

Tendencias sobre el estudio de materiales granulares en los métodos de diseño de pavimentos

Trends on the materials study granulars in the methods of paviments design

Hugo Alexander Rondon Quintana

Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería énfasis en Infraestructura Vial, Ph.D en Ingeniería.
Docente tiempo completo, Facultad del medio ambiente y R.N. Docente investigador,
Grupo de Investigación GYPMI, Universidad Católica de Colombia
Grupo de Investigación TOPOVIAL

Wilson Ernesto Vargas Vargas

Ingeniero Tecnólogo e ingeniero Topógrafo, especialista en Gerencia Recursos Naturales,
Magíster en Ingeniería-Transporte.
Docente tiempo completo, Facultad del medio ambiente y R.N.
Grupo de Investigación TOPOVIAL

Fecha de recepción: marzo 3 de 2008

Fecha de aceptación: mayo 30 de 2008

RESUMEN

El artículo presenta los tipos de metodologías para el análisis y diseño de estructuras de pavimentos flexibles en el mundo, las tendencias actuales y el avance de herramientas computacionales en la ingeniería de pavimentos. Se discuten los alcances y limitaciones de dichas metodologías y tendencias, haciendo énfasis en el comportamiento de materiales granulares que conforman capas de base y subbase.

PALABRAS CLAVES: metodologías de diseño de pavimentos, métodos empíricos, métodos analíticos, programas de elementos finitos, micromecánica

SUMMARY

The article presents the types of methodologies for the analysis and design of flexible pavement structures in the world, the current trends and the computational tools advance in the pavements engineering. The scopes and such methodology limitations and trends are discussed, making emphasis in the granular materials behavior that certifies base caps and subbase.

KEY WORDS: methodologies of pavement design, empirical methods, analytical methods, finite element programs, micromechanic.

I. METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

1.1 Métodos de diseño empíricos

Las metodologías de diseño de pavimentos flexibles son generalmente de carácter empírico o mecánico-empíricas. En el caso de los métodos empíricos se correlaciona el comportamiento de los pavimentos *in situ*, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación en estas estructuras. Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales (principalmente temperatura y precipitación) a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o terreno de fundación (subrasante) y la calidad de los materiales empleados. Todos estos factores son controlados y medidos durante las fases de estudio para correlacionarlos con los mecanismos de degradación y así poder crear el método de diseño.

Dos son los mecanismos principales de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas (y también en las mecanicistas): fatiga y exceso de deformación permanente. La fatiga ocurre en las capas ligadas, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores altos de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica. Este tipo de deformación es asociado a la respuesta resiliente que presenta la estructura cuando se mueven las cargas vehiculares. La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos y que puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento.

En el caso de las estructuras flexibles, la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento, pero actualmente los métodos empíricos suponen que tal deformación se genera solo en la capa subrasante

y esto crea una de sus principales limitaciones. La anterior suposición se basa en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación debido a su más baja rigidez (en comparación con las otras capas del pavimento) y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua (lo cual disminuiría su capacidad portante). Es decir, las metodologías empíricas no tienen en cuenta que:

- En las capas de rodado y base asfáltica (compuestas por mezclas asfálticas de comportamiento viscoso) un incremento de temperatura genera disminución de la rigidez y por lo tanto un incremento en la deformación del pavimento.
- Las capas granulares juegan un papel importante en la generación de la deformación permanente cuando se dimensionan estructuras flexibles para vías de bajo tráfico. En este tipo de pavimentos las capas asfálticas no tienen una función estructural (por lo general se construyen capas asfálticas delgadas o de baja rigidez) y las capas granulares (base y subbase) soportan casi en su totalidad las cargas rodantes. Con base en lo anterior, las metodologías de diseño de pavimento en Colombia para bajos volúmenes de tránsito deberían tener en cuenta el anterior criterio (a la fecha no lo tiene en cuenta como se expondrá en el capítulo 1.1.1), puesto que:
 - La red de carreteras en Colombia está constituida por aproximadamente 163.000 km, las cuales se distribuyen en 16.640 km de red primaria y 146.500 km de red secundaria y terciaria, es decir, gran parte de las vías del país son de bajo tráfico (Mintransporte, 2006).
 - “En términos generales la red secundaria y terciaria presenta un estado crítico y paulatinamente ha venido deteriorándose por la carencia de mantenimiento debido a los bajos recursos de que disponen los

departamentos y la Nación para inversión en infraestructura vial" (Min-transporte, 2006).

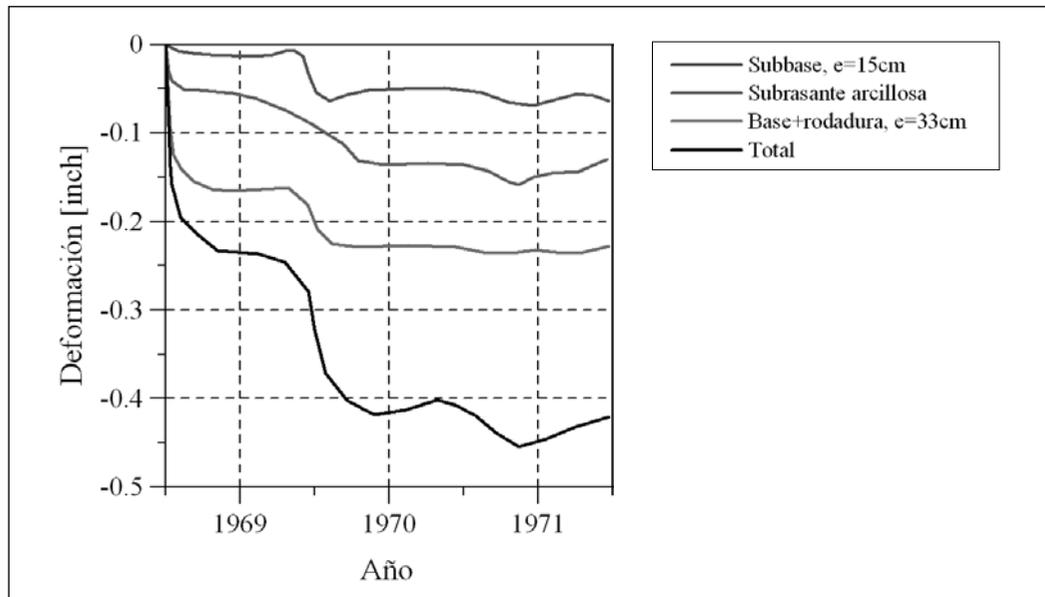
Algunos ejemplos sobre evidencia teórica y experimental que demuestra que las capas granulares de base y subbase contribuyen en la acumulación de la deformación permanente en pavimentos flexibles incluso en estructuras con capas asfálticas gruesas y para vías de altos volúmenes de tránsito puede ser consultada en Lister (1972), Bonaquist (1992), Little (1993), Collop et al. (1995), Brown (1996), Pidwerbesky (1996), Archilla & Madanat (2002), Ingason et al. (2002), Erlingsson (2004), Erlingsson & Ingason (2004).

En la figura 1, se observa uno de los resultados de ensayos reportados por Lister (1972) sobre una pista de prueba en Alconbury Hill (Inglaterra). La pista de prueba era circular (33,6 m de radio y 3,0 m de ancho) y se usaron diferentes ejes de carga con pesos similares a los encontrados en un pavimento. En la figura se puede observar que durante los cuatro años que duró el ensayo, la deformación

permanente se acumuló en cada una de las capas del pavimento ensayado (formada por una capa asfáltica de 10 cm, 23 cm de base, 15 cm de subbase y subrasante arcillosa). La mayor parte de la deformación total se generó en la capa asfáltica y en la base granular e incluso se puede observar una gran contribución en la deformación por parte de la subbase.

