir que son de cinco tipos:

- **Mantenimiento preventivo:** Cuando el pavimento se encuentra aún en buen estado, con una superficie uniforme pero con unas fallas ocasionales y poco significativas. Es una actividad de costo fijo que se caracteriza por la colocación de parches superficiales y sello de grietas.
- **Mantenimiento correctivo:** Se realiza cuando el pavimento está en buena condición pero se observan fallas localizadas e incipientes para lo cual se deberá colocar parcheo superficial y profundo.
- **Mantenimiento intensivo:** Se realiza cuando el pavimento se encuentra en condición regular, donde se presenta circulación poco confortable, daños manifiestos y frecuentes. El pavimento se aproxima al cumplimiento de su vida útil; el tratamiento a seguir es la colocación de parches asociados a una capa asfáltica.

- **Rehabilitación:** Implica un refuerzo estructural y debe realizarse cuando el pavimento se encuentra en condición deficiente, la circulación es muy incómoda y los daños se encuentran en proceso de generalización. El pavimento ha sobrepasado el período de vida útil asignado y deberá formularse un tratamiento intensivo en donde posiblemente se colocará una o varias capas asfálticas según el valor del PCI o posiblemente se recomiende el reciclar un espesor de estructura.
- **Reconstrucción:** Se realiza cuando el pavimento se encuentra en estado muy deficiente, donde la circulación es pésima o casi imposible, los daños se encuentran totalmente generalizados y se presentan valores bajos de PCI.

Es prioritario que el seccionamiento se haga de acuerdo con el grado de deterioro de la capa de rodadura. [INVIAS, 1996] Adicionalmente, es importante tener en cuenta que las soluciones deben corresponder a los tipos de daños presentados, pero no se deben dar soluciones aisladas para cada tipo de daño. Se debe dar solución para el daño más generalizado, teniendo en cuenta que éste cubija a los otros daños y el espesor del refuerzo dependerá básicamente de la capacidad estructural del pavimento en el momento de la evaluación.

Para la evaluación visual de la calzada existen varias metodologías —Ingeroute y Vizir (Francia), PCI (Estados Unidos), SAPCOL (Dinamarca)— cada una de las cuales busca con diferentes procedimientos evaluar de una forma metódica el estado superficial de la calzada. El método del *Pavement Condition Index* (PCI), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, es un método que ha tenido gran aceptación en varias entidades alrededor del mundo por su objetividad y por los criterios cuantitativos que emplea.

El PCI es un índice numérico cuyo rango va de cero, para un pavimento en pésimas condiciones, a cien, cuando éste se encuentra en perfecto estado. [Shahin y Walther, 1994] Para calcular dicho índice se deben tener en cuenta el tipo de falla, su severidad y su cantidad, elementos obtenidos por medio de la evaluación superficial de la calzada. La combinación de los tres factores mencionados anteriormente puede ser un poco complicada a primera vista; para superar este problema, el sistema trabaja con unos “valores de deducción”, los cuales son un resultado de la combinación de dichos factores; estos valores de deducción son el resultado de extensas investigaciones llevadas a cabo por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército americano, así como de las experiencias de muchos ingenieros, quienes han dedicado su vida profesional al trabajo con pavimentos, y de evaluaciones realizadas para la obtención de resultados por diferentes métodos.

Para determinar el PCI de un tramo de pavimento, el tramo debe ser dividido en secciones de inspección a las cuales se les halla el PCI para luego determinar tramos homogéneos y su correspondiente índice; en el caso de la metodología que se plantea la longitud de los tramos será de cien metros.

La evaluación del estado superficial de un pavimento debe cumplir los siguientes requisitos:

- Ser objetiva, es decir, que la descripción de las fallas sea independiente del inspector que realice el inventario.
- Ser periódica; es necesario evaluar sistemáticamente el estado visual del pavimento con el fin de observar el progreso de sus fallas y poder así programar labores de mantenimiento y mejoramiento oportuno.
- Ser ordenada; el inspector debe llenar de forma ordenada y completa los formatos de evaluación, con el fin de facilitar el análisis posterior de los datos recolectados.

