

---

# COMPARACIÓN DE MÓDULOS DINÁMICOS DE PROBETAS ELABORADAS POR EL MÉTODO MARSHALL Y POR EL MÉTODO SUPERPAVE

---

Carlos Rodolfo Marín Uribe\*  
María Rosa Guzmán Meléndez\*\*

Recibido: 01/03/2007

Aceptado: 27/03/2007

## RESUMEN

En el mundo se han emprendido grandes campañas para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas; entre ellas, está la liderada por los Estados Unidos denominado “Programa estratégico de investigación en carreteras (SHRP)” en la que se desarrollan nuevos ensayos para medir las propiedades de los materiales que constituyen las mezclas y para las mezclas como material de construcción. Uno de los productos finales de SHRP es el sistema Superpave (pavimentos asfálticos con comportamiento superior). En Colombia, en 1996, se modificaron las especificaciones de construcción de carreteras, introduciendo exigencias en el control de los procesos constructivos, pero sin modificar de manera apreciable lo que al diseño de mezclas en caliente se refiere. En este artículo se muestran los resultados de una investigación donde se pretendió profundizar en uno de los tantos aspectos que intervienen en el desempeño de las mezclas asfálticas que se fabrican en Colombia, y es precisamente el de diseño de la mezcla, porque se considera que en esta etapa se pueden analizar de forma más completa los materiales constitutivos y las mezclas mismas para predecir con mayor certeza el desempeño en obra, bajo unas condiciones determinadas de tránsito, clima y apoyo estructural. Es así como se realiza la

---

\* Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Especialista y Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca, Auditor interno en Aseguramiento de la Calidad Normas ISO 9000. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Medellín, Coordinador del Área de Geotecnia. e-mail: [cmarin@udem.edu.co](mailto:cmarin@udem.edu.co); [caromaur72@hotmail.com](mailto:caromaur72@hotmail.com)

\*\* Ingeniera Civil de la Universidad del Cauca. Especialista y Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca. Profesora de tiempo completo de la Facultad de Ingenierías de la Universidad del Quindío. Jefa del Área de Vías. e-mail: [mrguzman@uniquindio.edu.co](mailto:mrguzman@uniquindio.edu.co); [meryrose@hotmail.com](mailto:meryrose@hotmail.com)

comparación de los módulos dinámicos obtenidos de probetas de mezcla asfáltica elaborados por dos metodologías distintas, la Marshall y la Superpave; la primera, tradicional en Colombia, y la segunda, una propuesta innovadora en el mundo sin tener acogida aún en nuestro país.

**PALABRAS CLAVE:** mezcla asfáltica, Superpave, Marshall, módulo dinámico, ley de fatiga, tracción indirecta, agregados pétreos.

## ABSTRACT

All over the world, major programs have been carried out in order to improve the behavior of asphalt mixtures. Among them is the one led by the United States called "Strategic Highway Research Program (SHRP)" which develops new tests to measure the properties of the materials that constitute the mixture and for the mixtures, such as construction materials. One of SHRP's final products is the Superpave system (Superior Performance Asphalt Pavements). In 1996, Colombia changed the specifications for road constructions and introduced requirements on the control of construction processes but without modifying the appreciable way of designing hot mixtures. This article shows the results of a research that aimed at studying one of the many aspects that inspect the performance of asphalt mixtures; this aspect is the mixture design because it is considered to be the stage where one can completely analyze the constitutive materials and the mixtures themselves in order to predict, with a higher rate of certainty, their performance in a construction work under determined conditions of traffic, climate and structural support. Then the article compares de dynamics modulus obtained from sample of asphalt mixtures through two different methodologies: Marshall and Superpave. The first one is traditional in Colombia while the second has not been a successful new alternative in our country yet.

**KEY WORDS:** Asphalt mixture, Superpave, Marshall, dynamics modulus.

## INTRODUCCIÓN

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada en el laboratorio la densificación que ocurre en campo, bajo la acción vehicular, y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban

un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima (Garnica *et al.*, 2005).

Se pretende mostrar, entonces, una comparación en el comportamiento de mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall (utilizado en Colombia) y por el método volumétrico Superpave con agregados y asfalto nacional, teniendo en cuenta las condiciones del clima y el tránsito colombianos. El análisis del resultado está orientado hacia lograr una mejor explotación del potencial de nuestros materiales viales. La premisa de este trabajo es

que a partir de unos mismos materiales se puede lograr un mejor producto, si aplica una fórmula de trabajo obtenida por un método de diseño que realice controles efectivos para predecir con mayor certeza el comportamiento de las mezclas asfálticas en servicio.