Bonaquist (1992) reporta los resultados de un proyecto de investigación cuyos objetivos principales eran evaluar la respuesta de diversas estructuras de pavimento sometidas a diferentes condiciones de carga y presión de llanta, utilizando pistas de prueba aceleradas construidas entre 1986 y 1990 por la FHWA (Federal Highway Administration, USA). En una primera fase los ensayos fueron controlados las 24 horas del día durante los 7 días de la semana y se aplicaban en promedio 5 500 cargas diarias. Se construyeron 2 estructuras: la primera fue construida con 2" de concreto asfáltico, 3" de base asfáltica y 5" de base granular y la segunda estructura se construyó con 2" de concreto asfáltico, 5" de base asfáltica y 12" de base granular. Para la

Figura 1. Desarrollo de deformación permanente en experimentos del Transport Research Laboratory (TRL) en Alconbury Hill, Lister, 1972.



primera estructura se utilizaron cargas de 11 600 lb, 14 100 lb y 16400 lb y para la segunda de 16 400 lb, 19 000 lb y 22 500 lb distribuidas sobre 2 llantas de igual radio. A pesar de que en el estudio se observó que el principal mecanismo de degradación fue el rompimiento de la capa asfáltica por fatiga, la mayor parte de la deformación permanente en las distintas estructuras se generó en las capas granulares de base. Incluso en algunas estructuras no se observó deformación en la subrasante y en la capa asfáltica el desplazamiento fue muy pequeño (menor a 0,38"). En una segunda fase, se evaluó el daño potencial que pueden experimentar estructuras flexibles cuando se emplean configuraciones de llantas distintas y las conclusiones fueron similares a las de la primera fase.

En 1991 el OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) realizó ensayos a escala real sobre una pista de 19 m de longitud cuya estructura estaba compuesta por 13,9 cm de capa asfáltica y 28 cm de base granular soportados sobre una subrasante arcillosa. El esfuerzo aplicado al

pavimento fue de 710 kPa y la velocidad de carga en el ensayo fue de 20 m/s (72 km/h). Los resultados demostraron que la contribución de la subrasante en la deformación total fue pequeña en comparación con la deformación que experimentó la capa asfáltica y la base granular (Collop et al., 1995).

En el año 2000, 2 estructuras de pavimento flexible típicas de Islandia (denominadas IS 02 e IS 03 como se presentan en la figura 2) fueron ensayadas en un "Simulador de Vehículo Pesado" (HVS por sus siglas en inglés). Las 2 estructuras fueron diseñadas de acuerdo al método empírico noruego. El material de base y subbase consistió en quarry Holabrú (material granular de Islandia) y la subrasante fue una arena estándar de Finlandia. En la Figura 3 se presentan los resultados del estudio y se observa que la capa que experimentó mayor deformación fue la base (Ingason et al., 2002; Erlingsson & Ingason, 2004).

De manera similar a los ejemplos antes expuestos, Little (1993) y Pidwerbesky (1996), basados en ensayos a escala real sobre pavimentos flexibles concluyen que entre el 30%

Figura 2. Estructuras de pavimento ensayadas en un HVS. Erlingsson & Ingason, 2004.

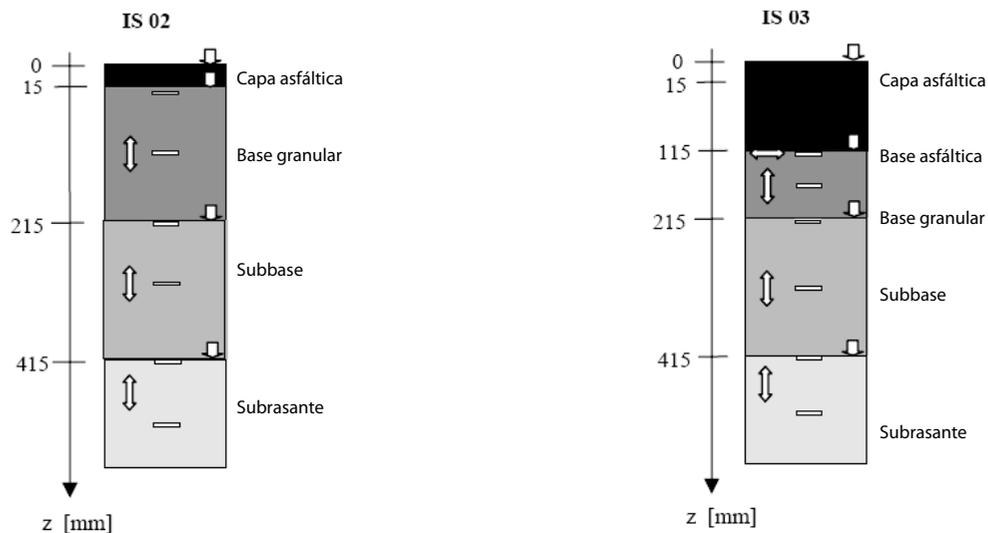
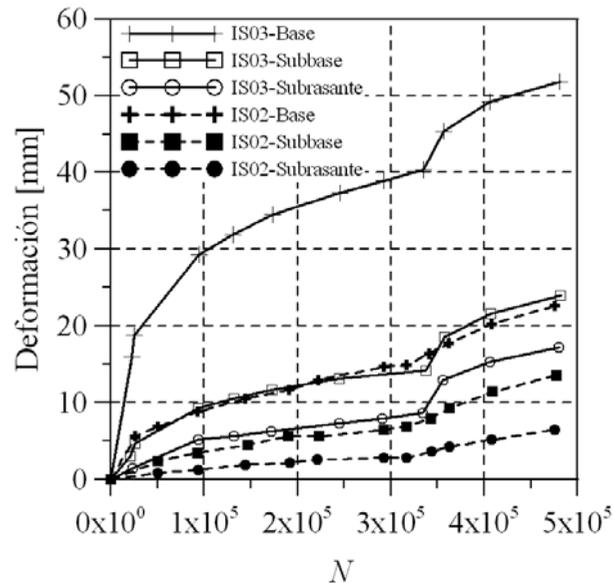


Figura 3. Resultados de deformación de las estructuras ensayadas en un HVS. Ingason et al., 2002.



y el 70% del desplazamiento superficial se generó en las capas granulares. Similar conclusión (entre el 65% - 80%) es reportada por Potts et al. (1980) basados en resultados obtenidos sobre pistas construidas y monitoreadas en la Florida (USA).

Además de no tener en cuenta que parte de la acumulación de la deformación permanente puede ser producida en las capas granulares de base y subbase, otros aspectos a tener en cuenta en este tipo de metodología son:

- No permite ser adaptada a condiciones distintas a las que fueron estudiadas para su desarrollo e implementación. Incluso un cambio en las condiciones climáticas o de tránsito de la zona de estudio puede hacer que el método pierda confiabilidad en la predicción del dimensionamiento del pavimento. Lo grave de esta situación es que en el mundo la tendencia del parque automotor es incrementar en número y magnitud de cargas, y en muchas ocasiones los pesos máximos

permitidos para circular por carreteras son excedidos. Literatura sobre este tema y los efectos que este fenómeno causa sobre el comportamiento estructural y funcional de pavimentos puede ser consultada en Roberts & Rosson (1985), Middleton et al. (1986), Kandhal & Cross (1992), Hudson & Seed (1988), Kim & Bell (1988), Garnica et al. (2002).

- Si se requiere la utilización de materiales o estructuras distintas a aquellas empleadas durante el estudio *in situ*, extrapolar el comportamiento de los mismos a las condiciones estudiadas es costoso y de difícil determinación numérica y experimental.
- Métodos de diseño de este tipo necesitan de gran inversión y tiempo para la realización de ensayos a gran escala.

Lo anterior está generando que en el mundo se estén reemplazando los métodos de diseño empíricos por métodos de diseño basados en aproximaciones analíticas o mecanicistas.

