

# Efectos de las tolerancias de construcción en el desempeño de los pavimentos flexibles

## Effect of construction tolerance on flexible pavement performance

Cesar Sandoval\*, Armando Orobio<sup>1</sup>\*

\*Universidad de Valle, Cali. COLOMBIA

Fecha de Recepción:06/03/2013  
Fecha de Aceptación:08/11/2013  
PAG 158 - 169

### Resumen

La consistencia entre el diseño y construcción es un factor importante para el desempeño de los pavimentos, el espesor de las capas juega un papel importante en el comportamiento los pavimentos flexibles en servicio, las diferencias en espesor de las capas entre el diseño y el pavimento construido, son determinantes en el desempeño de la estructura. Las especificaciones técnicas colombianas de construcción de carreteras permiten unas tolerancias constructivas en el espesor de las capas de los pavimentos, que podrían incidir en la disminución de la vida útil de los pavimentos en servicio. Se realizó un estudio para determinar si las tolerancias permitidas, tienen efecto significativo en el desempeño de los pavimentos flexibles, se analizaron dos estructuras de pavimento, una de las cuales incluía una capa estabilizada con cemento. Utilizando técnicas estadísticas de simulación, para cada estructura se variaron de manera simultánea los espesores de todas sus capas dentro de las tolerancias permitidas, se realizaron 100 variaciones para cada estructura, y posteriormente se evaluó el desempeño de cada combinación de espesores utilizando el software de la Guía Mecanicista – Empírica para el diseño de pavimentos (MEPDG), los parámetros estudiados fueron rugosidad, fisuras piel de cocodrilo y ahuellamiento. Los resultados muestran que reducciones de espesor de la carpeta asfáltica y la capa estabilizada con cemento dentro de las tolerancias permitidas, tienen una incidencia significativa en el deterioro prematuro de los pavimentos. Las variaciones de espesor dentro de las tolerancias permitidas de las capas base y subbase, no tienen incidencia significativa en el desempeño de estas estructuras.

**Palabras Clave:** Diseño de pavimentos, construcción de pavimentos, tolerancias constructivas, MEPDG, Mecanicista – Empírica

### Abstract

*The consistency on design and construction is an important factor on pavement performance. Layer thicknesses play an important role in the response of flexible pavements on service. Differences on layer thickness between as-designed and as-built are significant in the performance of a pavement structure. Colombian highway construction specification allows tolerances in pavement layer thicknesses which may shorten the pavement service life. A study was performed to investigate whether the allowed construction tolerances have significant effect on flexible pavement performance. Two flexible pavement structures were analyzed; one structure included a cement-treaded base layer. For each structure, all layer thicknesses were varied simultaneously within the construction tolerances by using statistical simulation techniques, a total of 100 variations were performed for each structure. The performance of the resulting modified structures was evaluated using the companion software of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). The parameters considered in this study were roughness, bottom-up cracking, and rutting. The results show that reductions on thickness in the asphalt layer and the cement-treaded base layer, within construction tolerances, have significant effect on pavement performance. Variations on layer thicknesses, within construction tolerance, of granular base and sub-base have no significant effect on pavement performance.*

**Keywords:** Pavement design, pavement construction, Construction tolerances, MEPDG, Mechanistic -Empirical

## 1. Introducción

La estructura de un pavimento flexible se compone de varias capas que pueden ser asfálticas, granulares o estabilizadas, el diseño de este tipo de estructura consiste en determinar las características y los espesores de cada capa, con el propósito de que la estructura resultante pueda soportar las cargas del tránsito, bajo las condiciones climáticas esperadas y suministrando unas buenas condiciones de servicio durante el periodo de diseño.

## 1. Introduction

*The structure of a flexible pavement is composed of several layers: asphaltic, granular or stabilized layers. The design of such kind of structure consists in determining the characteristics and thicknesses of each layer, so that the resulting structure will be able to bear traffic loads under expectable weather conditions, thus providing appropriate pavement condition during the design period.*

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: armando.orobio@correounivalle.edu.co

Para el diseño se consideran las propiedades de los materiales y de la subrasante, el tránsito y las condiciones climáticas. La consistencia entre el diseño y construcción es un factor importante para el desempeño de los pavimentos, el espesor de las capas juega un papel importante en el comportamiento de los pavimentos flexibles en servicio (Jiang et al., 2003), las diferencias de espesor de las capas entre el diseño y el pavimento construido son determinantes para la durabilidad de la estructura. Por ejemplo las fisuras dependen altamente del espesor de las capas (Xu et al., 2011).

Las variaciones de los espesores de las capas debidas a problemas constructivos, influyen en el desempeño de una estructura de pavimento afectando su durabilidad. Alrededor de este tema existen investigaciones que relacionan el diseño del pavimento asfáltico con la construcción del mismo, se ha demostrado un amplio margen de variación de los espesores de las capas construidas con respecto al diseño planteado y que estas variaciones presentan una distribución normal (Jiang et al., 2003), la tendencia es que los espesores de las capas delgadas tienden a estar por encima del diseño, mientras que para capas gruesas la construcción se realiza por debajo de los límites definidos en el diseño (Mladenovic et al., 2007). Otro problema es el cambio de espesor de las capas asfálticas en servicio originado por problemas de compactación (Xu and Huang, 2011).

Se requiere un mejor conocimiento de la relación diseño – construcción y del efecto de sus desviaciones sobre el desempeño de las estructuras de pavimento, para valorar los procesos constructivos, mejorar la calidad en la infraestructura vial y perfeccionar los conceptos de confiabilidad en las metodologías de diseño de pavimentos.

El objetivo de esta investigación fue evaluar los efectos en el desempeño pavimentos flexibles, de las diferencias entre el diseño y la construcción en el espesor de las capas, asumiendo la realización de buenos procesos constructivos y controles de calidad para cumplir con las exigencias de las especificaciones colombianas de construcción de carreteras (Invias, 2007), las cuales permiten unos márgenes de tolerancia entre diseño y construcción para los espesores de las capas del pavimento, el efecto de estas tolerancias no ha sido evaluado anteriormente.

En la investigación se analizaron dos estructuras de pavimento, una de las cuales incluía una capa estabilizada con cemento. Utilizando la técnica de muestreo estadístico Hipercubo Latino (Latin Hypercube Sampling, LHS), para cada estructura se variaron de manera simultánea los espesores de todas sus capas dentro de las tolerancias permitidas, se realizaron 100 variaciones para cada estructura, y posteriormente se evaluó el desempeño de cada combinación de espesores utilizando el software de la Guía Mecanicista – Empírica para el diseño de pavimentos (MEPDG), los parámetros estudiados fueron rugosidad, fisuras piel de cocodrilo y ahuellamiento.

