

Pavimentos flexibles

Análisis cualitativo del flujo de agua de infiltración para el control del drenaje de una estructura de pavimento flexible en la ciudad de Bogotá D.C.

Fecha de recepción: Febrero del 2009

Fecha de aprobación: 25 de junio del 2009

Resumen

El presente artículo describe el objetivo, metodología, interpretación y conclusiones de un análisis cualitativo y experimental para determinar la viabilidad de un sistema de drenaje que contempla la inclusión de gradaciones abiertas en la estructura de pavimento, y evaluar la mejora con respecto a la estructura de pavimentos convencional.

La metodología empleada para el desarrollo de la investigación se efectuó en diferentes etapas. En la primera se obtuvieron las carpetas asfálticas en la Cra. 13A con Calle 79, en el sector del Lago de la ciudad de Bogotá D.C., luego se efectuó un recorrido por la zona cercana al lugar, con el fin de hacer un registro fotográfico de casos donde se presenta la situación de estudio, para así seleccionar un material de soporte que permitiera evidenciar el fenómeno de posible deterioro de algunos pavimentos flexibles en la ciudad desde el punto de vista del drenaje interno. Como segunda parte, se realizó la caracterización del material de base, subbase y base abierta; como tercera etapa se construyeron dos modelos experimentales; el modelo de una estructura de pavimento flexible convencional y el modelo de la estructura de pavimento flexible con adición de una base abierta que sirviera de drenaje interno; posteriormente, se finalizó con la interpretación y conclusiones de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Pavimento flexible, drenaje vial, diseño, estructura inversa.

Abstract

This article describes the objective, methodology, interpretation and conclusions of a qualitative and experimental analysis to determine the viability of a drainage system that contemplates the inclusion of opened gradations in the pavement structure, and evaluate the improvement on the conventional structure of pavements.

The methodology used for the development of the research was conducted at different stages. In the first, it was obtained the asphalt layers of the Av. 13A with St. 79, in the sector of the Lake of the Bogotá D.C., then made a tour by the area near the place, with the purpose to make a photographic registry of cases where the study situation appears, with the purpose of selecting a support material that allowed to evidence the phenomenon of possible deterioration of some flexible pavements in the city from the standpoint of internal drainage. As second part, it was made the characterization of the base material, subbase and open base; as third stage, it was built two experimental models: the model of a conventional flexible structure of pavement and the model of flexible structure of pavement with addition of a open base to serve as the internal drainage; finally, it ended with the interpretation and conclusions of the results.

Key words: Asphalt pavement, road drainage, design, inverse structure.

Federico León Castaño Martínez
Pontificia Universidad Javeriana
f.leon@javeriana.edu.co
Jorge Mario Herrera Betín
Pontificia Universidad Javeriana
jm.herrera@javeriana.edu.co
Jose N. Gómez Sáenz
Pontificia Universidad Javeriana
jngomez@javeriana.edu.co
Fredy Reyes Lizcano
Pontificia Universidad Javeriana
fredy.reyes@javeriana.edu.co

Introducción

Las estructuras de pavimento (EP) tienen como propósito absorber y luego disipar las cargas vehiculares a través de ésta, de manera que no afecten el comportamiento de la subrasante (SR). En otras palabras, debido a que las cargas vehiculares son transitorias, no le transmiten carga a la SR.

Las EP están compuestas, por lo general, de una capa de rodadura que puede ser flexible o rígida, apoyada debidamente en capas de materiales granulares competentes. Dependiendo de la calidad y resistencia de la SR, los espesores totales de la EP pueden variar, siendo éstos mayores para el caso de SR blandas. Los materiales granulares colocados como parte de la EP tienen altas resistencias bajo condiciones de compactación apropiadas y de humedad óptima, sin embargo, si se permiten saturar por deficiencias en el drenaje, esta resistencia se ve disminuida y por lo tanto, las cargas vehiculares pueden afectar su comportamiento al igual que el de la SR. Lo anterior es fácilmente comprobable con los ensayos de CBRs, con los cuales se concluye que un material compactado adecuadamente, si se permite saturar, su valor de CBR o resistencia se ve reducido. La influencia del agua por lo tanto, en el comportamiento de los pavimentos o de la EP es definitiva, ya que puede afectar la resistencia de los materiales y por otra parte, inducir presiones hidrostáticas que pueden generar sobreesfuerzos en la carpeta de rodadura al tratar de levantarla y destruirla.

