

Método de optimización del número de giros de diseño mediante desempeño relativo

Ing. Jorge Prozzi
Ing. José Pablo Aguiar
Universidad de Texas, Departamento de Ingeniería Civil
Austin, Texas
Estados Unidos de Norteamérica

Resumen

El Departamento de Transportes de Texas (TxDOT) recientemente ha especificado el ensayo Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) dentro de sus requisitos para mezclas Superpave. Esto introduce una característica de desempeño a un método de diseño que es principalmente volumétrico, de manera que se garantice la resistencia al ahuellamiento y humedad de estas mezclas asfálticas. Sin embargo, el método de diseño Superpave ha sido originalmente desarrollado para producir mezclas resistentes a este tipo de falla, especialmente ahuellamiento. Esto ha llevado a que se produzcan mezclas con bajos contenidos de ligante asfáltico. Mientras que esto es ventajoso para mezclas resistentes al ahuellamiento, se están reportando mezclas susceptibles al agrietamiento las cuales se están convirtiendo en el más grande problema de los pavimentos asfálticos en Texas.

En un intento por producir mezclas con mayor contenido de ligante asfáltico, TxDOT ha investigado la posibilidad de modificar la metodología Superpave. Investigaciones recientes han indicado que el efecto de reducir los vacíos de aire en la mezcla de 4% a 3% o 2.5%, aunque permite un incremento en el contenido de ligante asfáltico, ha sido dañino para las mezclas, en particular para mezclas con ligantes asfálticos de baja viscosidad.

Este estudio presenta un procedimiento de diseño basado en intervalos de confianza mediante un análisis de desempeño, enfocado hacia una determinación del nivel de compactación (N_{design}) que incremente el contenido de ligante asfáltico en la mezcla, sin que se comprometa la resistencia al ahuellamiento. Un esquema experimental ha sido diseñado para analizar las características de desempeño de la mezcla asfáltica usando varios niveles de N_{design} . El procedimiento ha indicado la necesidad de la reducción en los niveles de compactación (N_{design}) para la mayoría de las condiciones, con la excepción de pavimentos sometidos a altos volúmenes de tráfico en regiones de altas temperaturas. El número de giros de diseño para la mayoría de las condiciones podría ser reducido en Texas de 100 a 75-85 giros, para mejorar la resistencia a la fatiga y durabilidad, sin tener efectos significativos en la resistencia al ahuellamiento.

Palabras clave: Superpave, número de giros, resistencia al ahuellamiento, resistencia a la fatiga, desempeño relativo, pavimento.

Abstract

The Texas Department of Transportation (TxDOT) has recently established Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) specification criteria for Superpave mixtures. This has introduced a performance related feature to an otherwise volumetric mix design approach structured to ensure the rutting performance of asphalt mixtures. The Superpave mixture design procedure is itself geared towards the production of rut resistant mixtures. This, together with the new HWTD performance criterion tends to promote mixtures with lower binder contents. While this is advantageous for rutting resistance, there are reports that these mixtures are prone to cracking, which is becoming the single largest problem for asphalt pavements in Texas.

In an attempt to produce mixes with higher binder contents to alleviate cracking problems, TxDOT has investigated the possibility of modifying the current design criteria established for Superpave mixtures. Initial research investigating the influence of lowering the 4 percent voids in the mix criterion to 3 and even 2.5 percent has resulted in increased optimum binder contents but has proven detrimental for those mixtures using softer binders. The Superpave mixture design method does not account for mixes with stiff polymer-modified asphalts currently being used. Furthermore, the concentration of coarse aggregate in the mix and the influence of nominal maximum aggregate size are not accounted for.

The study reported in this article outlines a reliability-based mixture design procedure based on a performance related approach geared towards determining revised N_{design} compaction levels to increase binder contents in asphalt mixtures without compromising rutting performance. An extensive experimental program has been devised to investigate the performance characteristics of asphalt mixtures designed using the revised N_{design} levels and to account for the nominal maximum aggregate size and the concentration of coarse aggregate in the mix. The procedure found strong support for decreasing current N_{design} levels under most conditions, except when high-volume facilities in warm environments. The number of design gyrations for most condition in Texas could be lowered to 75 to 85 from improved fatigue performance, without significant loss of rutting resistance.

Key Words: Superpave, number of gyrations, N_{design} , rutting resistance, fatigue resistance, relative performance, pavement.

Introducción

Actualmente, el método de diseño Superpave, que es utilizado por muchos departamentos de transporte (DOT's) de distintos estados, es esencialmente un enfoque volumétrico (nivel 1), pues el contenido de ligante óptimo y la granulometría son seleccionados analizando el contenido de vacíos de aire (VTM) de la mezcla.

La herramienta principal en el diseño volumétrico es el compactador giratorio superpave (SGC). Una mezcla satisfactoria es aquella que cumple con requisitos volumétricos rigurosos a un número de giros inicial y de diseño (N_{initial} y N_{design} , respectivamente). Estos niveles son a su vez determinados por el tráfico total, expresado en número de ejes equivalentes (ESALs) proyectados para la vida útil del pavimento (generalmente 20 años). Basado en estos criterios, se espera que las curvas de densificación correlacionen con el desempeño del pavimento y, en particular, con la deformación permanente (NCHRP [1]).

La ventaja de este enfoque es que criterios de especificación pueden ser establecidos para juzgar la calidad y controlar las mezclas asfálticas durante el proceso de producción en planta y construcción. La desventaja de este método es que el diseñador está restringido cuando se necesitan ajustes a las propiedades volumétricas (ej. VMA), y más importante aún, que el desempeño de las mezclas no es considerado como parte del proceso de diseño. Con el fin de solventar el problema previo, DOT's de varios estados han incluido ensayos de desempeño como el HWTB en sus especificaciones. Consecuentemente, este enfoque ha promovido mezclas asfálticas que se resisten adecuadamente el ahueamiento, pero sin embargo, están presentando problemas de agrietamiento prematuro.