### Hipercubo Latino (LHS)

LHS es una técnica de muestreo aleatorio en la cual la región experimental es dividida en  $n$  estratos o áreas de muestreo con espacios de igual longitud e igual probabilidad, para cada estrato se genera una muestra aleatoria representativa, que se repite según el número de intervalos para obtener una muestra representativa de la región experimental (Baron, 1999).

*Material and sub-grade properties, as well as traffic and weather conditions, are considered during design stage. Consistency between design and construction stages is a key factor for pavement behavior. Layer thicknesses play an important role on the behavior of in-service flexible pavements (Jiang et al., 2003). Difference on pavement layer thicknesses between as-designed and as-built are a decisive factor for the structure durability. For example, fissures highly depend on layers thicknesses (Xu et al., 2011).*

*Layer thickness variations, due to constructive problems, affect the pavement structure durability. In this regards, there are several research works relating as-designed with as-built asphaltic pavement, which demonstrate a wide thickness variation margin on as-designed and as-built layers. Such variations show a normal distribution; the trend is that thicknesses of thin layers tend to be above the ones designed. Meanwhile, for thick layers construction is carried out under as-designed limits. (Mladenovic et al., 2007). Other problem is the variation of in-service asphaltic layers thicknesses due to compactation effect (Xu and Huang, 2011).*

*Detailed knowledge on design-construction relationship and the effect of its deviations on pavement structure performance are required; so as to assess constructive processes, improve roads infrastructure quality and improve the reliability concepts on pavements design methodologies.*

*The purpose of this research is to evaluate the effects of as-designed and as-built layers thicknesses on flexible pavements performance, assuming that proper execution of construction process and quality control are provided, in order to fulfill the highway construction specifications in Colombia (Invias, 2007). Such specifications allow tolerance margins between as- designed and as-built pavement layers thicknesses. The effect of such tolerances has not been assessed previously.*

*This research analyzed two pavement structures; one of them included a cement-treaded base layer. By employing the statistical technique of Latin Hypercube Sampling (LHS) on each structure, the thicknesses of all layers were simultaneously modified within allowed tolerances. 100 variations were carried out for each structure and later the performance of each layer thickness combination was assessed by employing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). The studied parameters were roughness, bottom-up cracking and rutting.*

### Latin Hypercube Sampling (LHS)

*LHS is a random sampling technique, where the experimental area is divided into  $n$  strata, or sampling sections, of identical length and probability. For each stratum a representative random sample is created, which is repeated according to the number of intervals, so as to obtain a representative sample of the experimental area (Baron, 1999).*

Los estratos se distribuyen uniformemente a lo largo de la región experimental, y de manera aleatoria se selecciona un punto de cada estrato, para constituir una muestra de tamaño  $n$  (Santner et al., 2003). El uso de LHS permite generar muestreos con observaciones distribuidas uniformemente a lo largo de cada variable.

Para realizar una simulación con LHS, el modelo en estudio se debe correr el número de iteraciones correspondientes a las divisiones o intervalos que se generaron en un inicio para la aplicación del LHS. La utilización del LHS en problemas de simulación, disminuye los tiempos y complejidades de ejecución cuando se trabaja con gran cantidad de variables y datos para estas (Matala, 2008).

### Guía Mecanicista – Empírica para el diseño de pavimentos (MEPDG)

MEPDG fue el resultado de investigaciones desarrolladas en los Estados Unidos, enfocadas a desarrollar un método de diseño de pavimentos basado en los principios de diseño mecanicista – empírico (ARA, 2004). Recientemente introducida, MEPDG y su software asociado de diseño constituyen un cambio significativo al estado de la práctica en diseño de pavimentos. La metodología de diseño involucra modelos de respuestas y modelos de desempeño con los cuales se simula el comportamiento de un pavimento prediciendo el deterioro a lo largo del periodo de diseño, los datos de entrada se agrupan en cargas de tránsito, propiedades de los materiales y efectos climáticos.

Con el desarrollo de MEPDG se mejoran aspectos de diseño que anteriormente no se tenían en cuenta o que presentaban resultados con menor precisión que las metodologías de diseño anteriores. Por ejemplo, MEPDG permite manejar con alto nivel de detalle las propiedades de los materiales y los efectos climáticos, el software permite simular el comportamiento de la estructura a lo largo del periodo de diseño e identificar si existe falla prematura del pavimento, la precisión de la simulación dependerá de la calidad de la información utilizada y de la calibración de los modelos de desempeño a las condiciones locales (Bustos et al., 2011).

## 2. Procedimiento de la simulación

Se desarrollaron cuatro etapas para analizar los efectos de la variabilidad de los espesores de las capas en el desempeño de los pavimentos: 1) Definición de las estructuras a evaluar, 2) Identificación de las tolerancias constructivas en espesor de las capas, 3) Simulación computacional y 4) análisis de resultados.

### Estructuras evaluadas

Se definieron dos estructuras de pavimento a partir de un análisis sobre los tipos de materiales más usados en la región, Figura 1. La Estructura 1 está conformada por carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, este tipo de estructura se escogió porque su uso es muy común en la región. La Estructura 2 con la misma configuración que la anterior, pero con una base estabilizada con cemento bajo la carpeta asfáltica, es más rígida que la Estructura 1 y permitió evaluar el efecto en desempeño de las variaciones en espesor de capas estabilizadas con cemento.