Este último fenómeno se explica por el hecho de que la permeabilidad secundaria de las capas de rodadura, ya sean flexibles o rígidas, puede ser más alta de lo que generalmente se piensa, con valores entre 1×10^{-3} y 1×10^{-4} cm/seg, permitiendo que un buen porcentaje de las aguas de escorrentía al pasar el tiempo de uso de un pavimento, se infiltren a través de éstas e inicialmente queden atrapadas en la interfase entre la carpeta y la superficie de la base, ya que esta última, por su alto grado de compactación, es semi-

impermeable impidiendo el drenaje rápido a través de ella. El agua atrapada finalmente toma las cargas de los vehículos y las transmite en todas las direcciones, inclusive hacia arriba a manera de subpresión sobre la base de la carpeta, tratando de levantarla y destruirla. Con base en el anterior fenómeno de comportamiento, se considera la conveniencia de implementar un sistema de drenaje con gradaciones abiertas en la estructura de pavimento flexible, para permitir el drenaje de las aguas de infiltración.

En este artículo se presenta el análisis de dos modelos experimentales, con los cuales fue posible demostrar la importancia de incluir una capa de drenaje dentro de la EP.

Marco Teórico

Pavimentos Flexibles.¹

Este tipo de pavimentos está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante, puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Los diseños comunes de pavimentos no proporcionan suficiente drenaje.²

Durante las décadas anteriores, el enfoque primario en el diseño de pavimentos se ha basado en la densidad y en la estabilidad, más que en el drenaje. Puesto que el diseño de pavimentos está basado en los esfuerzos en la subrasante y en las capas de soporte bajo una condición saturada (pero sin la evaluación de los efectos dinámicos del impacto de las ruedas cuando hay agua que usualmente está atrapada en las secciones estructurales), entonces se ha asumido ampliamente que el drenaje no es importante. Casi todos los pavimentos que se han construido durante las décadas anteriores, son sistemas de drenaje demasiado lentos, lo que hace que éstos contengan agua libre durante períodos importantes de tiempo. Luego de que se ha determinado el método o fórmula de diseño haya sido utilizado por un número de años y se haya logrado apreciar daños prematuros en esos pavimentos, la solución común que se le ha dado a este problema ha sido modificar el método o la fórmula para proporcionar mayores espesores a las capas

estructurales, incrementar el porcentaje de cemento u otros estabilizantes o hacer otras modificaciones en algunos detalles, para intentar mejorar el diseño pero sin la preocupación de mejorar el drenaje. Por consiguiente, las bases y subbases estabilizadas y compactadas usadas comúnmente tienen baja permeabilidad.

Factores básicos.³

Los pavimentos tienen grandes superficies expuestas a las condiciones ambientales, lluvias y al tráfico.

Cuando aumenta el contenido de agua en los materiales de base y subbase, se da una disminución en la capacidad portante de éstos y un incremento en la tasa de pérdida de serviciabilidad del pavimento. Cuando el agua satura totalmente estas capas y llena los vacíos y los espacios o las aperturas en los límites entre las capas, las cargas pesadas aplicadas por las ruedas a la capa de rodadura de esos pavimentos, producen impactos en el agua que son comparables a la acción de un tipo de "martillo de agua". Las presiones de los pulsos de agua que se dan por la acción de las ruedas pueden acumular su efecto dañino causando, no sólo erosión y expulsión de material, sino la eliminación, por levantamiento, del material asfáltico que compone las capas estabilizadas de base y subbase. La acción del agua también puede desintegrar bases tratadas con cementos, debilitando las capas por el reacomodo de finos en la estructura interna, sobrecargando la subrasante por los nuevos espesores insuficientes, además de otros efectos dañinos.

Un vehículo que circula sobre el pavimento desarrolla presión entre el fondo de la losa o la carpeta flexible, y la subrasante, lo que permite liberar agua (si hay en la subrasante) y hace que ésta fluya en una dirección en la que pueda escapar. La magnitud de la presión es, por supuesto, dependiente de la deflexión de la carpeta o losa del pavimento y del grado de confinamiento del agua. El agua en principio sólo escapa a través de las juntas o de las grietas existentes, estos sitios de liberación de presión de aguas no son suficientes y por lo tanto la carpeta tiende a levantarse y destruirse con el paso de vehículos, como se puede apreciar en la Fotografía 1.