Los departamentos de transportes (DOT) de varios estados que actualmente diseñan y construyen sus pavimentos usando Superpave han encontrado que, en general, la resistencia al ahueamiento de las mezclas tiende a ser adecuada. Esto es de ser esperado ya que debido a los requisitos volumétricos y propiedades de los materiales, las mezclas Superpave tienden a tener un fuerte esqueleto granulométrico. Adicionalmente, al usar ensayos de ahueamiento en laboratorio para aceptar las mezclas, la resistencia a la deformación permanente es aún mejorada.

Sin embargo, mientras que las mezclas asfálticas se vuelven más secas para garantizar alta resistencia al ahueamiento, el agrietamiento por fatiga se ha convertido en un problema evidente en Texas, principalmente en pavimentos relativamente nuevos (5 a 7 años). Consecuentemente, medidas para mejorar la resistencia al agrietamiento por fatiga son necesarias. Desde una perspectiva volumétrica, esto se puede hacer de dos maneras:

- 1) Incrementando la densidad relativa (por encima de 96%) a un número dado de giros de diseño fijo, incrementando así el contenido de ligante. Esto sin embargo ha generado problemas de desempeño, especialmente cuando se usan ligantes de baja viscosidad como PG 64; ó
- 2) Reduciendo el número de giros de diseño mientras se mantenga la densidad relativa en 96% (contenido de vacíos de aire del 4%).

Con el objetivo de mejorar las propiedades en fatiga de la mezcla, una metodología para seleccionar un adecuado número de giros de diseño (N_{design}), basado en requisitos de fatiga y ahueamiento para cada mezcla asfáltica, ha sido establecido y está siendo evaluado. La metodología fue desarrollada usando la información obtenida del HWTB y del equipo de análisis de fatiga en vigas. La información es posteriormente estandarizada en unidades de desempeño relativo para poder ser comparada directamente.

Finalmente, se generaron gráficos de desempeño relativo basándose en diferentes niveles de confianza asignados a la resistencia por fatiga y ahueamiento. Estas gráficas de confianza permiten la selección de un número de giros de diseño que debería garantizar un desempeño de la mezcla de acuerdo a requisitos específicos de cada proyecto, como tráfico y clima.

Debido a la alta variabilidad de los parámetros que son usados para caracterizar fatiga (número de ciclos a la falla) y ahueamiento (ahueamiento a un número específico de repeticiones), gráficos de desempeño basados en dos nuevos parámetros (pendiente de la fase estable de tanto las curvas de ahueamiento y fatiga) fueron desarrollados como sustitutos de mayor consistencia y representatividad, a los parámetros actuales.

Una de las dificultades en formular una mezcla óptima es alcanzar un balance aceptable entre propiedades de

mezcla (resistencia a fatiga vs. ahuellamiento), mientras que se toman en consideración parámetros ambientales y económicos. Cada diseño de mezcla está basado en esta premisa y tiene el mismo objetivo. Son los métodos para alcanzar dicho objetivo los que difieren: enfoques empíricos, diseño volumétrico, análisis de desempeño o hasta métodos analíticos. La meta última es obtener una mezcla que se desempeñe adecuadamente en el campo.

Número de giros de diseño (N_{design})

Los niveles de compactación de diseño fueron originalmente especificados en la llamada “tabla de N_{design} ”, sugiriendo esfuerzos de compactación basados en los niveles de tráfico y temperatura máxima promedio de aire. La tabla de N_{design} fue desarrollada basándose en información limitada de compactación de laboratorio y densidades de campo para diferentes niveles de tráfico en diferentes zonas climáticas [2]. Investigaciones posteriores desarrolladas por Brown y otros [3] han sugerido que los niveles de compactación de diseño (N_{design}) pueden ser muy altos, principalmente para volúmenes bajos de tránsito. Debe ser enfatizado que los niveles de N_{design} actuales resultan en mezclas con alta resistencia al ahuellamiento, pero reducida resistencia al agrietamiento y a la fatiga. Además, tramos de prueba en cinco diferentes estados (Alabama, Idaho, New Mexico, South Carolina y Wisconsin) han demostrado que el número de giros de diseño debe ser reducido, y que para casos de bajo volumen de tránsito, la reducción debe ser de hasta 30 giros [4]. Estudios más recientes [5, 6] apoyan esta reducción y recomiendan el uso de sólo cuatro niveles de tráfico y la eliminación de los niveles de temperatura.

Las agencias de estado están adoptando variaciones a la “tabla de N_{design} ” para sus necesidades particulares. Un ejemplo es el DOT de Virginia que recomienda un N_{design} de 65 giros para mezclas usadas en carreteras de bajo volumen y para capas de base [7].

El DOT de Alabama redujo N_{design} para carreteras de alto volumen de 125 a 100, con una posterior reducción a 85 giros para incrementar el contenido de ligante en las mezclas Superpave. Insatisfechos con el desempeño de las mezclas diseñadas usando 85 giros, N_{design} fue revisado basándose en el concepto de “punto de bloqueo” (el punto en el cual la altura de un espécimen en el SGC se mantiene constante por tres giros consecutivos). Esto define el momento en el cual la estructura granulométrica de la mezcla se traba

y alcanza la máxima compactación en el compactador giratorio. Si se hace compactación adicional después de este momento conlleva a degradación del agregado. Alabama determinó que la mayoría de sus mezclas se traban en el rango de 45 a 55 giros. El DOT de Alabama ha establecido el N_{design} mínimo en 60 giros, el cual al ser comparado con 85 giros, el contenido de ligante de sus nuevas mezclas N-60 ha incrementado 0.2–0.4% en promedio.

El DOT de Colorado presenta la opción de reducir el contenido de vacíos de aire de 4% a 3% durante la producción, aunque las mezclas sean diseñadas al 4%. Colorado reporta que un 1% en vacíos de aire resulta en un incremento del 0.1–0.3% en ligante. Este enfoque se debe a investigación local que indica que los pavimentos Superpave no se estaban densificando al 4% como se anticipaba originalmente.

El DOT de Maryland ha reducido los vacíos de aire de diseño de 4% a 3,5% y en algunos casos a 3%. El DOT de Maryland recomienda el uso de mezclas Superpave Nivel 1 con N_{design} de 50 giros. El DOT de Virginia usa un nivel de compactación más bajo (ej. 65 giros) sin importar el volumen de tráfico. Un incremento del PG del ligante es usado en algunos casos de alto tráfico de diseño. Maryland reporta que 65 giros de diseño son aún muchos cuando se comparan estas mezclas, a las diseñadas por Marshall. Para solucionar este problema, el requisito de vacíos llenos con aire (VFA) ha sido incrementado y los vacíos totales en la mezcla (VTM) han sido reducidos.