1.1.1 Caso colombiano

En Colombia el método de diseño de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2002a) es empírico. Como ya se mencionó, cambios en el tiempo de las condiciones de tránsito o del clima de la zona de estudio pueden hacer que métodos de este tipo pierdan confiabilidad en la predicción del dimensionamiento de pavimentos. Lo grave de esta situación es que en Colombia las condiciones de tránsito y clima son cambiantes:

- El transporte por carretera es el sistema más utilizado de desplazamiento de carga y de pasajeros (a pesar de que en los últimos años ha venido aumentando el uso del transporte aéreo). La tendencia del parque automotor por este medio de transporte en los últimos 30 años ha sido incrementar en número y magnitud de cargas. En general, el incremento promedio anual del tránsito es del 4,6% y la capacidad instalada del parque automotor de carga ha venido creciendo con una tasa anual promedio del 5,08% (IDEAM, 2001; Mintransporte, 2000; Mintransporte, 2004).
- Respecto al clima, fenómenos ambientales como "El Niño" o "La Niña", hacen que la temperatura presente variabilidad interanual de 2°C en algunas zonas del territorio nacional y que la precipitación aumente provocando períodos de lluvia de hasta dos meses más de lo normal por año (IDEAM, 2001).

El problema anterior se agrava cuando por las carreteras colombianas los pesos máximos permitidos de carga en muchas ocasiones son excedidos, como se observa en las Tablas 1 y 2.

Por otro lado, la forma para caracterizar materiales granulares y cuantificar la calidad de los mismos es por medio de los siguientes ensayos (INVIAS, 2002b): Análisis granulométrico (INV E-123, 124), Proctor (INV E-141, 142),

Californian Bearing Ratio - *CBR* (INV E-148), Desgaste en la máquina de Los Ángeles (INV E-218, 219), Índices de alargamiento y aplanamiento (E-230), Partículas fracturadas (INV E-227), Pérdida en solidez (INV E-220), Equivalente de arena (INV E-133) e Índice plástico (INV E-125, 126). Estos ensayos solo pueden realizar medidas indirectas de la "calidad" del agregado pétreo y en algunos casos de la resistencia al corte (p. e. *CBR*), pero no pueden predecir la rigidez y la resistencia a la deformación permanente que tienen los materiales granulares bajo una carga rodante (Lentz & Baladi, 1980; Brown & Selig, 1991; Brown, 1996). El método supone entonces que cumpliendo ciertos requisitos de "calidad" en los ensayos de caracterización de materiales granulares, las capas granulares no experimentarán deformaciones permanentes importantes. Sin embargo, algunos estudios encontrados en la literatura de referencia hacen dudar del anterior criterio:

- Gidel et al. (2002) realizaron ensayos triaxiales cíclicos sobre dos materiales granulares que presentaban desgastes elevados y no reunían ciertos parámetros empíricos de calidad exigidos por las especificaciones francesas para carreteras. Los valores de rigidez (variaron entre 800 MPa y 1300 MPa) y de resistencia a la deformación permanente de estos materiales fueron altos, lo cual indica que el criterio empírico basado en Los Ángeles y en otros ensayos de caracterización no son suficientes para evaluar el funcionamiento mecánico de agregados pétreos.
- Núñez et al. (2004), basados en ensayos monotónicos de resistencia al corte, observaron que aunque los parámetros de resistencia al corte (cohesión y fricción) de diversos materiales mal gradados eran similares, su resistencia a la deformación permanente fue bastante diferente. Incluso observaron que a pesar de que uno de los materiales no gradados era superior en *CBR* y parámetros de resistencia al

- corte a los demás, desarrolló mayores valores de deformación permanente.
- Investigadores como Balay et al. (1997) mencionan que diversos estudios han confirmado que no existe una relación entre el comportamiento mecánico de

materiales granulares (rigidez y resistencia a la deformación permanente) y la resistencia del agregado (p. e., desgaste en la máquina de Los Ángeles y CBR).

Tabla 1. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C2 en 5 vías colombianas (Mintransporte et al., 2003).

Camión C2	Bogotá -Girardot	Ibagué - Cali	Buga -Buenaventura	Medellín - La Pintada	Santamaría - Bosconia
Muestra eje sencillo, llanta sencilla	3380	1035	2014	2615	999
Mayores al permitido (6 ton)	8	4	3	25	5
% de excedidos	0,2	0,4	0,2	1,0	0,5
Muestra eje sencillo, llanta doble	3380	1035	2014	2615	999
Mayores al permitido (11 ton)	1025	368	651	747	542
% de excedidos	30,3	35,6	32,3	28,6	54,3

Tabla 2. Peso máximo permitido, porcentaje de excedidos y peso máximo registrado de camiones tipo C3 en 5 vías colombianas (Mintransporte et al., 2003).

Camión C3	Bogotá Girardot	Ibagué Cali	Buga Buenaventura	Medellín La Pintada	Santamarta Bosconia
Muestra eje sencillo, llanta sencilla	934	586	795	678	355
Mayores al permitido (6 ton)	123	116	132	-	82
% de excedidos	13,2	19,8	16,6	-	23,1
Muestra eje tándem, llanta doble	934	586	795	678	355
Mayores al permitido (22 ton)	138	246	88	142	104
% de excedidos	14,8	42,0	11,1	20,9	29,3

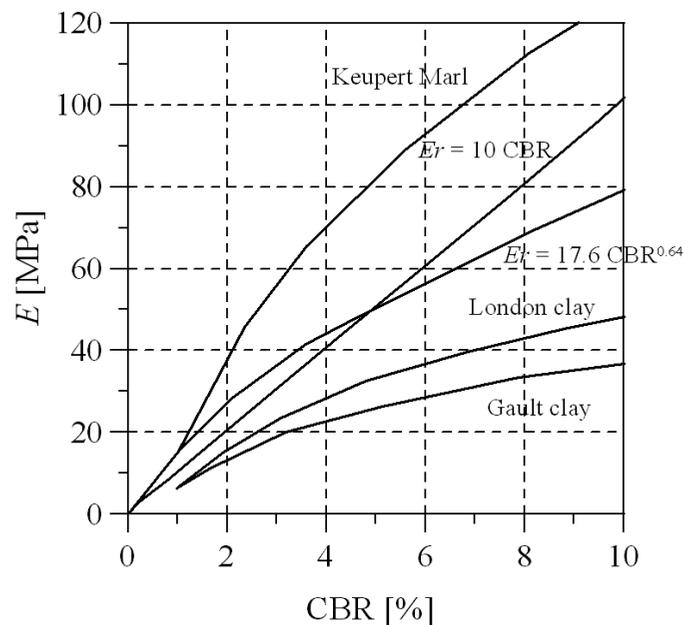
En el método de diseño del INVIAS (2002a), y en general como ya se mencionó para los métodos empíricos de diseño, una de las principales limitaciones es que suponen que la deformación permanente ocurre solo en la subrasante. En el método INVIAS (2002a), la subrasante se caracteriza por medio del módulo resiliente (usado en metodologías mecanicistas como se verá más adelante). Como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable en la subrasante (ya sea por falta de equipos o definición acertada de trayectorias de esfuerzo), lo que se hace es correlacionarla con el valor del *CBR* a través de la siguiente ecuación empírica de Heukelom & Klomp (1962):

$$E_r = 10CBR \text{ (kg/cm}^2\text{), para CBR < 10\% \quad (1)$$

Cuando se utiliza la anterior ecuación surgen múltiples incertidumbres. Una de ellas es que el ensayo de *CBR* es una medida

empírica indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material en condiciones no drenadas que se mide bajo una carga monotónica, y en un pavimento, la carga es cíclica. Además, los niveles de esfuerzo en un pavimento son muchos más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se realiza el ensayo de *CBR*. Por otro lado, ecuaciones similares a la (1) pueden ser encontradas en la literatura (Brown & Selig, 1991; Garnica et al., 2001) como se puede observar en la figura 4. Por tanto, para el caso colombiano, donde existe variedad de composición y tipos de suelos, escoger arbitrariamente una ecuación empírica puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas. Otras correlaciones del módulo resiliente de subrasantes con otros factores tales como la resistencia, la compresión confinada, clasificación del suelo, densidad y *CBR* pueden ser consultados en Woojin Lee et al. (1997) y Garnica et al. (2001).