Finalmente, dicha comparación se hace mediante los módulos dinámicos obtenidos de probetas construidas por las dos metodologías.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Básicamente corresponde a un trabajo experimental de laboratorio, donde se ha elaborado

un número considerable de probetas con las dos metodologías de diseño propuestas: Marshall y Superpave. Este trabajo experimental constó de las siguientes actividades:

### Selección de materiales

### Selección del ligante asfáltico

Se utilizó un asfalto producido en la planta de Barrancabermeja, el cual es uno de los asfaltos más usados en los proyectos viales en Colombia y cuyas propiedades físicas se pueden ver en la tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades físicas del asfalto

Ensayo	Resultado (promedio)
<b>ASFALTO ORIGINAL</b>	
Peso específico	1.012 gr/cc
Penetración a 10°C	12 $\frac{1}{10}$ mm
Penetración a 25°C	68 $\frac{1}{10}$ mm
Punto de ablandamiento	49.2 °C
<b>ASFALTO ENVEJECIDO</b>	
Penetración a 25°C	32 $\frac{1}{10}$ mm
Punto de ablandamiento	56.6 °C

### Selección de la estructura granulométrica

Se buscó una estructura granulométrica de bastante uso en el territorio colombiano que sirviera como base de referencia para posteriores estudios y como principio comparativo de su utilización en la elaboración de mezclas asfálticas por dos metodologías diferentes. Esta selección muestra las siguientes características:

- a) Se escogió como granulometría de trabajo la denominada MDC-2 (mezcla densa en caliente tipo 2) establecida en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 1996). La razón fundamental es que este tipo de mezcla es el más utilizado para carpetas de rodadura en las carreteras colombianas. La distribución granulométrica se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Granulometría Mezcla Densa en Caliente tipo 2 (MDC-2)

Tamiz No	Abertura (mm)	Porcentaje pasante (%)
¾"	19	100
½"	12.5	95
3/8"	9.5	80
4	4.75	60
8	2.36	44
16	1.18	32.5
30	0.6	24
50	0.3	16.5
100	0.15	10
200	0.075	5

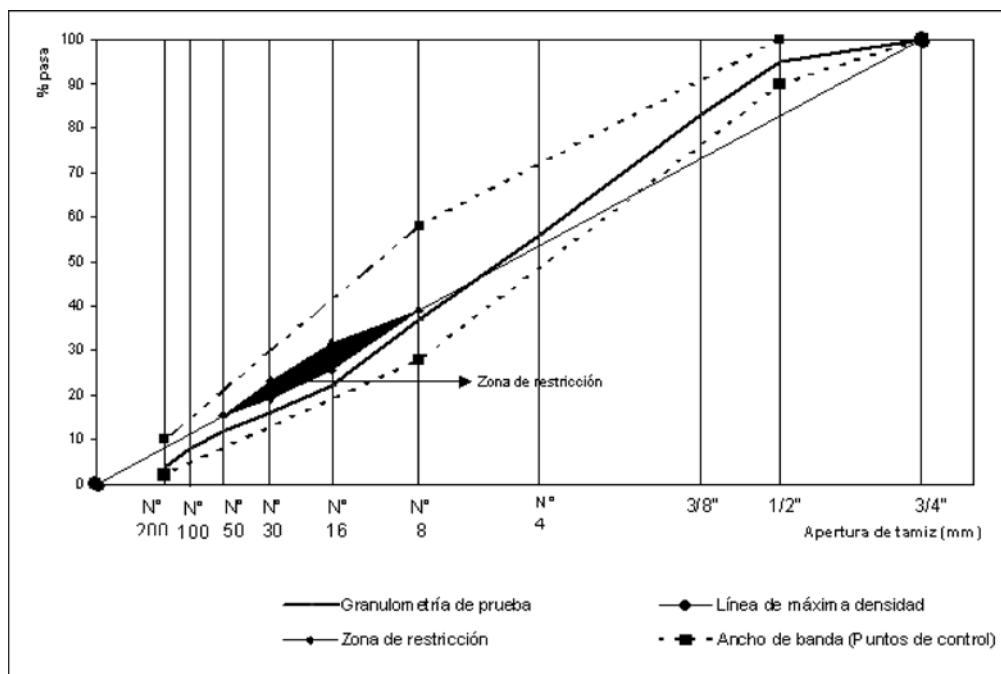
- b) Superpave emplea la serie estándar de tamices de ASTM y las siguientes definiciones con

respecto al tamaño del agregado (Guzmán y Marín, 2004):