4. Formulación de alternativas de solución

Para definir una alternativa de solución se deberá tener en cuenta, como se mencionó anteriormente, la cuantificación de los daños existentes a partir del PCI, en donde de acuerdo con este valor se definirán los tratamientos a seguir; los tratamientos que a continuación se mencionan son muy generales y sólo tienen en cuenta las fallas superficiales:

- T1: Parcheo superficial y sello de grietas.
- T2: Parcheo superficial y profundo.
- T3: Parcheo y base asfáltica – rodadura, la base asfáltica será de gradación abierta si dentro del inventario existe mayor porcentaje de grietas y no de fisuras.
- T4: Reciclaje y base asfáltica – rodadura, dependiendo del tráfico y del tipo de subrasante se recomendará base asfáltica.
- T5: Reemplazo del pavimento existente.

Los rangos de valores de PCI asociados a los tratamientos ya mencionados se obtuvieron luego de aplicar la metodología en diferentes vías nacionales e internacionales de primer y segundo orden entre 1996 y 1998, en donde en los resultados de los diseños se presentaron tendencias que en la mayoría de los casos coinciden con las alternativas de soluciones estructurales que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Alternativas de soluciones estructurales en términos del PCI.

Tratamiento	PCI
T1	100 – 90
T2	90 – 70
T3	70 – 50
T4	50 – 30
T5	< 30

La Tabla 1 tiene por objeto dar a los ingenieros consultores de vías herramientas para definir alternativas de solución para un sector dado y disminuir el subjetivismo en los diseños.

Los tratamientos presentados en función del PCI buscan, entre otras cosas, que posterior a la modelación de cada estructura tipo en los diferentes sectores, el diseño de espesores a los que se llegue sea consistente, puesto que un tratamiento mal enfocado en un sector dado generará sobrecostos que se podrían obviar.

5. Conclusiones

- El programa MECAPAV, versión 1.1. es una herramienta que ayudará a ser más metódico en lo que se refiere a la sectorización de una vía en estudio.
- La sectorización de una vía es uno de los pasos más importantes en el diseño de una vía en rehabilitación puesto que la caracterización efectiva logrará que se optimice el trabajo y se llegue a una solución que sea técnica y económicamente viable.
- La formulación de unas alternativas de solución es una tarea delicada dado que sólo se tienen en cuenta los daños superficiales; por esto un objetivo del estudio es guiar en la obtención de una solución integral.

- El índice de rugosidad internacional es otra variable que no fue considerada en este estudio, pero que hace parte de la evaluación global del pavimento y complementa la solución para un tramo determinado.

Referencias

- American Public Works Association. *Pavement Condition Index (PCI). Field Manuals*. 1984.
- Colombia. Instituto Nacional de Vías-INVÍAS / Dirección de Carreteras de Dinamarca. Subdirección de Conservación. *Manual de auscultación red vial nacional*. Santa Fe de Bogotá, 1996.
- Colombia. Presidencia de la República. *El mantenimiento vial prioridad del Plan de Desarrollo. Salto Social 1994-1998*. Santa Fe de Bogotá, 1997.
- Department of the Air Force. *Airfield Pavement Evaluation Program*. Air Force Regulation. 93-5. Washington, 1981.
- Díaz, R. y Medina, Z. *Evaluación del factor equivalencia carga por eje para la vía El Cortijo - Siberia - La Punta - El Vino*. Trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana. Santa Fe de Bogotá, 1999. 227 págs.
- Eaton, R.A., Gerard, S. y Cale, D.W. *Rating Unsurfaced Roads. A Field Manual for Measuring Maintenance Problems*. Special Report 87 - 15. U.S. Army, 1987.
- Muñoz, J.D. *Metodología en la caracterización de pavimentos flexibles*. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo final de la especialización. Santa Fe de Bogotá, 1998. 302 págs.
- Murgueitio, V., Benavides, C.A., y Solano, E. *Estudio de los factores daño de los vehículos que circulan por las carreteras colombianas*, págs. 332-342. En: *Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería. Simposio de pavimentos*. Cartagena, 1997.
- Shahin, M.Y., Walther, J.A. *Refinements of the PCI Calculation Procedure*. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory. Champaign, 1994.