Figura 4. Relación entre el *CBR* y el módulo resiliente (E_r).



Pasando al caso de los materiales granulares que conforman bases y subbases, el módulo resiliente también puede ser obtenido por medio de múltiples ecuaciones empíricas (p. e., ecuaciones 2, 3 y 4) las cuales al emplearlas generan similares incertidumbres a las presentadas para el caso de la subrasante. Incluso en múltiples investigaciones reportadas en la literatura (p. e., Rada & Witczak, 1981, Sweere, 1990, Zaman et al., 1994), no se encontraron correlaciones entre el *CBR* y el *Mr*, e investigadores como McDowell & Hau (2004) aseguran que la rigidez de un material no es una simple función del *CBR*.

$$E_{subb} = E_{subr} [5,35 \log h + 0,62 \log E_{subr} - 1,56 \log E_{subr} \log h - 1,13] \quad (2)$$

$$E_{base} = E_i [8,05 \log h + 0,84 \log E_i - 2,11 \log E_i \log h - 2,21] \quad (3)$$

$$E_{base} = 0,206h^{0,45} E_i \quad \text{Ecuación válida para} \quad (4)$$

$$2 < \frac{E_{base}}{E_i} < 4$$

La ecuación (4) puede ser utilizada de igual forma para el cálculo del módulo de la subbase. E_{base} , E_{subb} , E_{subr} y E_i son los módulos de base, subbase, subrasante y de la capa subyacente, respectivamente, medidos en kg/cm² y h es el espesor de la capa granular donde se quiere medir el módulo medido en cm para el caso de las ecuaciones (2) y (3), y en mm para la ecuación (4).

1.2 Métodos de diseño analíticos, mecanicistas o racionales

A diferencia de los métodos empíricos, los analíticos tienen en cuenta cómo el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento influyen en el comportamiento del mismo. Para el cálculo de esfuerzos y

deformaciones, emplean programas de computador disponibles desde la década de 1960 (Gomes, 2000). En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y la relación de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación. Una vez calculados estos estados, se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error (aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento.

Algunos de los programas son: ALIZE (LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ELSYM5 (Chevron Oil), BISAR (SHELL), KENLAYER (University of Kentucky) y DEPAV (Universidad del Cauca). Los valores admisibles de deformación a tracción y vertical en la base de la capa asfáltica y en la superficie de la subrasante, respectivamente, se obtienen por medio de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigación como TRL (Transportation Research Laboratory), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y TAI (The Asphalt Institute). Mayor información sobre métodos analíticos puede ser consultada en el manual de diseño de pavimentos del IDU & la Universidad de Los Andes (2002) y en Reyes (2003).

A pesar de ser una metodología diferente a las empíricas, presenta connotaciones similares. Por ejemplo, el criterio de diseño en los métodos analíticos es el mismo: el pavimento falla por acumulación de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica debido a ciclos de carga (fatiga) y por exceso de deformación vertical en la superficie de la capa de subrasante (es decir, no tienen en cuenta el efecto que puede tener la acumulación de la deformación en las capas de base y sub-base granulares no tratadas).

Pero la principal desventaja de esta metodología radica en que el cálculo de los

estados de esfuerzo y deformación se realiza por lo general suponiendo que el pavimento flexible es un sistema *multicapa elástico lineal* (compuesto por tres capas: la subrasante, la capa granular no tratada y la capa asfáltica, figura 5). Este comportamiento elástico se supone de manera simplista, justificando que bajo algún ciclo individual de carga la deformación permanente es muy baja comparada con la deformación resiliente. Los parámetros elásticos pueden ser calculados por medio de ensayos de laboratorio o por medio de retrocálculos de ensayos *in situ* (empleando por ejemplo Falling Weight Deflectometers – FWD). Por un lado las ecuaciones elásticas lineales no tienen en cuenta que el comportamiento de las mezclas asfálticas es viscoso (dependiente de la velocidad de aplicación de carga y de la temperatura) y en el caso de los materiales granulares no tratados de base y sub-base su comportamiento es inelástico (deformaciones resilientes y permanentes) no lineal (rigidez dependiente del nivel de esfuerzo aplicado) para los niveles de esfuerzos a los cuales se encuentran sometidos en un pavimento flexible (Morgan, 1966; Barksdale, 1972; Sweere, 1990; Wolf & Visser, 1994; Werkmeister et al., 2001; Werkmeister et al., 2004; García-Rojo et al., 2005). Además,

dependiendo del tipo de material de subrasante, el comportamiento del suelo puede ser dependiente de la velocidad de carga (viscoso) como en el caso de muchas arcillas.

Otras desventajas de las metodologías analíticas son:

- Suponen que los materiales que componen cada una de las capas del pavimento son isotrópicos y homogéneos.
- Los programas analíticos no tienen en cuenta las diferentes geometrías que pueden presentar las estructuras de pavimento (p. e., suponen extensión infinita de las capas en sentido horizontal) y la carga es estática.
- En la mayoría de los casos los programas de computador no tienen en cuenta el efecto del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales utilizados.
- Cuando se emplean ecuaciones elásticas se generan valores no reales de esfuerzos de tensión en las capas granulares (estáticamente no posibles) (figura 6). Lo anterior, especialmente en pavimentos con capas asfálticas delgadas (Khedr, 1985; Elliott & David, 1989; Brown, 1996; Balay et al., 1997; Gomes, 2000).

Figura 5. Sistema multicapa elástico para el análisis de pavimentos.

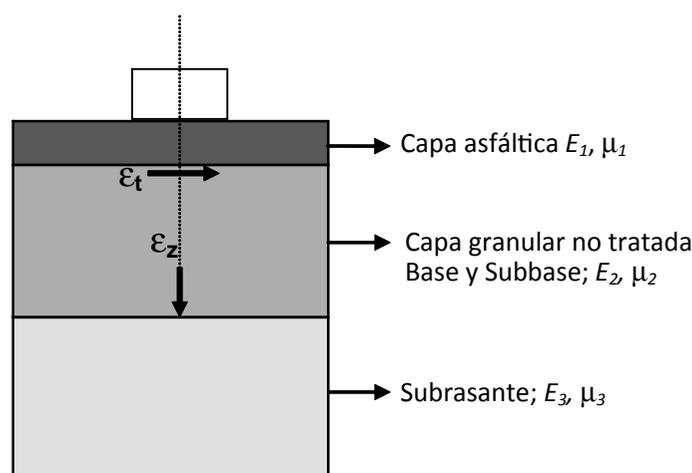
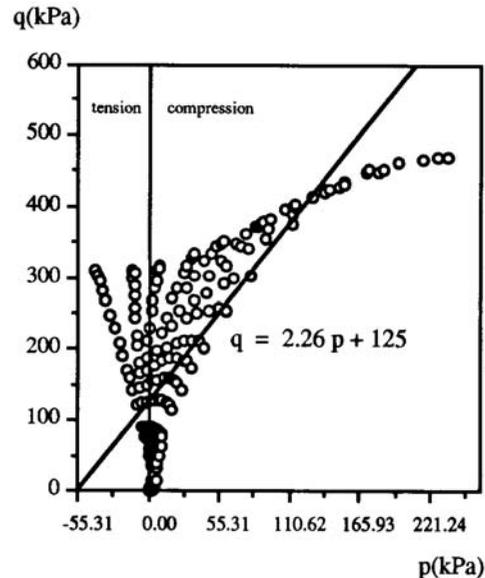


Figura 6. Campo de esfuerzos (p, q) en la capa de base de un pavimento flexible con espesor de capa asfáltica de 6 cm (Balay et al., 1997).