*Strata are uniformly allocated along the experimental area. A stratum reference point is selected at random, in order to build an  $n$  size sample (Santner et al., 2003). The use of LHS allows samples production of uniformly distributed recordings alongside each variable.*

*In order to carry out a LHS simulation, the model under study shall be run the number of iterations corresponding to the intervals previously created for the application of LHS. The use of LHS in simulation processes decrease execution times and complexities of employing a great amount of variables and data (Matala, 2008).*

### Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)

*MEPDG is the result of research carried out in the United States, oriented to develop a pavement design method based on mechanistic-empirical pavement design principles (ARA, 2004). Newly introduced, MEPDG and its companion design software constitute a significant improvement to the state of practice on pavement design. This design methodology involves response models and performance models used to simulate pavement behavior by predicting its performance over the design period the design period. Entry data are grouped into traffic loads, material properties and weather conditions.*

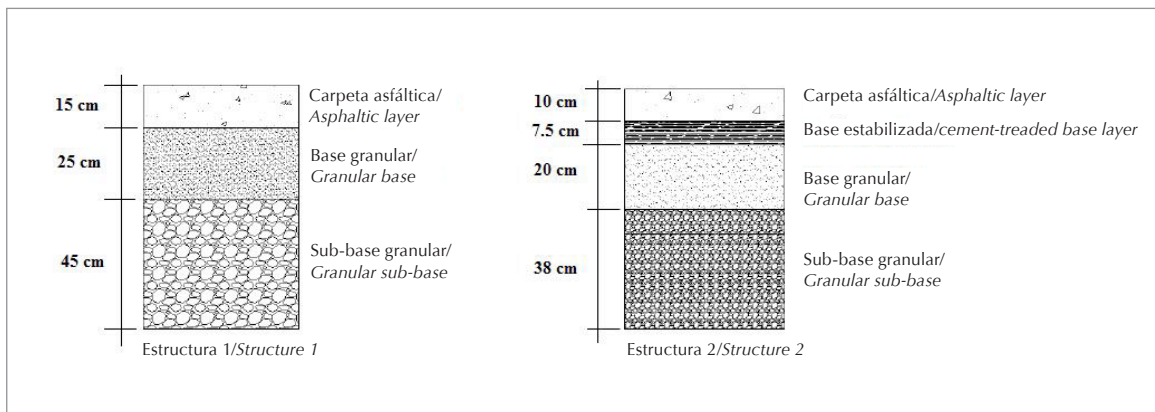
*The use of MEPDG improves design issues, which were previously not considered or delivered less accurate results from previous design methodologies. For example, MEPDG controls material properties and weather effects in detail. The software is able to simulate the structure behavior for the whole design period and to identify when an early pavement failure is taking place. The simulation accuracy will depend on the quality of information employed and the calibration of the performance models to local conditions (Bustos et al., 2011).*

## 2. Simulation procedure

*Four stages were developed to analyze the effects of layers thicknesses variability on pavement performance: 1) Definition of structures to be evaluated; 2) Identification of constructive tolerances for layers thicknesses; 3) Computer simulation; and 4) Result analysis.*

### Evaluated structures

*Two pavement structures were defined from the analysis on the most common materials in the local region, Figure 1. The Structure 1 is composed by the asphaltic layer, granular base and granular sub-base. This type of structure was selected because its use is quite common in this region. The Structure 2 has the same layout as the first structure, but includes a cement-treaded base layer (more rigid than Structure 1), which enabled the assessment of performance effect of thickness variations on cement-treaded base layers.*



**Figura 1.** Estructuras

**Figure 1.** Structures

Para la determinación de los propiedades de los materiales para el diseño con MEPDG, se utilizó el nivel jerárquico 3, permitiendo que el módulo de las carpetas asfálticas fuera estimado en ambas estructuras, a partir de la ecuación predictiva de MEPDG con base en las características de la mezcla asfáltica, la relación de poisson de la mezcla asfáltica fue de 0.35. MEPDG estima las variaciones de las propiedades de las mezclas asfálticas a través del periodo de diseño dependiendo de las condiciones climáticas las cuales fueron ajustadas al sur occidente colombiano. Para ambas estructuras el módulo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) para base, subbase y subrasante fueron 2110, 1760 y 1055 respectivamente, la relación de poisson fueron 0.4, 0.4 y 0.45 respectivamente. Para la base estabilizada con cemento el modulo fue de  $7000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  y la relación de poisson de 0.2.

Cada estructura fue diseñada para unas condiciones de servicio previamente establecidas, el diseño se realizó utilizando MEPDG, de tal manera que se cumplieran todos los criterios de diseño y que los espesores de capas se ajustaran lo más posible a los requerimientos del tránsito y clima, considerando las propiedades de los materiales. El tránsito, las condiciones climáticas y propiedades de los materiales fueron parámetros fijos y no se variaron durante la simulación, la interacción entre estos factores podría generar resultados diferentes bajo otras condiciones, pero la metodología presentada en este artículo puede ser utilizada bajo diferentes combinaciones de clima, tránsito y propiedades de materiales.

### Tolerancias constructivas

Las tolerancias son diferencias constructivas permitidas en el espesor de las capas terminadas de un pavimento con respecto al espesor requerido en el diseño. Aunque lo ideal sería que no existieran diferencias entre los espesores de las capas terminadas y su correspondiente diseño, la realidad es que se presentan diferencias que pueden ser por exceso o por defecto, y que son debidas a la falta de precisión de los procesos constructivos o a deficiencias en control de calidad.

The determination of material properties for MEPDG design employed a hierarchic level 3. The asphaltic layers module was assessed in both structures by means of the MEPDG predictive equation based on the characteristics of the asphaltic mix: Poisson ratio for the mix was 0.35. MEPDG estimates the variations of asphaltic mixes properties during design period, depending on weather conditions, which were considered using data of western south area in Colombia. In both structures the module ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) for the base, sub-base and sub-grade were 2110, 1760 and 1055, respectively; Poisson ratio: 0.4, 0.4 and 0.45, respectively. For the cement-treated base layer the module was  $7000 \text{ kg}/\text{cm}^2$  and Poisson ratio of 0.2.

Each structure was designed in accordance to previously established service conditions. Design was developed employing MEPDG, in such a manner all design criteria were met and all layer thicknesses fitted, as much as possible, to traffic and weather requirements, by considering material properties. Traffic loads, weather conditions and material properties are fixed parameters and were not modified during the simulation process. The interaction of such factors could deliver different results under different conditions. However, the methodology introduced by this paper can be used under different combinations of weather, traffic and material properties.

### Construction tolerance

Tolerances are constructive differences allowed for layers thicknesses of a built pavement, in relation to the thickness required by design stage. Although, it would be expected that there were not differences between as-designed and as-built layer thicknesses, the practice shows differences due to excess or imperfection because of the lack of accuracy during constructive processes or poor quality control.