Desempeño relativo

Como se mencionó previamente, en este estudio la selección de un apropiado número de giros de diseño

Curva de deformación típica en el HWT

Figura 1

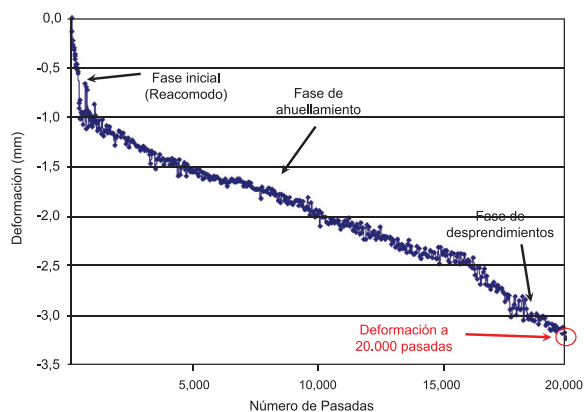


Figura 2 Curva típica de fatiga

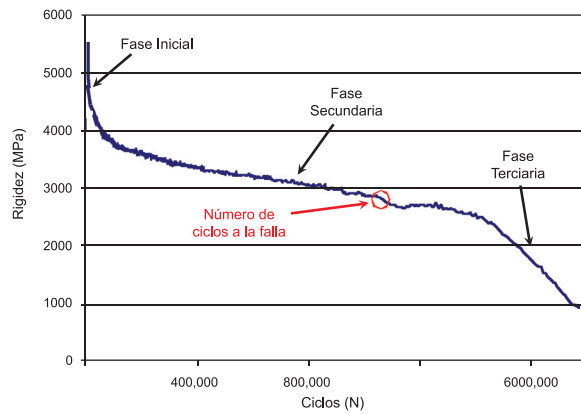


Figura 3 Pendiente de la fase de ahuellamiento en curva de deformación

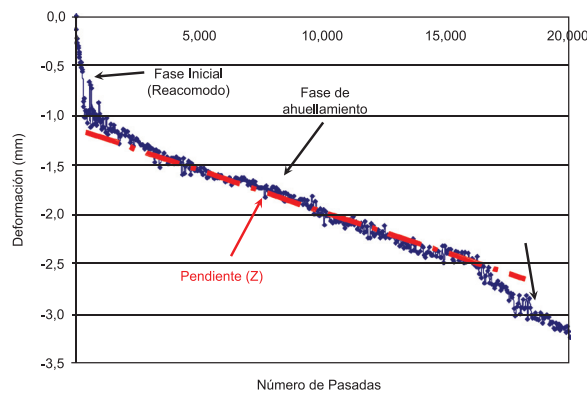
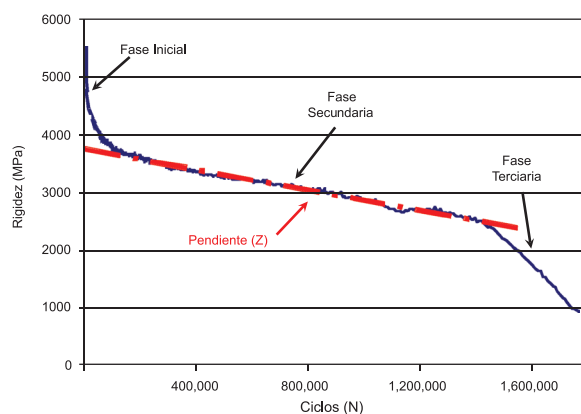


Figura 4 Pendiente (Z) de fase secundaria curva de fatiga



se hace en base a ensayos de desempeño de fatiga y ahuellamiento de laboratorio.

La normativa para evaluación de mezclas asfálticas en caliente mediante el HWTd de TxDOT (Tex-242-F), establece que el ahuellamiento de la mezcla no debe exceder 12.5 mm a 10.000, 15.000, o 20.000 pasadas de

la rueda metálica, dependiendo del grado PG del ligante, para PG 64, PG 70, o PG 76 respectivamente. Esto implica que el ensayo puede finalizar de dos maneras: 1) el ensayo concluye cuando cualquiera de los sensores (el HWTd usa 11 sensores para medir deformación, cada uno en diferente posición a lo largo de la huella de la rueda) alcance a medir una deformación máxima de 12.5 mm, o 2) cuando la mezcla resiste 20.000 pasadas sin exceder la deformación máxima de 12.5 mm. Por tanto los resultados son generalmente expresados en: 1) número de repeticiones requeridas para alcanzar 12.5 mm de ahuellamiento, o 2) ahuellamiento después de 20.000 repeticiones. Por esta razón es difícil comparar diferentes mezclas a un determinado número de pasadas, o a una deformación específica. Un posible parámetro consiste en la tasa entre la deformación máxima y el número de repeticiones para finalizar el ensayo, expresado en mm/pasada. El inverso de esta tasa es un indicador de la resistencia al ahuellamiento de la mezcla.

La figura 1 muestra una curva típica obtenida del HWTd. La deformación máxima al final del ensayo (20.000 pasadas) tiende a ser altamente variable porque la huella medida es función de las propiedades del agregado y ligante, preparación de la muestra, condiciones de ensayo, arreglo de la estructura granulométrica, y varias condiciones más. Una consideración importante es que, este parámetro tiende a representar inadecuadamente la resistencia al ahuellamiento, pues algunas mezclas pueden finalizar el ensayo durante la fase secundaria o de ahuellamiento, mientras mezclas más débiles pueden finalizar durante la fase de desprendimiento (aún cuando las deformaciones a 20.000 pasadas no sean significativamente diferentes). Otro problema con esta normativa es que no hace uso óptimo de los datos del ensayo sino que se basa en un solo punto al final del mismo. Esta práctica promueve la variabilidad de los resultados. A medida que más datos se usan para caracterizar una mezcla específica, la variabilidad será reducida y el resultado será más estable para una misma mezcla y consecuentemente más representativo.