Algunos métodos de diseño empíricos y analíticos son: AASHTO, 1986; AASHTO, 1993; AI, 1982; AUSTRROADS, 1992; HMSO, 1994; IDU, 2002; INVIAS, 2002; SHELL, 1978; TRL, 1993.

2. NUEVOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE PAVIMENTOS

1.1 Programas de elementos finitos

Actualmente se ha venido desarrollando una nueva metodología para el estudio y análisis de pavimentos, la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones. Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones que suponen que el material es un continuo (no se tiene en cuenta el comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macromecánico).

Para el caso de los pavimentos, algunas de las ventajas del empleo de programas

de elementos finitos radica en que pueden llegar a tener en cuenta que los materiales granulares no tratados que conforman pavimentos exhiben un comportamiento no lineal, dependiente de la condición de esfuerzos, y comportamiento viscoso en las capas asfálticas y en la subrasante. Son capaces de modelar diferentes geometrías, condiciones de frontera, criterios de falla y carga cíclica.

Algunos modelos de comportamiento empleados en programas de elementos finitos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en materiales granulares no tratados son: el modelo de acumulación de Bochum (Wichtmann, 2005), Elastoplásticos (Hicher et al., 1999; Chazallon, 2000; Hau et al., 2005), Hypo – Quasi – Elastic (Tatsuoka, 1999), Hyper – Elastic (Hoff & Normal, 1999; Taciroglu & Hjelmstad, 2002), Elásticos lineales y no lineales (p.e., Brown & Pell, 1967; Hicks & Monismith, 1972; Boyce's, 1980; Hornych et al., 1998). Para el caso de las capas asfálticas por lo general los modelos empleados son los elásticos lineales y los viscoelásticos. Mayor información sobre ecuaciones constitutivas y

empíricas para intentar predecir el comportamiento de materiales granulares puede ser consultada en Lekarp et al. (2000a), Lekarp et al. (2000b) y Rondón & Lizcano (2006).

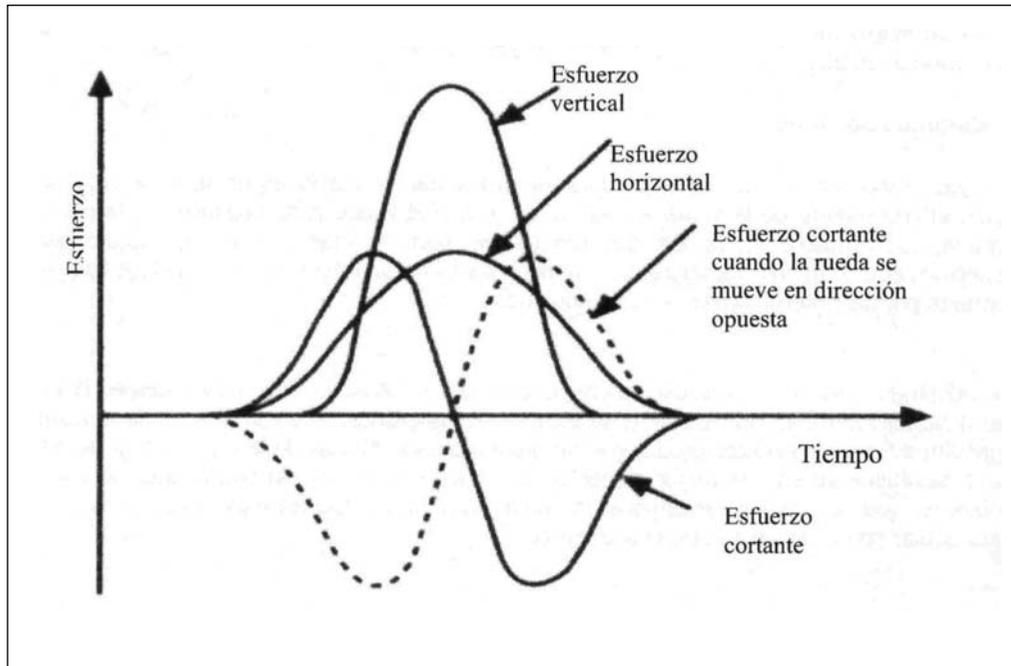
En el mercado existen diversos programas de elementos finitos como el Abaqus, Plaxys y Ansys, pero algunos que se especializan en pavimentos son el SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes), y códigos como el DIANA (Delft University of Technology) y el CESAR (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Mayor información sobre estos programas se puede consultar en Flexible pavements (1996), Vos et al. (1996), Brown (1996), Jouve & Guezouli (1996) y Gomes (2000).

Los programas multicapa elásticos han sido preferidos respecto a los de elementos finitos debido a su simplicidad en el manejo y en el entendimiento de las ecuaciones con las que se obtienen los estados de esfuerzo y deformación. Además, requieren menos tiempo computacional y memoria. Pero en general, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras.

A pesar de los avances en el área del desarrollo de programas y ecuaciones constitutivas, la deformación que experimentan los materiales granulares es difícil de predecir, principalmente por las siguientes razones:

- El comportamiento de estos materiales bajo carga cíclica es complejo y aún no ha sido totalmente entendido (Brown, 1996; Lekarp et al., 1996; Collins & Boulbani, 2000; Lekarp et al., 2000b; Werkmeister et al., 2002; Werkmeister, 2003). Uzan (1999) menciona que bajo carga
- cíclica la respuesta de estos materiales es fuertemente no lineal. Además, bajo esfuerzos de corte ellos exhiben dilatación y deformación tanto resiliente como permanente.
- La estructura del pavimento está compuesta por diferentes materiales que experimentan diferentes comportamientos bajo carga cíclica y condiciones del medio ambiente.
- Las capas asfálticas presentan un comportamiento viscoso con componentes elásticas y plásticas.
- La temperatura y humedad de las capas granulares varía en el tiempo y, por tanto, su comportamiento con cada repetición de carga.
- El tipo y magnitud de la carga cíclica varía constantemente y no es conocida con exactitud previa a los ensayos de laboratorio y las simulaciones computacionales. Además, las trayectorias de esfuerzos en el laboratorio son limitadas y no reproducen las reales en el pavimento (figura 7).
- A pesar de que los materiales granulares presentan anisotropía inherente (por la geometría de las partículas, efectos de la compactación y la gravedad), muy pocas ecuaciones constitutivas tienen en cuenta esta consideración, pues es de difícil obtención numérica y experimental.
- El tamaño máximo del agregado por lo general se encuentra entre 2 cm y 5 cm, requiriendo grandes especímenes de al menos 15,2 cm de diámetro.
- El comportamiento de la muestra en el laboratorio es diferente al de campo.
- En el laboratorio, por lo general, el efecto de la compactación y la historia de carga durante la construcción del pavimento no se tienen en cuenta.

Figura 7. Variación de esfuerzos respecto al tiempo cuando se aplica una carga vehicular. Brown, 1996 (extraída de Garnica & Gomes, 2001).



1.2 Programas de Elementos Discretos (DEM)

Otra metodología de análisis reciente es emplear modelos numéricos computacionales llamados Elementos Discretos (DEM por sus siglas en inglés), los cuales utilizan este tipo de elementos para el cálculo de fuerzas y desplazamientos entre las partículas de un esqueleto granular. El fin de esta metodología es intentar describir fenómenos físicos del comportamiento de los materiales a nivel micromecánico para poder entender el comportamiento a nivel macro. Algunos parámetros a nivel micro son la fricción, cohesión, geometría, densidad y rigidez de partículas (normal y tangencial). Tal vez los primeros reportes sobre validación del uso de esta herramienta para simular el comportamiento de materiales granulares son los de Cundall (1978) y Cundall & Strack (1979).