**Tabla 1.** Tolerancias en espesor capa según tipo de material (Invias, 2007)**Table 1.** Layer Thickness Tolerance as per material type (Invias, 2007)

CAPA DEL PAVIMENTO/ PAVEMENT LAYER	TOLERANCIA/ TOLERANCE mm	OBSERVACIÓN/ RECORDINGS
Sub-base granular/ Granular sub-base	20	Ajuste a rasante y pendientes exigidas y sin zonas que retenga agua superficial./ Fitted to grade and steep slopes in areas not retaining surface water.
Base granular/ Granular base	20	Ajuste a rasante y pendientes exigidas y sin zonas que Retenga agua superficial./ Fitted to grade and steep slopes in areas not retaining surface water.
Base estabilizada con emulsión asfáltica/ Asphalt-treaded base layer	10	La cota de cualquier punto de la capa compactada no deberá variar excediendo lo indicado./ Maximum level at any point of the compacted layer shall not exceed specified limit.
Base estabilizada con cemento/ Cement-treaded base layer	10	La cota de cualquier punto de la capa compactada no deberá variar excediendo lo indicado./ Maximum level at any point of the compacted layer shall not exceed specified limit.
Base de concreto hidráulico/ Hydraulic cement base	5	La base curada no deberá variar en más de 5mm y no deberá tener depresiones mayores de este valor./ Cured base shall not exceed 5mm and shall not have depressions above this value.
Mezcla densa en frío/ Cold dense mix	10	La mezcla densa compactada en capas de base, intermedia o rodadura no deberá variar en más de lo indicado/ Cold dense mix compacted on base layers, intermediate or cement-treaded layers shall not exceed specifications.
Mezcla abierta en frío/ Open graded cold mix	10	La mezcla abierta en frío compactada en capas de rodadura o intermedia no deberá variar en más de lo indicado/ Open graded cold mix compacted on tread layers, intermediate or not, shall not exceed specifications.
Mezclas asfálticas en caliente (Concreto asfáltico y mezcla de alto Modulo)/ Hot mix asphalt (asphaltic concrete and high module mix)	15	La cota de cualquier punto de mezcla asfáltica compactada en capas de base no debe variar en mas de 15mm./ Maximum level at any point of asphaltic mix compacted on the base layers shall not exceed 15mm.
	10	Cualquier punto de mezcla asfáltica compactada en capas de rodadura e intermedia no debe variar en mas de 10mm./ Any point of the asphalt mix compacted on tread layers and intermediate layers shall not exceed 10mm.
Mezcla abierta en caliente/ Open graded hot mix	10	Cualquier punto de la mezcla abierta en caliente compactada no debe exceder más de lo indicado./ Any point of open compacted graded hot mix shall not exceed specifications
Mezcla discontinua en caliente para la Capa de rodadura (microaglomerado en Caliente)/ Non-continuous hot mix for tread layer(hot mastic)	10	La cota de cualquier punto de mezcla discontinua en caliente, compactada no debe variar en más de 10mm./ Maximum level at any point of non-continuous hot mix shall not exceed 10mm.
Mezcla drenante/ Draining mix	10	La cota de cualquier punto de mezcla drenante, compactada no debe variar en más de 10mm./ Maximum level at any point of draining mix shall not exceed 10mm.
Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes Bituminosos/ Cold recycled asphaltic pavement recycled on site by using binders	10	La cota de cualquier punto de la capa reciclada en frío no debe variar en más de 10mm./ Maximum level at any point of cold recycled layer shall not exceed 10mm.
Pavimento en concreto hidráulico/ Hydraulic cement pavement	5 y -3	La cota de cualquier punto de pavimento curado no deberá variar en más de 5mm y no debe existir depresiones mayores a 3mm./ Maximum level at any point of cured pavement shall not exceed 5mm and depressions shall not be above 3mm



Las tolerancias constructivas en espesor de la capas permitidas por las especificaciones colombianas de construcción de carreteras se indican en la Tabla 1 (Invias, 2007), en la cual se puede apreciar que dependiendo del tipo de material de la capa varia la tolerancia permitida en espesor, para capas granulares no ligadas se permiten tolerancias de hasta 20 mm, para bases estabilizadas con asfalto o cemento se permiten hasta 10 mm, para mezclas asfálticas en frio se permiten hasta 10 mm, para material asfáltico reciclado en frio con ligantes bituminosos hasta 10 mm y para mezclas asfálticas en caliente hasta 15 mm.

Aunque estas tolerancias individualmente parecen pequeñas, la suma de las tolerancias que ocurren simultáneamente en toda la estructura puede resultar significativa, por ejemplo el caso más crítico para la estructura 1 presentaría una reducción de 15 mm de carpeta, 20 mm de base y 20 mm de subbase, la estructura tendría una reducción en el espesor total de 55 mm. En estructuras con más capas la disminución en espesor total permitida sería mayor.

### Simulación computacional

Para esta investigación se utilizaron modelos computacionales para el muestreo de espesores de capas y para la predicción del desempeño de los pavimentos. La obtención de las combinaciones de los espesores de las capas se realizó utilizando la técnica de muestreo aleatorio LHS y el análisis de las estructuras de pavimento se realizó con MEPDG. LHS permite considerar el efecto aleatorio de la desviación en espesor de las capas construidas con respecto al diseño, teniendo en cuenta que la variación en una capa es independiente de la variación en las otras capas, y que las variaciones en cualquiera de las capas pueden ocurrir simultáneamente en una misma estructura.

*Construction tolerances on layers thicknesses allowed by Colombian specifications for highways construction are shown by Table 1 (Invias, 2007). Table 1 shows that depending on the type of layer material, the allowed tolerance varies as far as thickness is concerned. For unbound granular layers, tolerances up to 20 mm are allowed; for asphalt or cement treaded base layers up to 10 mm, for cold mix asphalt up to 10 mm, for recycled asphalt material with cold bituminous binders up to 10 mm and, for hot mix asphalt up to 15 mm.*

*Although these individual tolerances seem to be small, the addition of tolerances taking place simultaneously in the whole structure results significant. For example the most critical case for Structure 1, would represent a reduction of 15 mm for the asphalt layer, 20 mm for the base, and 20 mm for the sub-base. Therefore, the structure would have a total thickness reduction of 55 mm. For structures having more layers; the allowed thickness reduction would be higher.*

### Computer simulation

*The current research employed computerized models for layers thicknesses sampling and for predicting pavement performances. In order to obtain layers thicknesses combinations, the random sampling technique LHS was employed. The analysis of pavement structures was carried out by using MEPDG. LHS allows to consider the random effect of thickness deviation on as-built layers compared to as-designed layers, by taking into consideration that variation in one layer is independent from the other layers variation. However, variations in any layer may take place in the structure simultaneously.*

**Tabla 2.** Rangos de variación en espesor de las capas

**Table 2.** Variation ranges for layer thickness

#### Estructura 1/ Structure 1

Tipo de Capa/ Type of layer	Espesor Inicial/ Initial thickness (mm)	Rango de Variación/ Variation range (mm)
Carpeta asfáltica/ Asphaltic layer	150	140 - 160
Base granular/ Granular base	250	230 - 270
Subbase granular/ Granular sub-base	450	430 - 470

#### Estructura 2/ Structure 2

Tipo de Capa/ Type of layer	Espesor Inicial/ Initial thickness (mm)	Rango de Variación/ Variation range (mm)
Carpeta asfáltica/ Asphaltic layer	100	90 - 110
Base estabilizada con cemento/ Cement treaded base layer	75	65 - 85
Base granular/ Granular base	200	180 - 220
Subbase granular/ Granular sub-base	380	360 - 400

En primer lugar, para cada estructura en el análisis se definieron los rangos de variación posibles para cada una de las capas constitutivas del pavimento según las tolerancias de la Tabla 1, los rangos de variación se muestran en la Tabla 2.