Similar es el caso del ensayo para determinar resistencia a la fatiga usando el equipo de análisis de fatiga en vigas (AASHTO T321-03). El ensayo finaliza cuando la rigidez de la mezcla cae por debajo de 50% de la rigidez inicial, y consecuentemente, el número de ciclos que fueron requeridos para que la mezcla alcance el 50% de la rigidez inicial es considerado como el número de ciclos a la falla (ensayo de deformación constante). La rigidez inicial es la medida después de 50 repeticiones de carga.

La figura 2 muestra una curva típica de fatiga. Como fue el caso en ahuellamiento, problemas similares pueden ser identificados con el parámetro de fatiga.

Ambos parámetros presentan características que pueden tergiversar el desempeño real de la mezcla. Debido a esta razón, otros parámetros para caracterizar ahuellamiento y fatiga deben ser considerados. Un parámetro más consistente, que además presenta variabilidad mucho más baja con respecto a deformación a 20.000 pasadas, es la pendiente (Z) de la fase secundaria o de ahuellamiento en la curva de deformación. Este parámetro se muestra en la figura 3.

Similar al caso de ahuellamiento, y dado a su consistencia, el parámetro pendiente (de la fase secundaria o fase estable) demuestra ser una adecuada selección de parámetro para caracterización de la resistencia a la fatiga de una mezcla dada. Este parámetro no es función del número de ciclos a la falla como está definido en las especificaciones actuales, considerando que al alcanzar el 50% de la rigidez inicial muchas mezclas se encuentran aún dentro de la fase estable de fatiga, lo que subestima considerablemente la resistencia a fatiga de la mezcla. Este parámetro se muestra en la figura 4.

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, la pendiente (de la fase secundaria de las curvas de fatiga y deformación) es un parámetro adecuado para caracterizar desempeño, y es independiente del ciclo o pasada en que los ensayos de desempeño hayan finalizado. Adicionalmente, ayuda a diferenciar entre mezclas asfálticas distintas: cuando la pendiente (Z) se aproxima a cero, el desempeño de la mezcla crece; y mientras que la pendiente se incrementa, el desempeño se reduce. Más importante aún, el parámetro Z es marcadamente más consistente para una mezcla dada, y captura una propiedad de la mezcla que está más ligada al desempeño.

Método simplificado para calcular la pendiente (Z)

Puesto que el parámetro Z ha sido propuesto como alternativo a los parámetros tradicionales para caracterizar fatiga y ahuellamiento, un método simple y objetivo para determinar Z se presenta a continuación. Ha sido denominado como método para delineación de pendientes con diferencias significativas.

El método consiste en analizar las diferencias entre la curva de deformación permanente / fatiga y la línea que

se extiende de la rigidez / deformación inicial (primera medición registrada durante el ensayo análisis de fatiga en vigas o HWTD, respectivamente) hasta la rigidez / deformación final. La figura 5 ilustra este concepto, asumiendo una variable de respuesta continua y_i . Puede ser observado de la figura que hay tres fases distintas que delinean el desempeño de la mezcla asfáltica. Puesto que los datos son continuos, podemos definir una línea desde la respuesta inicial (x_1, y_1) hasta la respuesta final (x_n, y_n) como,

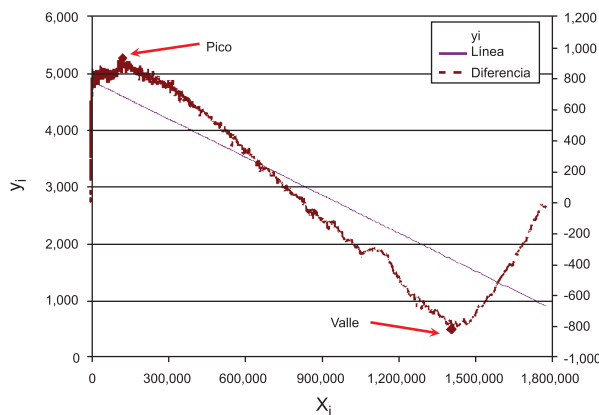
$$\hat{y} = \frac{X_n - X_1}{Y_n - Y_1} X_1 \quad \text{Ecuación 1}$$

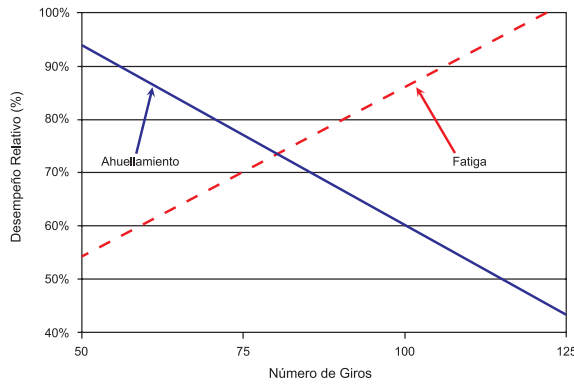
En la figura 5, la línea punteada representa la diferencia entre el desempeño medido y la línea calculada $(y - \hat{y})$. Dos óptimos, un pico y un valle, pueden ser fácilmente identificados donde la diferencia $y - \hat{y}$ es máxima o mínima (valores positivos y negativos máximos). El primer punto óptimo (pico) delinea el ciclo o pasada donde la fase de desempeño inicial termina y la fase de desempeño secundaria inicia. Similarmente, el segundo punto óptimo (valle) determina el ciclo o pasada donde la fase de desempeño secundaria termina e inicia la fase terciaria de desempeño. En otras palabras, el pico y el valle corresponden a los límites inicial y final de la fase secundaria de desempeño.

Habiendo determinado dichos óptimos en forma objetiva y ambivalente, un simple análisis de regresión linear de los datos de desempeño entre los dos óptimos se realiza para determinar la pendiente de la fase secundaria de la curva de fatiga o deformación, medidas mediante el equipo de análisis de fatiga en vigas o el HWTD, respectivamente.