Son muy pocos los estudios que se han realizado a nivel micromecánico en el área del comportamiento de materiales granulares utilizados en pavimentos, en comparación con los estudios a nivel macro. Algunos de ellos se describen a continuación:

- García-Rojo & Hermann (2004), basados en estudios de simulación en DEM, mencionan: "Entre más irregularidades tenga la partícula los algoritmos se vuelven más complicados y menos eficientes... En muchas de las aproximaciones de deformación simuladas en programas de elementos discretos no se tiene en cuenta efectos como el desgaste y rompimiento de partículas ya que suponen que la contribución de estos fenómenos en el desarrollo de deformación permanente es muy baja cuando se emplean esfuerzos moderados... Existe un gran número

de modelos capaces de predecir la dependencia del módulo resiliente y la relación de Poisson con el esfuerzo, pero existen muy pocos en los cuales se tenga en cuenta como la fricción y la rigidez entre contactos afectan dichos parámetros así como el desgaste y rompimiento”.

- García-Rojo et al. (2005) mencionan que la rigidez y la fricción entre contactos juegan un importante papel en la respuesta total del sistema. En simulaciones realizadas en DEM sobre materiales granulares no encontraron comportamiento puramente elástico cuando son sometidos a carga cíclica. Incluso a muy bajos niveles de esfuerzo los materiales granulares bajo ciclos de carga experimentan un estado en el cual desarrollan una muy pequeña tasa constante de deformación (que ellos denominan como ratcheting).
- García-Rojo et al. (2004) y Alonso-Marroquín & Hermann (2004) demuestran que las simulaciones en DEM pueden predecir la rigidez que experimentan los materiales granulares en ciclos de carga y descarga por medio de la dinámica de contactos. En ciclos de carga ellos observaron que el número de contactos deslizados con relación al número total de contactos es mayor que en descarga (por tanto, mayor rigidez en carga que en descarga).
- Kim et al. (2005), basados en estudios a nivel micromecánico sobre 6 materiales granulares con 3 gradaciones y 3 contenidos de agua distintos, concluyen que en el rango de anisotropía inherente (donde no son inducidos esfuerzos), la relación entre la rigidez vertical y horizontal (E_x/E_y) está en el rango de 0,4 – 1,0. Además concluyen:
 - El tipo de agregado, orientación y forma de las partículas tienen un sustancial efecto sobre el comportamiento de materiales granulares y sobre el nivel de anisotropía.
 - Agregados con partículas alongadas son más anisotrópicos.

- El nivel de anisotropía decrece cuando el material es más angular y con alta textura.

- En simulaciones de ensayos cíclicos con presión de confinamiento constante realizadas en DEM para determinar la influencia que tienen algunos factores como el nivel de esfuerzo y la densidad en el valor del módulo resiliente, se puede observar que aunque las tendencias de las simulaciones son buenas, aun son necesarios grandes esfuerzos en el desarrollo de programas que simulen mejor la geometría, forma y contenido de finos de las partículas y las condiciones ambientales (Khogali & Zeghal, 2000; Zeghal, 2000; Festag, 2002; Khogali & Zeghal, 2003; Lowery & Zeghal, 2003; Zeghal, 2003; Katzenbach & Festag, 2004; Zeghal, 2004).

Esta herramienta de investigación tiene como principales desventajas:

- Requiere de altos requerimiento de velocidad y almacenamiento de información.
- Para el caso de un pavimento donde los ciclos de carga son elevados (en algunos casos superiores a 3×10^7), simulaciones a nivel micromecánico no son posibles con la tecnología actual.
- Al igual que en los programas de elementos finitos, la concepción teórica de las ecuaciones que se utilizan en estos programas necesitan realizar suposiciones que simplifican la realidad.
- Solo son tenidos en cuenta como mecanismos de desplazamiento la rotación y el deslizamiento entre partículas.
- A nivel micromecánico la confrontación de los resultados numéricos de las simulaciones con la evidencia experimental es mucho más difícil que para el caso macromecánico.
- Para las simulaciones, conocer a priori las diferentes formas y tamaños de las partículas en un material granular es

complejo, y el grado de complejidad aumenta cuando se debe tener en cuenta que de acuerdo a la forma como es compactado puede adquirir estructuras totalmente diferentes. Además, como los esfuerzos internos en las muestras granulares no pueden ser medidos, deben ser estimados de las condiciones de borde.

- Condiciones ambientales y contenido de finos no son tenidos en cuenta en las simulaciones.

Mayor información de estudios a nivel micromecánico sobre materiales granulares y simulaciones en el área de los pavimentos pueden ser consultados en Khogali & Zeghal (2000); Zeghal (2000); Ullidtz (2002); Khogali & Zeghal (2003); Alonso-Marroquín & Hermann (2004); Alonso-Marroquín et al. (2004); Zeghal (2004); García-Rojo & Hermann, 2004; Saussine et al. (2004); García-Rojo et al. (2005); Kim et al. (2005).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los métodos de diseño deben tener en cuenta que los materiales granulares que conforman capas de base y subbase pueden contribuir en la acumulación de la deformación permanente de estructuras flexibles.

Es importante que en Colombia se realicen estudios experimentales y computacionales a nivel macro y micromecánico para la caracterización y comprensión del comportamiento de materiales granulares.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials, *Guide for Design of Pavement Structures*, Washington, D. C., 1986.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

Guide for Design of Pavement Structures, Washington, D. C., 1993.

AI – Asphalt Institute, *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual MS – 1*, 9th Ed., College Park, Md., 1982.

Alonso-Marroquín, F., García-Rojo, R. & Hermann, H. J., *Micromechanical Investigation of granular ratcheting. Proceedings of the International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum (Germany), 2004.

Alonso-Marroquín, F. & Hermann, H. J., "Ratcheting of Granular Materials", en *The American Physical Society*, vol. 92, núm. 5, 054301, 2004.

Archilla, A. R. & Madanat, S., "Estimation of Rutting Models by Combining Data from Different Sources", en *Journal of Transportation Engineering*, 127 (5), 2002, pp. 379-389.

AUSTROADS, *Pavement Design – A Guide to the Structural Design of Road Pavement*, Sydney (Australia) Austroads, 1992.

Balay, J., Gomes, C., Jouve, P., Hornych, P. & Paute, J.-L., *Mechanical Behaviour of Soils and Unbound Granular Materials, Modelling of Flexible Pavements – Recent Advances. Proceedings 8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle, Vol. 1, 1997, pp. 823-842.

Barksdale, R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Basecourse Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements*, vol. 1, 1972, pp. 161-174.

Bonaquist, R., "Summary of Pavement Performance Test Using the Accelerated Loading Facility, 1986-1990", en *Transportation Research Record, 1354*, Washington, D. C., Transportation Research Board, 1992, pp. 74-85.

Boyce, H. R. A. "Non-linear Model for the Elastic Behaviour of Granular Materials under Repeated Loading", en *Proceedings International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, U.K., vol. 1, 1980, p. 285-294.