**Tamaño máximo nominal:** un tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.

**Tamaño máximo:** un tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

Como el tamaño máximo del material es 19 mm, la especificación Superpave a utilizar será la correspondiente a la de un tamaño máximo nominal de 12.5 mm. La figura 1 muestra en "exponente 0.45" la granulometría escogida (MDC-2) con el objeto de facilitar su visualización y mantener la forma de presentación recomendada por Superpave (Morphy, 1998).



**Figura 1.** Granulometría de prueba en gráfico exponente 0.45

### Obtención del porcentaje óptimo de asfalto

Se llevó a cabo el diseño de la mezcla asfáltica por cada uno de los métodos propuestos en el trabajo (Marshall y Superpave). Para el diseño por el método Marshall se hizo uso de la norma E - 748 resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall (INVIAS, 1996a). Para el método Superpave se utilizó lo expuesto en la metodología para el nivel I del diseño volumétrico.

Los porcentajes óptimos obtenidos para cada una de las mezclas y para cada uno de los métodos fueron:

Probetas Marshall: 5.8%  
 Probetas Superpave: 6.1%

### Caracterización mecánica y dinámica de las mezclas asfálticas

Para una evaluación aceptable de las probetas de mezcla asfáltica obtenidas por los dos métodos se muestra la tabla 3, donde se especifican los ensayos y las normas aplicadas para cada uno de ellos.

**Tabla 3.** Normas para la ejecución de los ensayos

ENSAYO	NORMA
Tensión indirecta para el módulo resiliente de mezclas asfálticas	E-749
Resistencia a la fatiga	Deducida de las fórmulas de la Shell
Estabilidad y flujo	E-748
Tracción indirecta conservada	AASHTO T-283

### Módulo dinámico

Para evaluar la respuesta a las sollicitaciones dinámicas, se obtuvieron los valores de los módulos dinámicos desarrollándose los siguientes pasos.

- a) Para obtener las curvas maestras (variación del módulo con respecto a la temperatura) se escogieron las temperaturas de 20, 25 y 35°C.
- b) Para cada temperatura se fabricaron tres probetas; para un total de nueve por cada método de diseño. Cabe mencionar que a cada una de las probetas se le efectuaron seis lecturas de módulo dinámico; las tres primeras en posición original y las otras tres a la probeta girada 90°C; es decir, que el valor del módulo dinámico asociado a cada una de las temperaturas de ensayo es el resultado del promedio de 18 lecturas, cantidad suficiente para considerarlo válido y confiable.
- c) Las probetas se compactaron con sus respectivas fórmulas de trabajo; con un contenido de vacíos de aire del 4%, el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y la estructura granulométrica escogida (MDC-2). Este proceso se realizó tanto para el método Marshall como para el método Superpave (usando el compactador giratorio y probetas de 6" de diámetro).
- d) La evaluación de los módulos dinámicos se realizó con el equipo UTM "Universal Testing Machine" tipo Nottingham (UTM, 1997).

Los valores de módulo dinámico obtenidos y sus correspondientes segmentos de curvas maestras se pueden observar en la tabla 4 y la figura 2.

**Tabla 4.** Valores de módulos dinámicos

Temperatura (°C)	Valor del Módulo dinámico según método de diseño (Mpa)	
	Marshall	Superpave
20	4261	12881
25	2799	7893
35	724	2525