Método para delineación de pendientes con diferencias significativas

Figura 5





Cálculo de desempeño relativo

Habiendo seleccionado un adecuado parámetro de desempeño para ambos ensayos, es posible optimizar el número de giros de diseño (N_{design}) tratando de minimizar el ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga simultáneamente. Para hacer esto, los parámetros de resistencia a la fatiga o ahuellamiento deben ser expresados en unidades consistentes, o no tener dimensiones. Sin embargo, como se puede observar de las secciones anteriores, cuando se evalúa ahuellamiento o fatiga en el laboratorio, ahuellamiento se mide generalmente en mm a una pasada específica, mientras que fatiga se mide en número de ciclos para que la mezcla alcance una rigidez determinada.

Una manera de solventar esta diferencia en unidades es estandarizar ambos indicadores de desempeño con respecto a ahuellamiento-fatiga a un número específico de N_{design} . En otras palabras, definir dos nuevos indicadores de desempeño de la siguiente manera,

$$RP = \frac{P_{N_{design} = i}}{P_{N_{design} = base}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde RP representa desempeño relativo, y $P_{N_{design}=i}$ se define como el desempeño de la mezcla asfáltica a i giros de N_{design} . Para poder determinar el desempeño relativo, la mezcla asfáltica debe ser evaluada a un número distinto de giros de diseño (al menos tres para ser representativo estadísticamente), mientras el contenido de vacíos de aire debe ser mantenido constante, para poder comparar el desempeño a un número dado de giros de diseño, con el desempeño a otro número de giros. Para este estudio, las mezclas se diseñaron a 50, 75, 100 y 125 giros de diseño con un

contenido de aire constante del 4% (durante el diseño de mezcla, los contenidos de ligante asfáltico fueron seleccionados de manera que a 50, 75, 100 y 125 giros de diseño la densidad relativa fuera 96%).

De esta manera, ahuellamiento y fatiga pueden ser definidos como un porcentaje del desempeño de la mezcla a un número fijo de giros (ej. 100 giros N_{design} que es el valor comúnmente utilizado en Texas) o como un porcentaje del desempeño óptimo (dentro del rango de análisis) en fatiga o ahuellamiento. Consecuentemente y por razones prácticas, para la segunda de dichas opciones, el N_{design} "base" se define como 50 para resistencia a la fatiga, puesto que dentro del marco experimental, las mezclas compactadas a $N_{design} = 50$ giros (contenido alto de ligante asfáltico) alcanzan la máxima resistencia a fatiga. En contraste, el N_{design} "base" se define como 125 para resistencia al ahuellamiento, puesto que dentro del marco experimental, las mezclas compactadas a $N_{design} = 125$ giros (contenido bajo de ligante asfáltico) alcanzan la máxima resistencia al ahuellamiento. Habiendo estandarizado las unidades de los indicadores de desempeño, un rango adecuado en el que se incremente la resistencia a la fatiga, mientras que el incremento de ahuellamiento sea mínimo, puede ser determinado.

En resumen, la selección del N_{design} "base" como función de la resistencia a la fatiga o ahuellamiento, se define de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 3} \quad RP_{fatiga} = \frac{P_{N_{design} = i}}{P_{N_{design} = 50}}$$

$$\text{Ecuación 4} \quad RP_{ahuellamiento} = \frac{P_{N_{design} = i}}{P_{N_{design} = 125}}$$

Nótese que esta es una selección arbitraria, pero el método puede acomodarse a otras definiciones de desempeño relativo para adaptarse a necesidades específicas. Las definiciones funcionaron satisfactoriamente en los casos analizados para este estudio. La figura 6 muestra el concepto de desempeño relativo. Puede observarse que al disminuir el número de giros de diseño incrementa la resistencia relativa a la fatiga. Sin embargo, el mismo incremento en N_{design} produce una disminución en la resistencia al ahuellamiento.

La mayor ventaja de estandarizar las unidades de los indicadores de desempeño es que el efecto de cambios

en el número de giros de diseño puede ser determinado en ambos indicadores. Esto permite la cuantificación estadística del desempeño relativo tanto en fatiga como en ahuellamiento, y consecuentemente, se pueden desarrollar las curvas de percentiles.

La asignación de diferentes percentiles también permite, dependiendo de las necesidades específicas de cada proyecto, asignar mayor peso a la resistencia a la fatiga o la resistencia al ahuellamiento, sin comprometer el desempeño global del pavimento y manteniendo el desempeño de la mezcla dentro de niveles aceptables de confianza, que finalmente podrían convertirse en parte integral de la especificación.

Estudio de caso Texas: Selección de N_{design} basada en intervalos de confianza

Cuatro diferentes mezclas asfálticas han sido evaluadas en este estudio de caso para evaluar y demostrar la aplicabilidad del método propuesto. Las mezclas son las siguientes: 1) mezcla de grava 12.5 mm (SP-C) con ligante PG76; 2) mezcla de grava SP-C usando ligante PG70; 3) mezcla de agregado calizo de 9.5 mm (SP-D) usando ligante PG76; y 4) mezcla de agregado calizo de 19 mm (SP-B) usando ligante PG64. Las curvas granulométricas utilizadas se muestran en la tabla 1 y reflejan la práctica en Texas. Las mezclas SP-C y SP-D son mezclas típicamente usadas para capas superficiales mientras que SP-B se utiliza para bases bituminosas.

Las mezclas analizadas fueron diseñadas usando criterios Superpave para el contenido óptimo de ligante (vacíos de aire al 4% a 100 giros del SGC). Tres contenidos de ligante adicionales también fueron seleccionados. Estos corresponden con los contenidos de ligante que mantienen los vacíos de aire en la mezcla al 4%, a 50, 75 y 125 giros en el SGC.

Ensayos HWTD y de fatiga (usando el equipo de análisis de fatiga en vigas) fueron realizados en las muestras de mezcla asfáltica a los cuatro contenidos de ligante asfáltico (que corresponden con los cuatro niveles de N_{design} evaluados). La figura 7 muestra el desempeño relativo de las mezclas asfálticas combinando todos los resultados. Mientras esto sólo produce un incremento en la variabilidad, y consecuentemente subestima el desempeño de las mezclas asfálticas de mejor desempeño debido a la inclusión de toda la información, se puede observar que el desempeño relativo óptimo se da a los 97 giros de diseño, cuando a la fatiga y

al ahuellamiento se les asigna igual peso o percentil (50/50). Es a este número de giros que las curvas de percentil del 50% para resistencia relativa a la fatiga y ahuellamiento se intersecan. En general, un incremento de 5 giros resulta en un incremento de desempeño relativo al ahuellamiento de 3.8%, mientras que la resistencia relativa a la fatiga disminuye en un 2.4%.