Juntas y grietas sin sellar de las losas (equivalentes a capas permeables y grietas en pavimentos flexibles) permiten que el agua ingrese a la estructura del pavimento y que se acumule debajo de la interfaz Capa de Rodadura (CR) y Base Granular (BG).

La junta es desviada mientras que una carga se mueve a través de la losa. El agua que está bajo la losa de

1. MONTEJO, Alfonso. (2008) "Ingeniería de Pavimentos" Tomo 1. Universidad Católica de Colombia, 3ª Edición. pp. 1. Colombia.
2. CEDERGREN, Harry (1987) "Drainage of Highway and Airfield pavements". Robert E. Krieger Publishing Company. pp. 9. U.S.A.
3. CEDERGREN, Harry. "Drainage of Highways". pp 17-21.

Fotografía 1 Estructura de pavimento flexible deteriorada por efectos dinámicos bajo presencia de agua de infiltración



Figura 1a Fenómeno de bombeo; carga en la losa de acercamiento

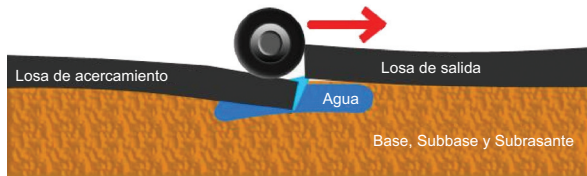


Figura 1b Fenómeno de bombeo; carga en las dos losas

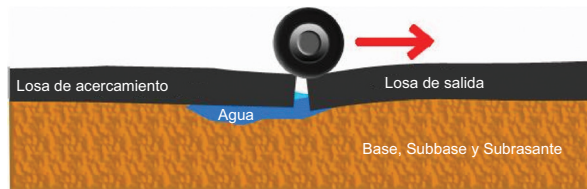
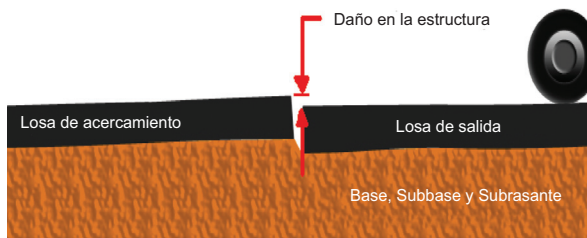


Figura 1c Fenómeno de bombeo; carga en la losa de salida



acercamiento es expulsada incluyendo material, y es acumulada bajo la losa de salida; este movimiento de material, por la presión del agua, es llamado “bombeo” (Figura 1a).

Mientras que la carga se mueve hacia la losa de salida, el agua y el material que están debajo de la losa de salida se bombean por debajo de la losa de acercamiento. Así, el material que estaba debajo de la losa de acercamiento regresa a su sitio original (Figura 1b).

Este proceso conduce a la acumulación de material por debajo de la losa de acercamiento y a una pérdida

de material por debajo de la losa de salida. La losa de acercamiento se dobla hacia arriba para acomodar el material adicional, mientras que la losa de salida se dobla hacia abajo para llenar el vacío. Esto causa una diferencia de elevación entre la losa de acercamiento y salida (Figura 1c).

Al tener pavimentos completamente llenos de agua, la flotabilidad de las capas saturadas reduce los pesos unitarios a pesos sumergidos, por lo cual se genera una reducción de la resistencia del material. Según lo observado, el agua libre proporciona los medios para la erosión de los materiales en las fases entre el pavimento y las bases (no tratadas o estabilizadas) y para la expulsión de material a causa del efecto de bombeo por medio de juntas y grietas, conduciendo a la falla total de los pavimentos de concreto y a daños significativos en pavimentos asfálticos.

Método de análisis

El análisis experimental se enfocó a poder simular el comportamiento de una EP con una carpeta flexible con cierto grado de uso, cuando es expuesta a absorber agua superficial, como es el caso común del agua de escorrentía.

Como primera parte de la metodología, se obtuvieron las carpetas asfálticas en la Cra 13A con calle 79, en el sector del Lago, de la ciudad de Bogotá D.C., se tomó de zonas deterioradas, supuestamente, por problemas (en parte) de deficiencias de drenaje.

Simultáneamente se preparó el modelo experimental, el cual consistió en un recipiente prismático de 0.7 m x 0.5 m x 1 m; posteriormente se continuó con la colocación de la subbase, base granular y capa de rodadura con un espesor de 0.20 m, 0.20 m y 0.10 m respectivamente. En el caso del modelo que contiene la capa de gradación abierta, como se comentará más adelante, se colocó un espesor de 5 cm y se instaló tubería de ½” (SI) de diámetro en los costados para evacuar el agua.