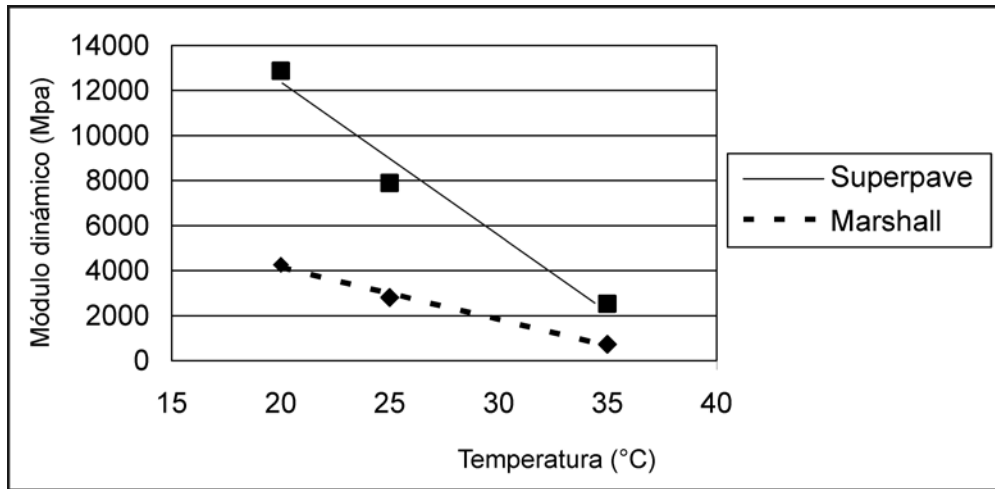


Figura 2. Módulos dinámicos

### Análisis de resistencia a la fatiga

Con base en los valores de módulos dinámicos medidos a las mezclas y las características volumétricas de las mismas, se calcularon las leyes de fatiga utilizando el método SHELL (ver figuras 3

y 4). La dificultad en determinar las leyes de fatiga en el laboratorio hace necesaria la inferencia de las mismas con las fórmulas establecidas en la literatura y por entidades reconocidas como la SHELL (Huang, 2004).

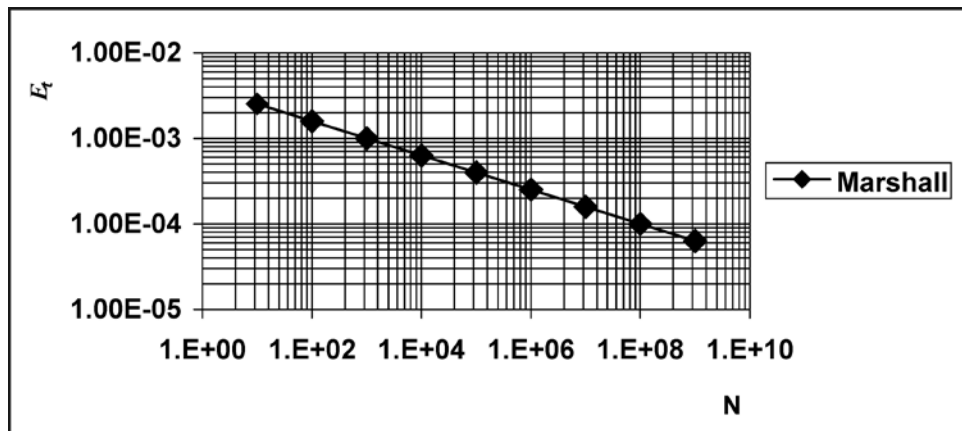


Figura 3. Ley de fatiga de la mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall

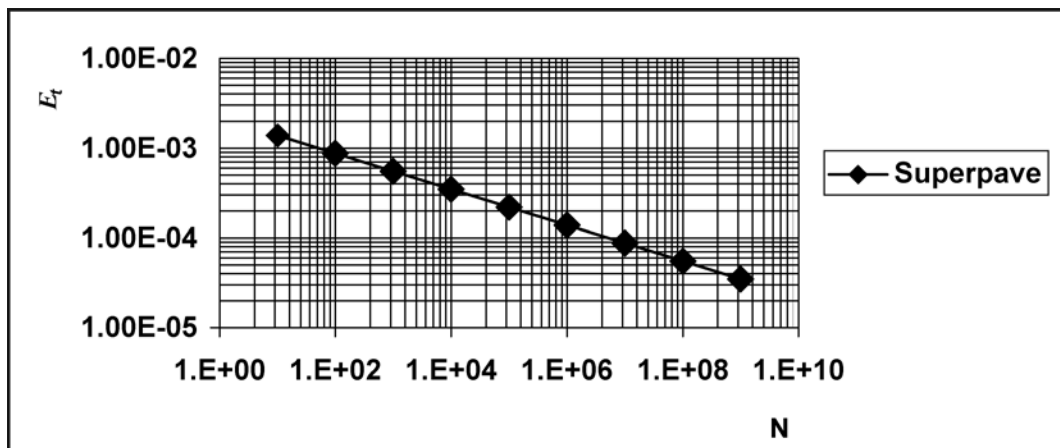


Figura 4. Ley de fatiga de la mezcla asfáltica diseñada por el método Superpave

### Resistencia a la compresión diametral

El método consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma tal que los esfuerzos aplicados a la probeta estén sobre dos generatrices opuestas. El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta (O’Flaherty, 2002), definiendo así un parámetro