Puesto que las curvas del percentil 50%, o de desempeño relativo promedio, son estimadas estadísticamente, niveles adicionales de confianza también pueden ser calculados para casos en que mayor nivel de confianza es requerido. De esta manera, la figura 7 incluye los

Granulometría de mezclas asfálticas analizadas

Tabla 1

Tamiz	Tipo de Mezcla		
	Grava	Piedra Caliza	
	12.5 mm	19 mm	9.5 mm
	SP-C	SP-B	SP-D
2"	100.0	100.0	100.0
1 1/2"	100.0	100.0	100.0
1"	100.0	99.0	100.0
3/4"	100.0	92.4	100.0
1/2"	94.6	79.3	98.0
3/8"	81.0	--	92.7
#4	54.4	41.5	63.6
#8	32.9	32.6	49.6
#16	22.4	19.4	29.2
#30	16.2	12.0	17.7
#50	11.0	7.2	10.6
#100	7.6	--	--
#200	5.5	3.0	4.2

Gráfico de intervalos de confianza para todas las mezclas analizadas

Figura 7

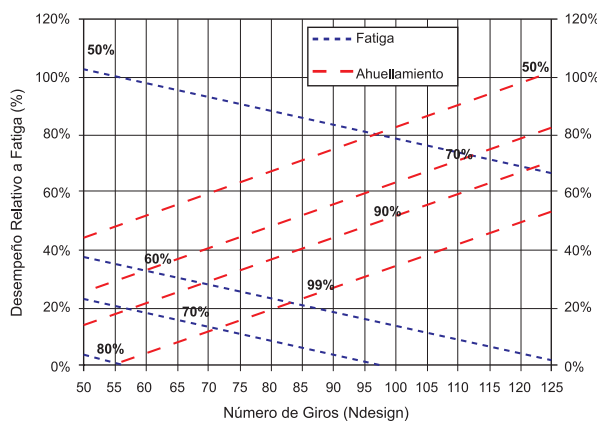
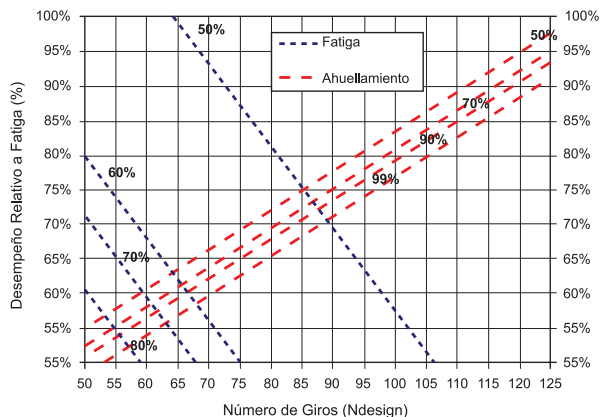


Figura 8 Gráfico de intervalos de confianza para mezcla de grava SP-C con ligante PG76

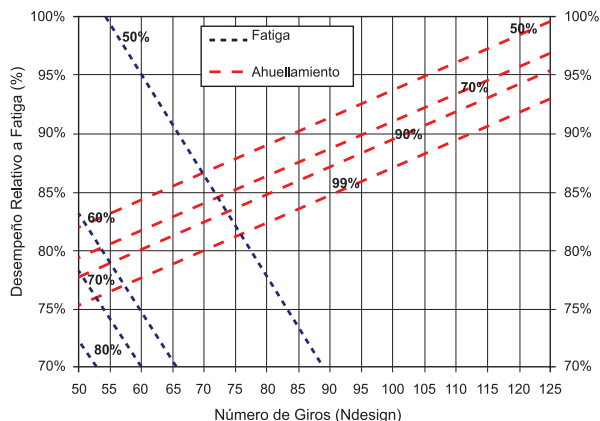


percentiles 50, 60, 70, 80, 90, 95 y 99%. Se puede observar de dichas curvas que para un nivel dado de desempeño relativo, cambios en el número de giros o N_{design} resulta en un incremento o reducción del nivel de confianza, y consecuentemente, en una indicación que la probabilidad de que el desempeño relativo deseado sea alcanzado.

Nótese que el desempeño relativo en la figura 7 fue determinado usando el parámetro Z, con el fin de obtener una representación consistente del desempeño de la mezcla asfáltica, e incluye la información de todas las mezclas asfálticas analizadas.

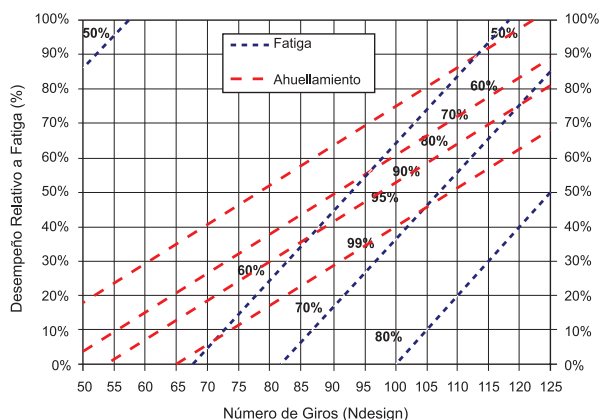
Un enfoque de mayor interés consiste en desarrollar dicho tipo de curvas para cada tipo de mezcla asfáltica para reducir la variabilidad a niveles más realistas. La figura 8 muestra las curvas de desempeño relativo para la mezcla de grava SP-C con ligante PG76. De todas las mezclas analizadas, esta es la que presentó mayor resistencia al ahuellamiento, así como una muy alta resistencia a la fatiga. Puede ser concluido de la figura que el número de giros de diseño que optimiza el desempeño relativo es 85, con 50% de confianza (promedio).