- Brown, S. F., "Soil Mechanics in Pavement Engineering", en *The 36th Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Géotechnique 46*, núm. 3, 1996, pp. 383-426.
- Brown, S. F. & Pappin, J. W., "Analysis of Pavements with Granular Bases", en *Transportation Research Record*, 810, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1981, pp. 17-23.
- Brown, S. F. & Pell, P. S., "An Experimental Investigation of the Stresses, Strains and Deflections in a Layered Pavement Structure Subjected to Dynamic Loads" en *Proc., 2nd Int. Conf. Struct. Des. of Asphalt Pavements*, 1967, pp. 487-504.
- Brown, S. F. & Selig, E. T., "The Design of Pavement and Rail Track Foundations", en *Cyclic Loading of Soils*, capítulo 6, 1991, pp. 249-305.
- Chazallon, C., "An Elastoplastic Model with Kinematic Hardening for Unbound Aggregates in Roads", en *Unbound Aggregates in Road Construction – UNBAR 5*, Dawson editor, Balkema, Rotterdam, 2000, pp. 265-270.
- Collins, I. F. & Boulbibane, M., "Geomechanical Analysis of Unbound Pavements Based on Shakedown Theory", en *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, 2000, pp. 50-59.
- Collop, A. C., Cebon, D. & Hardy, M. S. A., "Viscoelastic Approach to Rutting in Flexible Pavements", en *Journal of Transportation Engineering*, 121 (1), 1995, pp. 82-93.
- Colombia, IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, "Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático" [documento de trabajo], 2001.
- Colombia, IDU - Instituto de Desarrollo Urbano & Universidad de Los Andes, "Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá" [documento de trabajo], 2002.
- Colombia, INVIAS - Instituto Nacional de Vías, "Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en vías con Bajos, Medios y Altos volúmenes de Tránsito" [documento de trabajo], 2002a.
- , "Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras" [documento de trabajo], 2002b.
- Colombia, Mintransporte - Ministerio de Transporte, Oficina de Planeación, "Parque Automotor de Transporte de Carga en Colombia" [documento de trabajo], 2000.
- , "El Transporte en Cifras" [documento de trabajo], 2004.
- , "Diagnóstico del Sector Transporte" [documento de trabajo], 2006.
- Colombia, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías – INVIAS & Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles de la Universidad de Los Andes – CIMOC, "Evaluación del Efecto del Incremento en los Pesos Brutos de los Camiones C2 y C3 en la Vida Útil de las Vías de la Red Vial Nacional de Colombia" [documento de trabajo], 2003.
- COST 337, "Unbound Granular Materials for Road Pavements", en *Final Report of the Action. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities*, 2000.
- Cundall, P., BALL, A., "A Program to Model Granular Media Using the Distinct Element Method", en *Technical Note, Advanced Technology Group, Dames & Moore*, London, 1978.
- Cundall, P. A. & Strack, O. D. L., "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", en *Géotechnique*, 29 (1), 1979, pp. 47-65.
- Dawson, A. R., "Introduction to Soils and Granular Materials" en *Lecture Notes from Residential Course, Bituminous Pavements - Materials, Design and Evaluation*, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1990.
- Elliott, R. P. & David, L., "Improved Characterization Model for Granular Bases", en *Transportation Research Record*, 1227, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1989, pp. 128-133.

- Erlingsson, S., "Mechanistic Pavement Design Methods – A Road to Better Understanding of Pavement Performance", en *Via Nordica 2004 – NRA's 19th Road Congress*, C8: Berekraftige vegkonstruksjonar, 2004, p. 8.
- Erlingsson, S. & Ingason, T., Performance of Two Thin Pavement Structures During Accelerated Pavement Testing Using a Heavy Vehicle Simulator. 2nd International Conferences on Accelerated Pavement Testing, University of Minnesota, 2004, p. 19.
- Festag, G., "Experimental Investigations on Sand under Cyclic Loading", en *Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes*, Ed.: Springman, Swets & Zeitlinger, 2002, pp. 269-275.
- "Flexible pavements", en *Proceedings of the European Symposium Euroflex 1993*, Lisbon (Portugal), Ed. Gomes Correia, 1996.
- García-Rojo, R., Alonso-Marroquín, F. & Hermann, H. J., "Characterization of the Material Response in the Granular Ratcheting", en *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, vol. 72 (1), núm. 4, 2005, pp. 041302.1-041302.12.
- García-Rojo, R. & Hermann, H. J., "Shakedown of Unbound Granular Material", en *Institute for Computer Applications 1*, Germany, University of Stuttgart, 2004.
- Garnica, P. A., Gómez, L. J. & Sesma, M. J., "Mecánica de Materiales para Pavimentos", en *Publicación Técnica No. 197*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCI) - Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Sanfandila, México, 2002.
- Garnica, P. A., Pérez, G. N. & Gomes, L. A., "Módulo de Resiliencia en Suelos Finos y Materiales Granulares", en *Publicación Técnica No. 142*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCI) - Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sanfandila, México, 2001.
- Gidel, G., Breyse, D. & Denis, A., "Modeling the Unbound Granular Material Long Term Behavior" en *15th ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, Columbia University, 2002.
- Gidel, G. et al., "A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus" en *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, 2001, pp. 5-21.
- Gomes Correia, A., "Modelling Unbound Granular Materials", en *Recommendations for Pavement Design*, Lisbon, Technical University of Lisbon – IST, 2000.
- Habiballah, T. & Chazallon, C., "An Elastoplastic Model Based on the Shakedown Concept for Flexible Pavements Unbound Granular Materials", en *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 29, 2005, pp. 577-596.
- Habiballah, T., Chazallon, C. & Hornych, P., "Simplified Model Based on the Shakedown Theory for Flexible Pavements", en *Proc., of the 6th International Symposium on Pavements Unbound*, 2004, pp. 191-198.
- Hau, K. W. et al., The Application of a Three-Surface Kinematic Hardening Model to Repeated Loading of Thinly Surfaced Pavements. *Granula Matter*, 7, 2005, pp. 145-156.
- Heukelom, W. & Klomp, A. J. G., "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction", en *Proc., of 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, 1962.
- Hicher, P.-Y & Chang, C. S., "Anisotropic Non-linear Elastic Model for Particulate Materials", en *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, núm. 8, 2006, pp. 1052-1061.
- Hicher, P., Daouadji, A. & Fedghouche, D., "Elastoplastic Modelling of the Cyclic Behaviour of Granular Materials", en Gomes Correia, A. (edit.), *Unbound Granular Materials – Laboratory testing, In-situ testing and modelling*, Rotterdam, Balkema, 1999, pp. 161-168.
- Hicks, R. G., & Monismith, C. L., "Factors Influencing the Resilient Properties of

- Granular Materials" en *Hwy. Res. Rec.*, 345, 1971, pp. 15-31.
- HMSO, Design Manual for Roads and Bridges, vol. 7, HD 25/94, part 2, *Foundations*, 1994.
- Hoff, I. & Nordal, R. S., "Constitutive Model for Unbound Granular Materials Based in Hyperelasticity", en Gomes Correia (edit.), *Unbound Granular Materials – Laboratory Testing, In-situ Testing and Modelling*, Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 187-196.
- Hornych, P., Kazai, A. & Piau, J.-M., "Study of the Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials", en Nordal & Refsdal (eds.), *Proc. BCRA'98, Trondheim*, vol. 3, 1998, pp. 1277-1287.
- Hudson, S. W. & Seeds, S. B., "Evaluation of Increased Pavement Loading and Tire Pressures", en *Transportation Research Record*, 1207, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1988, pp. 197-206.
- Ingason, T., Wiman, L. G. & Haraldsson, H., "HVS – Testing of Iceland Low Volume Road Structures", en *ISAP – 9th International Conference on Design of Asphalt Pavements*, 2002, p. 13.
- Jouve, P. & Guezouli, S., "Evolution and Recommendations for Finite Element Programs", en Gomes Correia (edit.), *Flexible Pavement*, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 165-169.
- Kandhal, P. S. & Cross, S. A., "A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements", en *NCAT Report 93 – 1, National Center of Asphalt Technology*, 1992, p. 46.
- Katzenbach, R. & Festag, G., "Material Behaviour of Dry Sand under Cyclic Loading", en *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Proc. of CBS04*, Bochum, 2004, pp. 153-158.
- Khedr, S., "Deformation Characteristics of Granular Base Course in Flexible Pavements", en *Transportation Research Record*, 1043, Transportation Research Board, Washington, D. C., 1985, pp. 131-138.
- Khogali, W. E. I. & Zeghal, M. "On the Resilient Behaviour of Unbound Aggregates", en *Unbound Aggregates in Road Construction*, Nottingham, England, 2000, pp. 29-34.
- Khogali, W. E. I. & Zeghal, M., "A Comprehensive System for Characterising Granular Materials: Providing Material Input for Pavement Design", en *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 2003, p. 12.
- Kim, O.-K. & Bell, C., "A Measurement and Analysis of Truck Tire Pressures in Oregon", en *Transportation Research Record*, 1207, Transportation Research Board, Washington D. C., 1988, pp. 100-110.
- Kim, Sung-Hee, Little, Dallas N. & Masad, E., "Simple Methods to Estimate Inherent and Stress-Induced Anisotropy of Aggregate Base", en *Transportation Research Record*, 1913, Transportation Research Board, Washington D. C., 2005, pp. 24-31.
- Lashine, A. K., Brown, S. F. & Pell, P. S., *Dynamic Properties of Soils*, Department of Civil Engineering, University of Nottingham (England), 1971.
- Lekarp, F., Ulf, I. & Dawson, A. R., "State of the art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates", en *Journal of Transportation Engineering*, 2000a, 126:1.
- Lekarp, F., Ulf, I. & Dawson, A. R., "State of the art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates", en *Journal of Transportation Engineering*, 2000b, 126:1.
- Lekarp, F., Richardson, I. R. & Dawson, A., "Influences on Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials", en *Transportation Research Record*, 1547, Transportation Research Board, Washington D. C., 1996, pp. 68-75.
- Lentz, R. W. & Baladi, G. Y., "A Simplified Procedure to Characterize Permanent Strain in Sand Subjected to Cyclic Loading", en *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea; Balkema Publishers; Rotterdam, the Netherlands, 1980.
- Lister, N. W., "The Transient and Long Term Performance of Pavements in Relation to Temperature", en *Proc. 3rd. Int. Conf. on*

- Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, University of Michigan, 1972.
- Little, P. H., "The Design of Unsurfaced Roads Using Geosynthetics" [tesis de doctorado], Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1993.
- Lowery, M. & Zeghal, M., "Effect of Particle Stiffnesses on the Resilient Behaviour of Aggregate Materials", en *19th Canadian Congress of Applied Mechanics – CAN-CAM*, 2003, pp. 302-303.
- Middleton, D. R., Roberts, F. L. & Chira-Chavala, T., "Measurement and Analysis of Truck Tire Pressures on Texas Highways", en *Transportation Research Record*, 1070, Transportation Research Board, Washington D. C., 1986, pp. 1-8.
- McDowell, G. R. & Hau, K. W., "The Use of a Kinematic Hardening Model for Estimating Subgrade Stiffness in Layered-elastic Analyses", en *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 5, 2004, pp. 53-59.
- Morgan, J. R., "The Response of Granular Materials to Repeated Loading", en *Proc., 3rd Conf., ARRB*, 1966, pp. 1178-1192.
- Niemunis, A., "Extended Hypoplastic Models for Soils" [tesis de doctorado], Politechnika Gdńska. Habilitation, Monografía 34, 2003.
- Niemunis, A. & Herle, I., "Hypoplastic Model for Cohesionless Soils with Elastic Strain Range", en *Mechanics of Cohesive frictional Materials*, 4(2), 1997, pp. 279-299.
- Núñez, W. P. et al., "Shear Strength and Permanent Deformation of Unbound Aggregates Used in Brazilian Pavements", en *Proc., of the 6th International Symposium on Pavements Unbound*, 2004, pp. 23-31.
- Pidwerbesky, B. D., "Fundamental Behaviour of Unbound Granular Pavements Subjected to Various Loading Conditions and Accelerated Trafficking" [tesis de doctorado], University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1996.
- Potts, C. F., Ruth, B. E. & Smith, L. L., "Performance of Sand-Asphalt and Limerock Pavements in Florida", en *Transportation Research Record*, 741, Transportation Research Board, Washington D. C., 1980, pp. 22-34.
- Rada, C. & Witczak, W. M., "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials", en *Transportation Research Record*, 810, Transportation Research Board, Washington D. C., 1981, pp. 23-33.
- Reyes Lizcano, F. A., *Diseño Racional de Pavimentos*, Pontificia Universidad Javeriana y Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C., 2003.
- Roberts, F. L. & Rosson B. T., "Effects of Higher Tire Pressures on Strain in Thin AC Pavements", en *Transportation Research Record*, 1043, Transportation Research Board, Washington D. C., 1985, pp. 68-77.
- Rondón, H. A. & Lizcano, A., "Modelos de Comportamiento de Materiales Granulares para Pavimentos y Aplicación de la Ecuación Constitutiva Hipoplástica", en *III Jornadas Internacionales de Ingeniería Civil*, Cuba, 2006.
- Saussine, G. et al., "Modelling Ballast under Cyclic Loading Using Discrete Element Methods", en *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Proc. of CBS04*, Bochum, 2004, pp. 649-658.
- Shell International Petroleum Company, *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavement and Overlays for Road Traffic*, London, 1978.
- Sweere, G. T., "Unbound granular bases for roads" [tesis de doctorado], University of Delft, Netherlands, 1990.
- Tacioglu, E. & Hjelmstad, K. D., "Simple Non-linear Model for Elastic Response of Cohesionless Granular Materials", en *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 128, 2002, pp. 969-978.
- Takeuchi, Y. et al., "Fundamental Study on Permanent Deformation Analysis of Granular Base Course Material Using Elasto-Plastic Model", en *Proc., of the 6th International Symposium on Pavements Unbound*, 2004, pp. 69-78.

- Tatsuoka, F. et al., "Non-linear Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials Predicted by the Cross-Anisotropic Hypo-Quasi-Elasticity Model", en Gomes Correia (edit.), *Unbound Granular Materials – Laboratory testing, In-situ testing and modeling*, Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 197-206.
- TRL – Transport Research Laboratory, "A Guide to the Structural Design of Bitumen-Surfaced Roads in Tropical and Sub-tropical Countries", en *RN31, Draft 4th edition*, 1993.
- Ullidtz, P., "Analytical Tools for Design of Flexible Pavements", en *Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements*, International Society for Asphalt Pavements, Denmark, 2002.
- Uzan, J., "Granular Material Characterization for Mechanistic Pavement Design", en *Journal of Transportation Engineering*, vol. 125, 1999, pp. 108-113.
- Vos E. et al., "The Non-linear Elastic Model of Boyce: An Evaluation of the Model in the FEM – Program DIANA", en Gomes Correia (edit.), *Flexible Pavement*, Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 201-207.
- Werkmeister, S., "Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions" [tesis de doctorado], University of Technology, Dresden, 2003.
- Werkmeister, S., Dawson, A. & Wellner, F., "Permanent Deformation Behaviour of Granular Materials and the Shakedown Concept", en *Transportation Research Record*, 1757, Transportation Research Board, Washington D. C., 2001, pp. 75-81.
- _____, "Deformation Behaviour of Granular Materials under Repeated Dynamic Load", en *Journal of Environmental Geomechanics – Monte Verità*, 2002.
- _____, "Pavement Design Model of Unbound Granular Materials", en *Journal of Transportation Engineering*, vol. 130, 2004, pp. 665-674.
- Wichtmann, T., "Explicit Accumulation Model for Non-cohesive Soils under Cyclic Loading" [tesis de doctorado], *Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr - Universität Bochum*, Bochum, 2005.
- Wolff, H. & Visser, A. T., "Incorporating Elasto-Plasticity Granular Layers Pavement Design", en *Proc. Instn. Civil Engineering Transportation*, 105, 1994, pp. 259-272.
- Woojin, L. et al., "Resilient Modulus of Cohesive Soils", en *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123, núm. 2, 1997, pp. 131-136.
- Zaman, M., Chen, D. & Laguros, J., "Resilient Moduli of Granular Materials", en *Journal of Transportation Engineering*, vol. 120, núm. 6, 1994, pp. 967-988.
- Zeghal, M., "A Discrete Element Study of the Resilient Behavior of Granular Materials", en *14th ASCE Engineering Mechanics Conference*, Austin – Texas, 2000, p. 5.
- _____, "Effect of Compaction on the Resilient Behaviour of Granular Materials: an Analytical Study", en *16th ASCE Engineering Mechanical Conference*, University of Washington, Seattle, 2003, p. 3.
- _____, "Discrete-Element Method Investigation of the Resilient Behavior of Granular Materials", en *Journal of Transportation Engineering*, vol. 130, 2004, pp. 503-509.