Utilizando LHS se definieron 100 iteraciones para cada estructura en estudio, cada iteración correspondía a una estructura similar a la inicial, pero con variaciones de espesor en cada una de sus capas, estas variaciones se limitaron a las tolerancias permitidas. Con este procedimiento se garantizó la aleatoriedad en la selección de cada espesor, es decir que cada iteración representó una situación que puede ocurrir en la construcción.

Posteriormente para cada iteración se realizó la predicción del desempeño utilizando MEPDG. En total se realizaron 200 corridas de MEPDG, 100 para la estructura 1 y 100 la estructura 2. Los parámetros que se analizaron fueron rugosidad, fisuras piel de cocodrilo y ahuellamiento, MEPDG mide la rugosidad en términos del Índice Internacional de Rugosidad, IRI (ARA, 2004). Para efectos del estudio se definió que la falla de la estructura ocurre para cualquiera de las siguientes situaciones:  $IRI \geq 2.7$  m/km, fisuras piel de cocodrilo  $\geq 25\%$  o ahuellamiento  $\geq 15$  mm.

Por último se realizó un análisis de la información obtenida en la simulación para evaluar el efecto de las variaciones en espesor sobre cada uno de los parámetros estudiados y la falla prematura del pavimento según el periodo de diseño.

### 3. Resultados de la simulación

Para cada estructura se realizó un análisis de los resultados de la simulación orientado a identificar la incidencia de la variación de las capas en los deterioros precedidos por MEPDG.

#### Análisis de la estructura 1

La Figura 2 muestra el comportamiento del IRI, ahuellamiento y fisuras piel de cocodrilo con la variación de las capas de la estructura 1. Existe una alta correlación de la variación del espesor de la carpeta asfáltica y las variaciones de los deterioros en el pavimento, a medida que disminuye el espesor de carpeta se incrementa el IRI, el ahuellamiento y las fisuras, aun con variaciones dentro de las tolerancias permitidas. Esta correlación no se observa en la capas granulares de base y subbase.

Para el caso de una estructura de pavimento conformada por carpeta, base y subbase granular, como la estructura 1, la durabilidad del pavimento se ve comprometida debido a las variaciones de la carpeta asfáltica, aun cuando están variaciones están dentro de las tolerancias permitidas por las especificaciones de construcción.

Un buen diseño con la metodología MEPDG, exige que todos los parámetros estén por debajo del límite de falla al final del periodo de diseño. Al comparar estos resultados obtenidos en la simulación con los límites de diseño indicados anteriormente, se observa que el parámetro que controló el diseño fue el ahuellamiento.

*In the first place, for each structure under analysis the probable variation ranges were defined for each pavement constructive layer, in accordance with tolerances shown on Table 1. Variation ranges are displayed on Table 2.*

*By employing LHS, 100 iterations were defined for each structure under analysis. Each repetition corresponded to a structure which is similar to the initial one, but having thickness variations for every layer, which were restricted to allowed tolerances. This procedure guaranteed randomness of each thickness selection. Then, each repetition represented a situation, which is likely to occur in construction processes.*

*Afterwards, for each repetition a performance prediction was developed by using MEPDG. In total 200 MEPDG repetitions were carried out: 100 for Structure 1 and; 100 repetitions for Structure 2. Parameters analyzed included roughness, bottom-up cracking and rutting. MEPDG measures roughness in terms of International Roughness Index, IRI (ARA, 2004). For this research purposes it was defined that the structure failure takes place under any of the following situations:  $IRI \geq 2.7$  m/km, bottom-up cracking  $\geq 25\%$  or rutting  $\geq 15$  mm.*

*Finally, an analysis was developed by using the information achieved from computer simulation, so as to evaluate the effect of thickness variations on each studied parameter and, the pavement early failure in accordance with the design period.*

### 3. Results from simulation

*An analysis was developed using the results obtained from simulations on each structure, which purpose was to identify the effect of layers thicknesses variations on failures preceding MEPDG.*