Figura 9 Gráfico de intervalos de confianza para mezcla de grava SP-C con ligante PG70

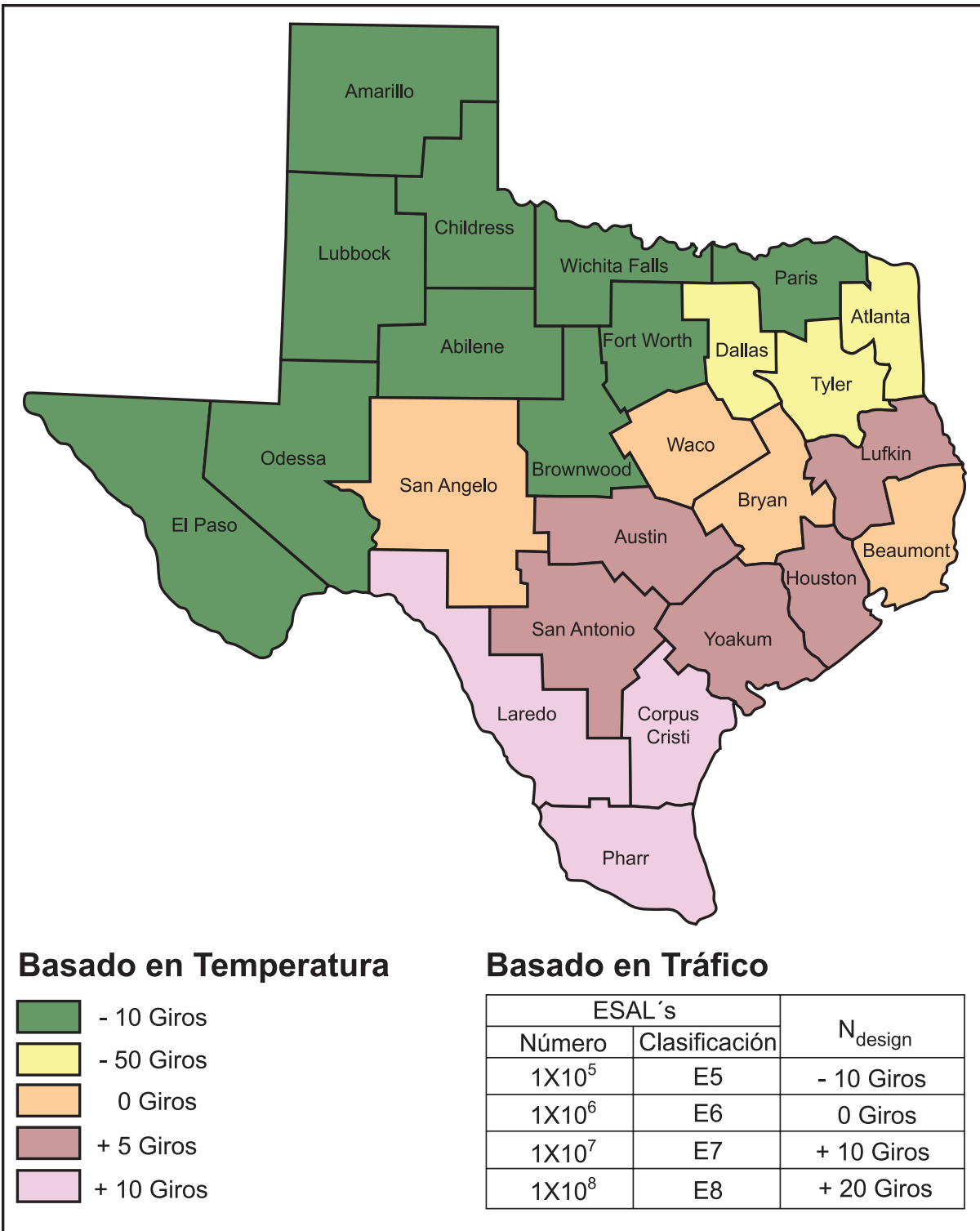


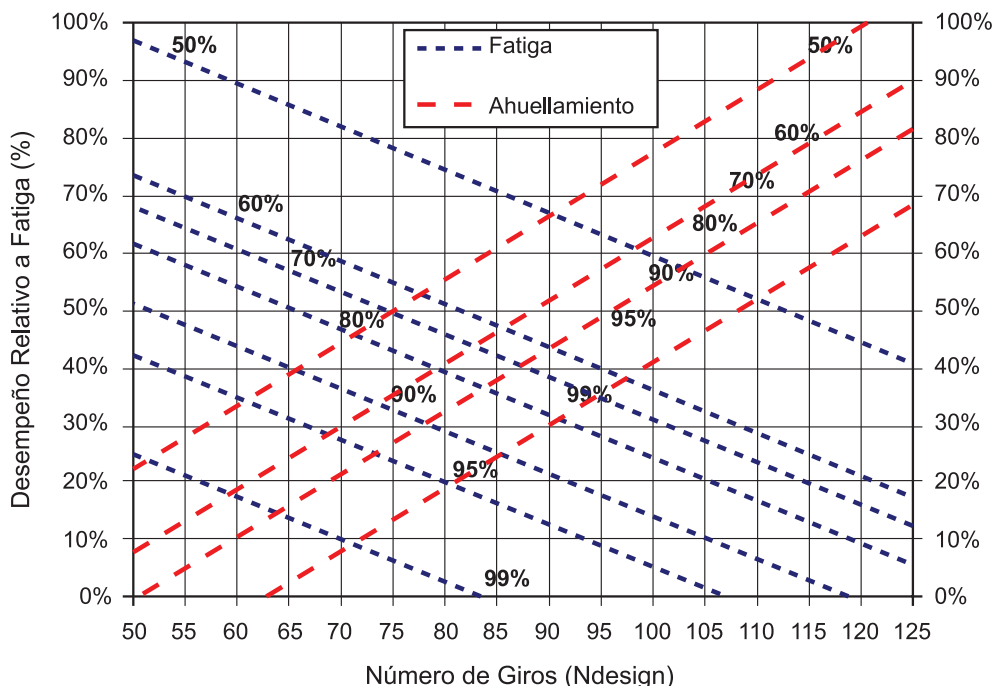
La figura 9 muestra las curvas de desempeño relativo para la mezcla de grava SP-C con ligante PG70. Entre las mezclas analizadas esta es la que presentó mayor resistencia a la fatiga. Se concluye de las curvas de 50% de confianza que 70 giros optimizan la resistencia relativa al ahuellamiento y fatiga de esta mezcla. La figura 10 muestra las curvas de desempeño relativo para la mezcla de agregado calizo SP-D con ligante PG76. La figura 10 merece atención especial. Nótese que la resistencia a la fatiga pareciera mejorar con el número de giros de diseño, caso opuesto a lo esperado.