que, a pesar de ser estático, es capaz de caracterizar la mezcla bituminosa de una forma adecuada para representar los esfuerzos de tracción que se producen en servicio y que, a su vez, son los responsables de los agrietamientos de las mezclas una vez alcancen su resistencia a la fatiga. Para obtener un valor confiable se elaboraron cuatro probetas y así calcular el promedio de las resistencias halladas. Estos valores se anexan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de la resistencia a la compresión diametral

Metodología	Briqueta N°	Rt (Mpa)	Rt Promedio (Mpa)
Marshall	9	1.68	1.75
	10	1.91	
	11	1.68	
	12	1.73	
Superpave	61	2.47	2.60
	62	2.57	
	63	2.75	

### Estabilidad y flujo

En el ensayo de estabilidad y flujo Marshall, una vez preparada la muestra se la somete a la carga en el aparato Marshall a una velocidad de

2 pulgadas/minuto hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define mediante la máxima lectura obtenida en el dial de carga. El número de libras correspondiente a esta lectura referido a una briqueta de 2.5” de alto se anota como estabilidad Marshall.

Mientras se está aplicando la carga, se mantiene el medidor de flujo firmemente en posición vertical sobre la barra guía y se retira cuando ocurre la carga máxima. La lectura en el dial en ese instante se denomina flujo y se expresa en centésimas de pulgada. La tabla 6 muestra los valores de estabilidad y flujo obtenidos en el laboratorio.

**Tabla 6.** Valores de la estabilidad y el flujo

Metodología	Estabilidad (Lbs)	Flujo (1/100")
Marshall	2247	11.0
Superpave	2554	13.7

### Sensibilidad a la humedad

Para el análisis, se utilizó la prueba de tracción indirecta conservada norma AASTHO T 283, donde se compactan seis briquetas con el 7% de vacíos. Tres briquetas conforman un subgrupo y son consideradas de control, y el otro sub-grupo de tres es acondicionado sometiéndolo a una saturación por vacío, y después dejándolo por 24 horas a una temperatura de 60°C. Todas las briquetas son ensayadas a 25°C para determinar su resistencia a la tracción indirecta.

La sensibilidad a la humedad es el cociente entre la resistencia a la tracción del subgrupo acondicionado y la resistencia a tracción del subgrupo de control. Los resultados arrojados por los ensayos de laboratorio se observan en la tabla 7.

**Tabla 7.** Valores de la resistencia residual por sensibilidad a la humedad

Metodología	Resistencia residual (%)
Marshall	73.7
Superpave	77.8

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

- a. Los valores de módulo dinámico obtenidos de las muestras elaboradas por el método Superpave superan, en gran medida, a los obtenidos de las probetas Marshall, del orden del doble.
- b. Los resultados del ensayo de compresión diametral son mayores en las mezclas tipo Superpave. Este ensayo, a pesar de ser estático, representa de alguna forma los esfuerzos de tracción que se producen en una mezcla en servicio, responsables ellos de los agrietamientos. Por lo anterior, es evidente que una mezcla elaborada con la metodología Superpave presenta mayor resistencia al agrietamiento por esfuerzos de tracción que las elaboradas por la metodología tradicional Marshall.
- c. De acuerdo con las gráficas de fatiga deducidas se destaca que, cuando se aplica el mismo esfuerzo a ambas mezclas, la Superpave tendrá menores deformaciones debido al valor del módulo, el cual es mucho mayor y, por lo tanto, soportará mayores repeticiones de carga.
- d. Los valores de resistencia residual no cumplen con lo establecido como mínimo por la norma AASTHO T-283 (80%). Sin embargo, las mezclas tipo Superpave superan a las tipo Marshall. Se requiere entonces un estudio más completo de la susceptibilidad de las mezclas asfálticas y la calidad de sus materiales constitutivos.
- e. En términos generales, las mezclas fabricadas por el método Superpave muestran valores más altos que aquellas elaboradas por la metodología Marshall; lo que se puede observar claramente en los ensayos realizados.