Los modelos fueron empleados para visualizar y validar la situación desde el punto de vista del drenaje de un pavimento flexible, sin la inclusión de base abierta y con la inclusión de ésta. La preparación de los modelos incluyó la realización de ensayos con el fin de caracterizar los materiales (base y subbase) y definir los parámetros de compactación, permeabilidad, densidad y gradación del material, por lo que fue necesario hacer los siguientes ensayos en laboratorio: (1) Ensayo Próctor modificado,

(2) Ensayo de permeabilidad, (3) Límites de Atterberg, (4) Ensayo de gradación y (5) Humedad natural.

Luego de haber establecido estos parámetros y el montaje del modelo, se realizó el vertido del agua con azul de metileno en el recipiente que contiene el modelo, con el fin de generar una carga hidráulica que permitió la infiltración a través de la carpeta asfáltica y con esto, se pudo ilustrar la situación planteada; luego de tener el modelo experimental funcionando se hizo un registro fotográfico (ver fotografías 2 y 3) con el fin de estudiar detalladamente el fenómeno de infiltración y saturación de la superficie, base y subbase granular.

Modelos experimentales

En la figura 4 se presenta una EP convencional, la cual fue representada con el primer modelo experimental.

Al agregar agua al primer modelo, se evidenció que la carpeta asfáltica usada presenta una permeabilidad secundaria por el uso y deterioro normal de ésta y el consecuente microfisuramiento. También se evidenció que la infiltración de agua se desarrolla en pocos minutos, lo cual va en contradicción con el concepto básico de que el pavimento es impermeable y que no necesita un sistema de drenaje interno que evacúe las aguas de infiltración. Con base en las intensas investigaciones llevadas a cabo por Cedergren (1987), con el tiempo una carpeta asfáltica puede permitir la infiltración de hasta un 70% de una precipitación.

Al analizar la estructura de pavimento flexible convencional, se pudo verificar que el agua que se filtra queda atrapada en la interfase entre la capa de rodadura o asfáltica y la superficie de base granular (como se puede apreciar en la Fotografía 4, donde el agua con azul de metileno queda atrapada en la interfase), ya que la permeabilidad de la base granular bien compactada es baja (posiblemente inferior a $1 \times 10^{-4} \text{ cm/seg}$), y no permite el drenaje rápido del agua, lo cual también va en contradicción con el argumento usual de que estos materiales por ser granulares son permeables. El agua que queda atrapada en esta interfase, posteriormente absorberá las presiones transmitidas por los vehículos, y generará un efecto de subpresión o "bombeo" sobre la carpeta, destruyéndola con el tiempo (Ver Fotografía 4).

En la Figura 5 se presenta la EP del segundo modelo experimental, para ver la incidencia de incorporar una capa de gradación abierta (drenante). Inicialmente, se colocó y se compactó adecuadamente el material de base y subbase, y se obtuvieron los resultados esperados. El

Carpeta asfáltica

Fotografía 2



Fuente: Los autores

Capa de gradación abierta y tubería

Fotografía 3



Fuente: Los autores

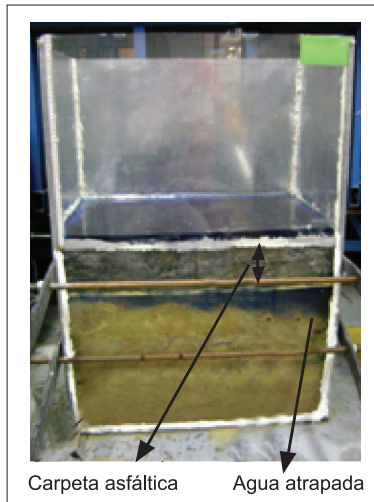
Estructura de pavimento flexible convencional

Figura 4



Fuente:

modelo de EP flexible con adición de una base abierta (como una estructura de drenaje), geotextil no tejido para evitar la migración de finos del material de base hacia la base abierta y tubería de drenaje para representar el sistema de descarga, drena el agua de infiltración de manera satisfactoria y prácticamente inmediata, ya que la permeabilidad (k) de este material drenante es alta, con valores superiores a $1 \times 10^{-1} \text{ cm/seg}$. (Ver fotografía 5)



Fuente: Los autores

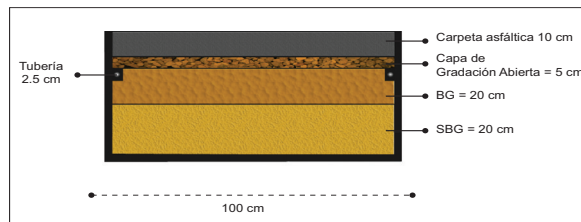
Es un método de diseño que permite reducir costos, ya que permite ampliar la vida útil de una estructura de pavimento.