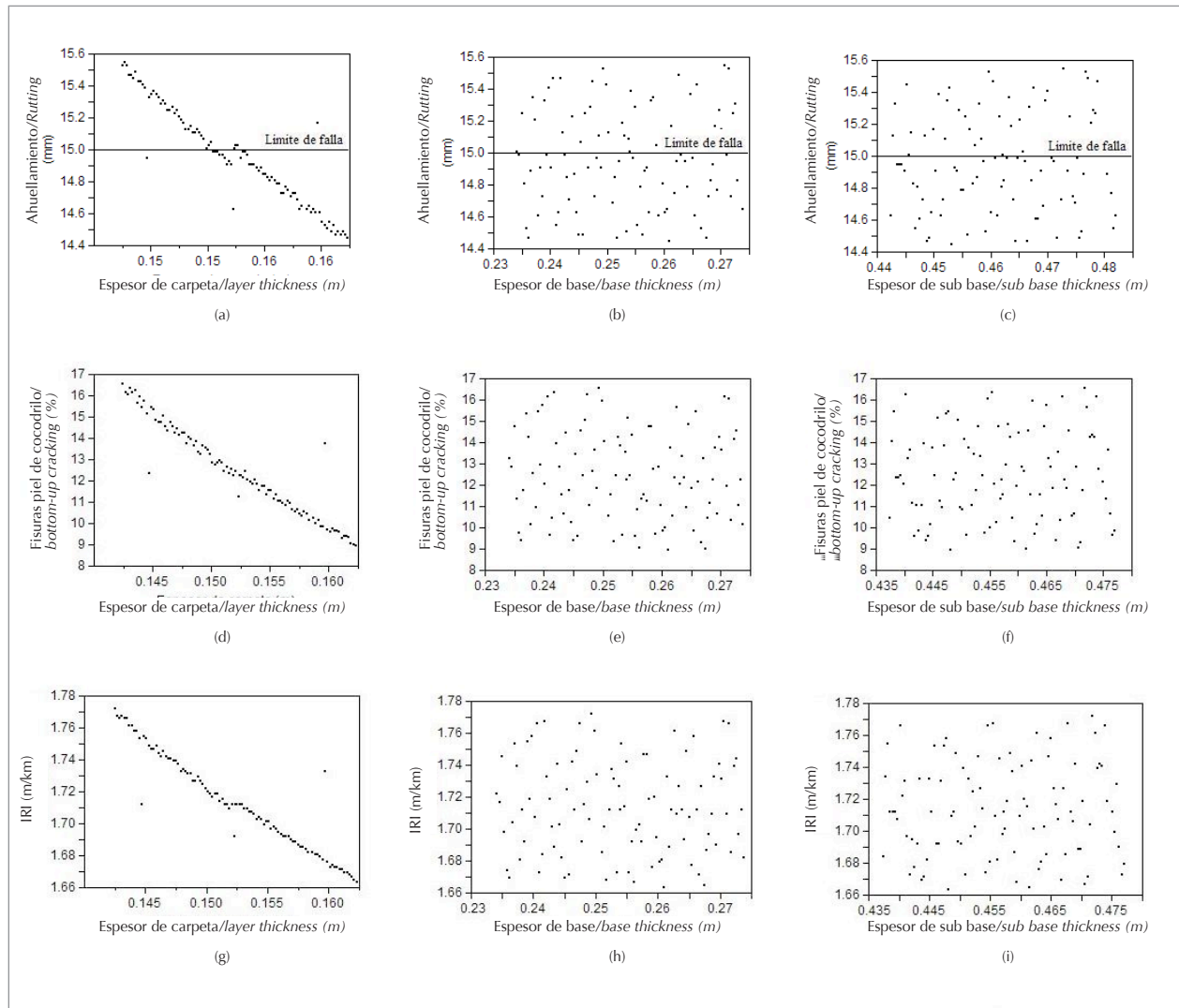
#### Analysis of structure 1

*Figure 2 shows the IRI behavior as well as rutting and bottom-up cracking behaviors upon the layers thicknesses variations in Structure 1. There is a high correlation between the asphalt layer thickness variation and the pavement failures variations; as long as the layer thickness is decreased, IRI, rutting and cracking increase even using variations within allowed tolerances. Such correlation is not observed from granular layer bases and sub-bases.*

*In the case of a pavement structure made up by asphalt layer, granular base and granular sub-base, as Structure 1; the pavement durability becomes compromised by the asphalt layer variations, even when such variations are within tolerance limits allowed by construction specifications.*

*An adequate MEPDG design specifies that all parameters shall be under failure limit, by the end of design period. When comparing results obtained from simulation, by employing previously established design limits, it is observed that rutting is the parameter that controlled the design.*





**Figura 2.** Efecto variaciones de espesor en estructura 1

**Figure 2.** Effect of thickness variations on Structure 1

Para el caso del ahuellamiento, la Figura 2 muestra el límite de falla y se observa que hay valores superiores al límite, el 47 % de las estructuras (iteraciones) fallan antes de concluido el periodo de diseño. Entre las estructuras que fallan el 89.3% presentan espesores de carpeta asfáltica inferiores al diseño original, 53.2 % presentan espesor de base inferior al diseño original y 44.7 % presentan espesor de subbase inferior al diseño original. En otras palabras entre las estructuras que fallan la gran mayoría presenta reducción de espesor de carpeta asfáltica respecto al diseño original y cerca de la mitad presentan espesores inferiores de subbase y base granular, en consecuencia la otra mitad restante tendrá espesores superiores de base y subbase. Lo anterior sumado a la ausencia de correlación de la variación de espesores con las variaciones de los deterioros, indica que las variaciones de espesor de las capas granulares de base y subbase dentro de las tolerancias permitidas, no tiene una incidencia significativa en la durabilidad del pavimento.

*In the case of rutting, Figure 2 shows the failure limit and we can observe there are values above the limit. 47% of structures (iterations) failed before concluding design period. Among failed structures, 89.3% of them show asphalt layer thicknesses lower than the original design. 53.2% of them have a base thickness lower than the original design and, 44.7% have a sub-base thickness lower than the original design. In other words, most failed structures have an asphaltic layer reduction in comparison to the original design. Almost half failed structures have lower granular sub-base and granular base thicknesses. Consequently, the remaining half will have higher layers thicknesses for base and sub-base. Above, together with the lack of correlation between thickness variations and failure variations, shows that thickness variations for granular base and granular sub-base (within the allowed tolerances), do not significantly affect pavement durability.*



Los límites de falla para IRI y fisuras no se muestran en la Figura 2, porque ninguna de las estructuras alcanza los límites de diseño. El valor máximo de IRI alcanzado en las iteraciones fue de 1.77 m/km, de igual manera para las fisuras el valor máximo alcanzado fue de 16,5 %.

## Análisis de la estructura 2

La diferencia entre la estructura 1 y 2 es que esta última incluye una capa de base estabilizada con cemento, la incorporación de esta capa permitió analizar el desempeño del pavimento ante las variaciones de espesor de este tipo de capa dentro de las tolerancias permitidas.

El análisis de los resultados de la simulación para la estructura 2, confirma que las variaciones de espesor de la base y subbase granular dentro de las tolerancias permitidas, tiene poca incidencia en el desempeño del pavimento, por lo que el análisis de estas capas excluye para la estructura 2.

La Figura 3 muestra el efecto de las variaciones permitidas del espesor de las capas con respecto a los deterioros en estudio. Se observa que ocurren fallas para todos los deterioros estudiados, la cantidad de estructuras que fallan por IRI es reducida en comparación con las estructuras que fallan en los otros deterioros.

El 49% del total de las estructuras fallan por ahuellamiento, pero varias estructuras fallan con valores muy cercanos al límite de falla, de tal manera que un leve incremento de espesor haría que estas estructuras pasaran por debajo del límite de falla. Otras estructuras tienen valores de ahuellamiento superiores a 20 mm, por lo que el análisis se concentra en estas estructuras con el propósito de eliminar la incertidumbre que se tendría con las estructuras que están cercanas al límite. Estas estructuras representan el 18% del total y en su gran mayoría presentan disminución de espesores en la capa de la base estabilizada, en este grupo se observa una clara tendencia a aumentar el ahuellamiento a medida que disminuye el espesor de la carpeta asfáltica (Figura 3), esta misma tendencia se observa para IRI y fisuras piel de cocodrilo.