Figura 10 Gráfico de intervalos de confianza para mezcla de agregado calizo SP-B con ligante PG74



El análisis estadístico de los datos mostrados en la Figura 10, indican que la pendiente de las líneas que representan la resistencia relativa a la fatiga no son significativamente diferentes a cero. Esto es otra ventaja del método propuesto ya que permite establecer la dependencia del desempeño de las mezclas y el contenido de ligante a priori. En este caso, la sensibilidad de la respuesta de fatiga a diferentes contenidos de ligante, como resultado de diferentes números de giros (50 a 125) fue pequeña y muy variable. Por tanto, la metodología debería ser únicamente aplicada cuando el desempeño de las mezclas es estadísticamente sensible a cambios en el contenido de ligante dentro del marco experimental. Como resultado, el número óptimo





de giros, a un nivel de confianza del 50% es superior a 125 giros (debido al hecho que la resistencia a fatiga de la mezcla no fue susceptible a cambios en el contenido de ligante asfáltico).

La mezcla de agregado calizo SP-B con ligante PG64, no cumplió con los requisitos de desempeño mínimo del HWTD. El análisis de dicha mezcla hubiera probado ser imposible si se basara el análisis en los parámetros convencionales (deformación en mm a 20.000 pasadas de la rueda metálica). Sin embargo, dado que se ha usado el parámetro Z, la mezcla puede ser analizada puesto que Z es independiente del protocolo de ensayo. La Figura 11 muestra las curvas de desempeño relativo de dicha mezcla. Puede ser demostrado que en promedio, 90 giros en el SGC maximizan el desempeño relativo a fatiga y ahuellamiento de la mezcla asfáltica.

Conclusiones y recomendaciones

Basado en las mezclas analizadas, puede ser concluido que para las condiciones de Texas, el número de giros de diseño en el Compactador Giratorio Superpave (N_{design}) pueden ser reducidos significativamente de manera que se mejore la resistencia al agrietamiento por fatiga de las mezclas asfálticas, sin afectar significativamente la resistencia al ahuellamiento. Es inaceptable que

pavimentos relativamente nuevos (5 a 7 años) presenten signos prematuros de agrietamiento por fatiga.

El hecho que las mezclas diseñadas en Texas tengan excelente resistencia al ahuellamiento pero una resistencia relativamente baja a la fatiga fue confirmado usando la metodología de curvas de confianza presentada anteriormente. A 100 giros, la especificación actual Superpave, la resistencia relativa al ahuellamiento es muy alta (85–95%); sin embargo, la resistencia relativa al agrietamiento por fatiga es típicamente baja (45–75%). La reciente adición del HWTD a los requisitos de diseño para proteger las mezclas contra ahuellamiento y daño por humedad tienden a resaltar este aspecto en las mezclas más secas.

Del promedio del desempeño relativo de las mezclas evaluadas, 75–85 giros en el SGC generalmente optimizan el desempeño de las mezclas. Sin embargo, se recomienda un análisis similar para las distintas mezclas asfálticas de cada región, con el fin de obtener un N_{design} que se adapte adecuadamente a combinaciones específicas de agregado y ligante asfáltico.

Como recomendación, los conceptos de desempeño relativo y percentil deben ser evaluados a mayor profundidad e integrados con información de tráfico

y ambiental para calibrar el método para regiones específicas.

Actualmente, TxDOT está en el proceso de desarrollar una base de datos que contenga los diseños de mezcla e información del proceso constructivo, relacionado con información del desempeño de los pavimentos contenida el Sistema de Administración de Información de Pavimentos (PMIS). La información de dicha base de datos servirá como calibración final y validación del método propuesto.

Estudio de caso Texas: Guías para ajustar N_{design} como función del tráfico y el ambiente

Como ha sido reiterado en el artículo, desde la introducción del método Superpave, gran importancia se ha asignado a la temperatura ambiental, y al tráfico. Por tanto, N_{design} es función de estas variables. Altas temperaturas ambientales requieren mayor número de giros de diseño. Análogamente, mayores volúmenes de tráfico demandan mayor N_{design} .

Basándose en un registro histórico de temperaturas mensuales del estado de Texas, se ha desarrollado una guía general de selección de número de giros de diseño (N_{design}). Esta guía está basada en temperaturas máximas y mínimas en los distintos distritos del estado de Texas. Además, basándose en el estudio aquí presentado, se tomó como nivel de referencia de N_{design} a 85 giros. La figura 12 muestra las recomendaciones para la selección del número de giros de diseño de Texas, basándose en temperatura. Además, en la figura se hacen consideraciones de tránsito.

Bibliografía

1. R.M. Anderson, P.A. Turner, R.L. Peterson, R.B. Mallick, "Relationship of Superpave Gyrotory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior". NCHRP Report 478. Washington DC, 2002.
2. P.B. Blankenship, "Gyrotory Compaction Characteristics: Relation to Service Densities of Asphalt Mixtures", Master's Thesis, University of Kentucky. Kentucky, 1994.
3. E.R. Brown, I.R. Hanson, R.B. Mallick, "An Evaluation of SHRP Gyrotory Compaction of HMA". Paper presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC, 1996.
4. E.R. Brown, R.B. Mallick, "An Initial Evaluation of the N-design Superpave Gyrotory Compactor". Journal Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 67. 1998.
5. E.R. Brown, "Superpave Gyrotory Compaction Guidelines". Research Results Digest, National Cooperative Highway Research Program. Washington DC, 1999.
6. E.R. Brown, M.S. Buchanan, "Verification of the gyrations in the Ndesign Table". National Cooperative Highway Research Program. Washington DC, 2001
7. B.D. Prowell, J.E. Haddock, "Superpave for low volume roads and base mixtures", Journal Association of Asphalt Paving Technologists. 2002.