Al comparar la Estructura de Pavimento Flexible convencional con la Estructura de Pavimento Flexible con adición de una Base Abierta, se evidencia que es un proceso cuyo desarrollo y eficiencia es gradual, y durante los primeros años los efectos pueden pasar inadvertidos. Se previene la infiltración de agua hacia la base desde la carpeta asfáltica, más no se está previniendo la infiltración de agua hacia la subbase desde la subrasante, cuando se tienen niveles freáticos altos. Para lo cual se recomienda implementar sistemas adicionales y convencionales que permitan controlar esta agua, como sistemas de filtro semiprofundos laterales.

Conclusiones y Recomendaciones

Al analizar cualitativamente el comportamiento del flujo del agua de infiltración a través del primer modelo y comparar los resultados con aquellos obtenidos mediante el análisis cualitativo a partir del segundo modelo, se evidencia la necesidad de drenar la estructura de pavimento, a causa de las filtraciones de aguas de escorrentía que pueden ocurrir a través de las capas de rodadura o asfálticas; esto con el fin de poder evitar que con el tiempo estas capas de rodadura se deterioren.

Figura 5 EP flexible con adición de una base abierta



Fuente:

Los materiales con gradaciones abiertas corresponden a materiales con granulometrías uniformes, con tamaños que pueden variar entre 2" y 1/2" (unidades SI).

Según las definiciones de las condiciones del drenaje de pavimentos (AASHTO, 1993), las cuales tienen en cuenta el tiempo requerido para que el 50% del agua libre sea drenada de la estructura, con los resultados obtenidos en el modelo experimental 2 se tiene que el método analizado para el control de las aguas de infiltración de las estructuras de pavimento flexible e implementado ya por otros (Cedergren, 1987), tiene una calidad de drenaje excelente, con lo cual se controla eficientemente el fenómeno del bombeo y generación de subpresión hidrostática, y por lo tanto se evitaría la destrucción o deterioro prematuro del pavimento.

Resultados encontrados

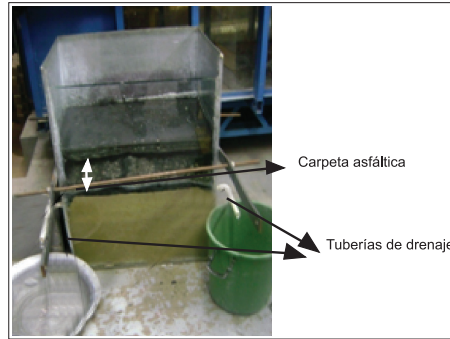
La Estructura de Pavimento flexible con adición de una base abierta es un método eficiente para el drenaje de aguas de infiltración, el cual puede ser extendido a las estructuras de pavimento rígido.

No se debe asumir en primera instancia, que las causas del deterioro de las capas de rodadura son debidas a malas calidades de los pavimentos o diseños deficientes de las estructuras de pavimento, cuando la causa posible más real es el deficiente drenaje interno de éstas y la acumulación de agua en la interfase de la carpeta con la superficie de la base que, con el paso de los vehículos, genera subpresiones o "bombeo" que pueden destruir temporalmente el pavimento.

Drenar eficiente y rápidamente el agua superficial es de suma importancia en una estructura de pavimento, ya que evita el hidroplaneo, haciendo más segura la circulación de los vehículos. También se evita la erosión que genera el flujo de agua en la capa de rodadura del pavimento y en los taludes de la sección vial, además evita que el agua se infiltre a través del pavimento y que ataque químicamente los materiales constitutivos de la capa de rodadura. Estudios han demostrado en el pasado, que hasta un 70% del agua de escorrentía se puede infiltrar a través de una carpeta asfáltica que tenga un uso y deterioro normal.