La Figura 3 no muestra correlación de las variaciones de espesores de la base estabilizada con cemento con los deterioros del pavimento, sin embargo entre las estructuras que fallan con más de 20 cm de ahuellamiento, el 78% presenta espesores de base estabilizada menores al del diseño original y en algunos casos la falla ocurre incluso en estructuras con espesores de carpeta ligeramente mayor al del diseño original. Lo anterior indica que existe un efecto considerable de la reducción del espesor de esta capa en el desempeño de la estructura.

*Failure limits for IRI and cracking are not shown in Figure 2, because structures do not achieve design limits at all. The maximum IRI value achieved by iterations was 1.77 m/km. Similarly, cracking achieved a maximum value of 16.5%.*

## Analysis of Structure 2

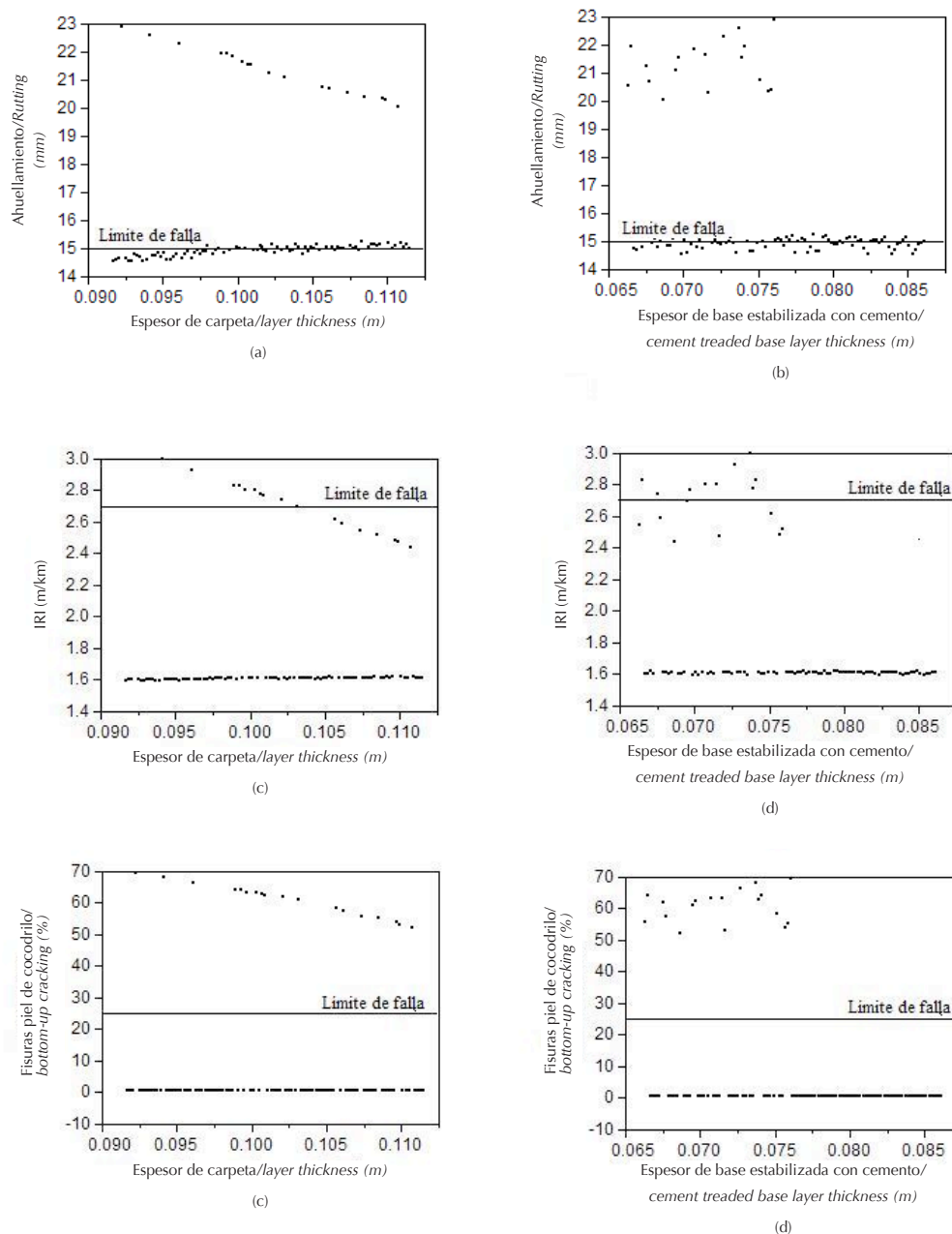
*The difference between Structures 1 and 2 is that the latter includes a cement-treated layer, which allowed the analysis of pavement performance facing thickness variations, among allowed tolerances for this type of layers.*

*The analysis of simulation results from Structure 2 confirms that granular base and granular sub-base thickness variations, within allowed tolerances, have a minor effect on pavement performance. Therefore, the analysis on such layers for Structure 2 is disregarded.*

*Figure 3 shows the effect of allowed layers thicknesses variations, in relation to the failures under study. It is observed that failures take place for all studied damages. The amount of structures failing due to IRI is reduced in comparison to structures failing due to the other damages.*

*The 49% of total structures failed due to rutting, but several structures failed at values quite close to failure limit, so a small thickness increase would place such structures below the failure limit. Other structures have rutting values higher than 20 mm; therefore, the analysis is focused on such structures, with the purpose of eliminating the uncertainty on structures being close to the limit. Such structures represent an 18% of the total, and they mainly show a thickness decrease of cement-treated base layer. This group shows a clear trend to increase rutting, as long as the asphalt layer thickness decreases (Figure 3). The same trend is observed for IRI and bottom-up cracking.*

*Figure 3 does not show a correlation of thickness variation on cement-treated base layer compared to pavement damages. However, among failing structures having more than 20 cm rutting, the 78% shows a cement-treated base layer lower than original design. In some cases failure takes place even in structures having a asphalt layer thickness slightly higher than the original design. Therefore, there is a considerable effect of this layer thickness reduction on the structure performance.*



**Figura 3.** Efecto variaciones de espesor en estructura 2

**Figure 3.** Effect of thickness variation on Structure 2

## 4. Conclusiones

Los resultados del estudio muestran que la variación de los espesores en la carpeta asfáltica de un pavimento, tiene incidencia significativa en el desempeño del pavimento, aun estando estas variaciones dentro de las tolerancias permitidas por las especificaciones de construcción colombianas. Por otro lado, las variaciones de espesor de las capas granulares de base y subbase dentro de las tolerancias permitidas, no tiene una incidencia significativa en el desempeño del pavimento.