## CONCLUSIONES

El aumento significativo del módulo dinámico de la mezcla Superpave se asocia a dos situaciones; estas son: el envejecimiento de la mezcla antes de la compactación y la estructuración del esqueleto del agregado dado por la compactación giratoria que queda en evidencia cuando se comparan los % de VAM alcanzados por las mezclas; la diseñada por el método Superpave tiene un valor más bajo.

De acuerdo con los valores de módulo obtenidos, se sugiere que las probetas que se fabriquen por el método Marshall para evaluar el comportamiento bajo cargas dinámicas también deben hacerse con mezclas con envejecimiento previo a la compactación para que permitan inferir con mayor confianza el desempeño de las mismas durante la vida en servicio.

Se debe destacar que el método de diseño Superpave busca obtener mezclas poco o nada susceptibles al ahuellamiento; esta pretensión conlleva a mezclas con esqueletos minerales con elevados ángulos de fricción interna, situación que se refleja plenamente en el resultado de los módulos dinámicos.

Se crea la necesidad de investigar más profundamente sobre los resultados de flujo obtenidos; aunque en las mezclas con metodología Superpave son altos y podría eventualmente pensarse que son susceptibles al ahuellamiento, los valores de módulos dinámicos hallados muestran una situación contraria. Por lo anterior, vale la pena preguntarnos si en ocasiones estamos descartando el uso de mezclas asfálticas basados en un parámetro que quizá deba reevaluarse o interpretarse adecuadamente en conjunto con otros parámetros más complejos.

Es importante certificar en el laboratorio las tendencias mostradas por las leyes de fatiga deducidas; además, se complementaría una caracterización dinámica más íntegra de las mezclas elaboradas con materiales colombianos. Este estudio garantizaría con mayor certeza el comportamiento a la fatiga de dichos materiales.

La diferencia que existe entre los criterios de diseño y los de control de campo hace que, en ocasiones, se puedan estar rechazando mezclas asfálticas con características satisfactorias o, en caso contrario, la aceptación de mezclas que contienen propiedades volumétricas que están en contravía a los criterios de diseño.

Es importante que las universidades colombianas inicien un trabajo de investigación fuerte sobre la metodología Superpave, y estudien con cuidado la necesidad de extractar lo más significativo de ella, promoviendo el uso de toda o alguna de las partes de la normativa propuesta por el programa SHRP. Como ejemplo se cita a los Estados Unidos donde diferentes universidades tales como: Universidad de Purdue, Universidad de Auburn, Universidad de Nevada-Reno, Universidad de Texas at Austin, Universidad de Pennsylvania, entre otras, están trabajando en la implementación de esta nueva metodología que hasta ahora arroja unos buenos resultados parciales.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca por ceder sus laboratorios de suelos, a la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales y al ingeniero Luis Carlos Vásquez Torres.

**BIBLIOGRAFÍA**

- GARNICA, P., DELGADO, H. & SANDOVAL, C. D. 2005. Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Publicación técnica N° 271. Sanfandila, Querétaro, México. 62 pp.
- GUZMÁN, M. R. & MARÍN, C. R. 2004. Comparación de las mezclas diseñadas por el método Marshall y las diseñadas por el método Superpave. Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería, área Vías Terrestres. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- HUANG, Y. 2004. Pavement analysis and design. Second edition. Editorial Prentice-Hall. PP 297 - 309.
- INVÍAS. 1996. Normas Generales de Construcción de Carreteras. Capítulo 4. Norma N° 450. Ministerio del Transporte, Instituto Nacional de Vías.
- INVÍAS. 1996a. Normas de Ensayos Para Materiales de Carreteras. Capítulo 3. Norma E-748 - Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato marshall. Ministerio del Transporte, Instituto Nacional de Vías.
- MORPHY, T. 1998. Superpave, The Future Of Hot Mix Asphalt Pavements. [http://www.asphaltinstitute.org/upload/Superpave\\_Future\\_HMA\\_Pavements.pdf](http://www.asphaltinstitute.org/upload/Superpave_Future_HMA_Pavements.pdf). Fecha de consulta 27 de Enero de 2007.
- O'FLAHERTY, C. A. 2002. Highways, the location, design, construction and maintenance of roads pavements, fourth edition, editorial BH. PP 348 - 349.
- UTM. 1997. Universal Testing Machine. Reference Manual. Test N° 003. IPC, Industrial Process Constrols. Australia.