El agua que penetra el interior de un pavimento afecta directamente su capacidad estructural, debido a que

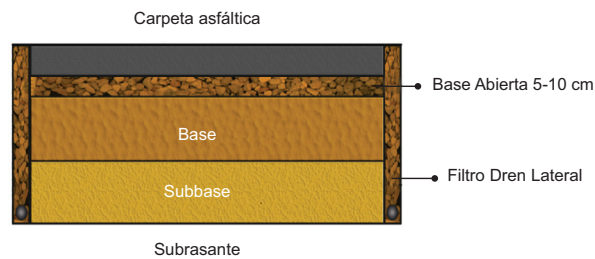
cuando el agua está presente en la base o subbase del pavimento, impide que éstas absorban la totalidad de los esfuerzos que les corresponden, transmitiendo por hidropresión a la subrasante, solicitaciones mayores a las esperadas. Por esta razón es evidente la necesidad del drenaje de esta agua; de otra forma también se puede generar el fenómeno de bañera, en el cual toda el agua queda atrapada en la estructura de pavimento si el material del subsuelo y subrasante es impermeable. En estos casos, las cargas transmitidas por los vehículos no son disipadas a través de la estructura de pavimento, sino que por el contrario, llegan en su totalidad a la subrasante, sobrecargándola y generando asentamientos o hundimientos que se reflejarán posteriormente en la superficie.



Fuente: Los autores

La inclusión de gradaciones abiertas en la estructura debe hacerse con especial cuidado durante el proceso de construcción, ya que se debe evitar que los agregados gruesos se llenen con finos o fango; de lo contrario la EP va a carecer de un drenaje efectivo, teniendo los mismos problemas de una estructura convencional de pavimento flexible que no contempla las gradaciones abiertas.

EP enterrada o en cajón

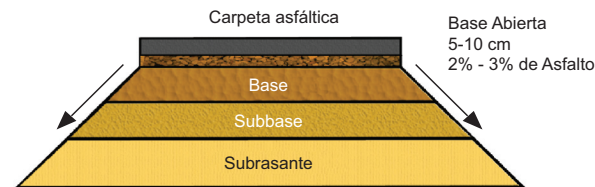


Fuente:

Figura 6

En el caso de una EP enterrada o en cajón, la base abierta queda confinada y no hay necesidad de estabilizar el material por la condición geométrica resultante, sin embargo, es necesario disponer de un sistema de filtro-dren convencional para evacuar eficientemente las aguas de infiltración (Figura 6).

EP en terraplén



Fuente:

Figura 7

Por el contrario, en una EP en terraplén es conveniente adicionar entre el 2 % y el 3 % de asfalto al material de gradacion abierta para darle estabilidad a la estructura, como se aprecia en la Figura 7.

Finalmente, esta investigación se enfocó en analizar cualitativamente el flujo de agua de infiltración a través de una EP flexible; dejando un precedente de la situación actual de los sistemas de drenaje empleados para la construcción de vías construidas en concreto asfáltico en la ciudad de Bogotá D.C. y proponer un método que permita el control de las aguas de infiltración de las EP desde el punto de vista geotécnico, más aún, es importante hacer un análisis de las cargas transmitidas por las llantas de los vehículos, el cual no fue incluido en este trabajo debido al alcance del mismo.

Bibliografía

1. CEDERGREN, Harry (1987) "Drainage of Highway and Airfield Pavements". Reprint edition with updating; Robert E. Krieger Publishing Company. U.S.A.

2. CEDERGREN, Harry (1977) "Seepage, Drainage and Flow Nets". Wiley-Interscience Second Edition.
3. (1997) "Understanding the Reason for Needing to Improve Drainage". U.S Roads, Road Management Journal, U.S.A.
4. SÁNCHEZ, Fernando, "Curso de Laboratorio de pavimentos, Guía para la interpretación de resultados". Universidad del Cauca. Colombia
5. LAMBE, William, WHITMAN, Robert. (2004) "Mecánica de suelos". Instituto Tecnológico de Massachussets – Limusa. México.
6. MUENCH Steve. "Pumping and faulting".
7. SOWERS, G.F. (1979) "Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering". Fourth edition.
8. GÓMEZ, J.N., (2007) "Notas del curso de especialización Flujo y Drenaje de Pavimentos". USTA. Colombia.
9. REYES, F.A (2004) Diseño Racional de Pavimentos, Universidad Javeriana y Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, ISBN 958-683-622-3. Colombia.