## 4. Conclusions

The results from this study show that asphalt layer thickness variations significantly affects the pavement performance, even when such variations are within the tolerances allowed by Colombian construction specifications. On the other hand, layer thickness variations on granular base and sub-base, within allowed limits, do not significantly affect the pavement performance.

En el análisis realizado para la estructura 1, el deterioro determinante para la falla prematura del pavimento fue el ahuellamiento, se identificó que a medida que disminuye el espesor de la carpeta asfáltica el ahuellamiento incrementa, incluso cuando las variaciones de espesor de carpeta asfáltica permanecen dentro de las tolerancias permitidas. Aunque los parámetros IRI y piel de cocodrilo no alcanzaron el límite de falla en ningún caso, para estos deterioros se observó la misma tendencia que para el ahuellamiento. El análisis de esta estructura no reveló correlación entre los deterioros estudiados y la variación de los espesores de las capas granulares de base y subbase dentro de las tolerancias permitidas. También se encontró que dentro de las estructuras que fallaron, se encontraban estructuras espesores mayores de base y subbase granular al espesor del diseño original. Lo anterior indica la poca incidencia en el desempeño del pavimento, de las variaciones de espesor de las capas granulares dentro de las tolerancias permitidas.

El análisis de la estructura 2 confirma que las variaciones de espesor de la base y subbase granular dentro de las tolerancias permitidas, tiene poca incidencia en el desempeño del pavimento. Para esta estructura se presentaron fallas por ahuellamiento, IRI y fisuras piel de cocodrilo, para todos estos deterioros se presenta una alta correlación con las variaciones del espesor de la carpeta asfáltica, a medida que la carpeta disminuye aumenta el deterioro, aun manteniendo las variaciones de espesor dentro de las tolerancias permitidas por las especificaciones colombianas. Aunque no se encontró una correlación directa entre la variación del espesor de la base estabilizada con cemento dentro de las tolerancias y los deterioros estudiados, si se observó que dentro de las estructuras que fallaron el 78% presentaban espesores de base estabilizada menor al del diseño original, varias fallaban incluso con espesores de carpeta superiores al del diseño original. Esto evidenció una influencia de la variación los espesores de la base estabilizada con cemento en el desempeño del pavimento, aun estando estas variaciones dentro de las tolerancias permitidas.

Aunque los resultados de esta investigación preliminar justifican la realización de un estudio a mayor escala, que involucre mayores escenarios y condiciones a nivel nacional, con las respectivas calibraciones locales de los modelos de desempeño de MEPDG, los resultados del estudio muestran que sería recomendable eliminar las tolerancias que permiten que las capas asfálticas y las capas estabilizadas con cemento de pavimentos flexibles, se construyan con espesores menores a los indicados en el diseño.

*The analysis developed for Structure 1, concluded that the determining damage for an early failure on the pavement structure is rutting. It was determined that as long as the asphaltic layer thickness decreases, rutting increases; even when the asphalt layer thickness variations remain within allowed tolerances. Although IRI and bottom-up cracking parameters did not reach failure limit at all, such damages showed the same trend towards rutting. The analysis of this structure did not reveal a correlation between studied damages and the thicknesses variations on granular base and granular sub-base layers, within allowed tolerances. It was also concluded that among failing structures, there were granular base and granular sub-base layers with thicknesses higher than the original design. Consequently, there is a minor influence of granular layers thicknesses variations - within allowed tolerances - on the pavement performance.*

*The analysis on Structure 2 confirms that thicknesses variations on granular base and sub-base layers, within allowed tolerances, have a minor influence on the pavement performance. For this structure failures took place due to rutting, IRI and bottom-up cracking. All such damages show a high correlation with asphalt layer thicknesses variations: as long as the asphalt layer thickness is decreased, damage is increased, even maintaining thickness variations within tolerances allowed by Colombian specifications. Although a direct correlation between the thickness variation of a cement-treated base layer and the studied damages was not found, it was actually observed that among failing structures, the 78% had cement-treated layer thicknesses lower than the original design; several of them failed even having asphalt layer thicknesses higher than the original design. Consequently, it was proven that the thickness variation of a cement-treated base layer does affect the pavement performance, even within allowed tolerances.*

*Although the results of this preliminary research justify the development of further studies at full scale (including several scenarios and local conditions, by considering the respective local calibration of MEPDG performance models), the results from the current research demonstrate it is advisable to eliminate tolerances, which allow asphalt layers and cement-treated base layers of flexible pavements to be constructed using thicknesses lower than the ones specified in the original design.*

## 5. Referencias/References

- ARA, Inc., ERES Consultants Division (2004)**, Guide for Mechanistic–Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final report, NCHRP Project 1-37A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Baron N. (1999)**, Técnicas estadísticas avanzadas en el análisis de Grandes Modelos Computacionales. Congreso latinoamericano de métodos computacionales para Ingeniería. Argentina.
- Bustos M., Cordo O., Girardi P. y Pereyra M. (2011)**, Calibration of Distress Models from the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Rigid Pavement Design in Argentina, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 2226, 3-12, Washington D.C., January.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías (2007)**, Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Bogotá D.C., Colombia.



- Jiang Y. J., Selezneva O., Mladenovic G., Aref S. and Darter M. (2003)**, Estimation of Pavement Layer Thickness Variability for Reliability-Based..Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 1849, Issue 1. 156 – 165.
- Matala A. (2008)**, Sample size requeriment for Monte Carlo - simulation using Latin Hypercube Sampling. Final Report : Helsinki University of Technology.
- Mladenovic G., Jiang Y. J., Selezneva O., Aref S. and Darter M. (2003)**, Comparison of As-Constructed and As-Designed Flexible Pavement Layer Thicknesses. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volume 1853, Issue 1, Pages 165-176, January.
- Santner T. J., B. J. Williams and W. I. Notz (2003)**, The Design and Analysis of Computer Experiments. Springer, New York.
- Xu C., Anzhi Y., Liao M. and Chunan T. (2011)**, Analysis of periodic cracks in surface layer of pavement structures, Engineering Failure Analysis, Volume 18, Issue 1, 411-420, January.
- Xu T., Huang X. (2012)**, Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement, Construction and Building Materials, Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 525-530.