

Proyecto estructural de pavimentos

Caracterización del módulo dinámico de mezclas asfálticas para el diseño mecanístico-empírico de pavimentos

Ing. Pedro Romero, Ph.D., P.E.
The University of Utah
Ing. Leslie A. Myers, Ph.D., P.E.
U.S. Federal Highway Administration

Resumen Técnico

El nuevo método de diseño estructural de pavimentos basado en principios mecanístico-empíricos fue recientemente desarrollado en los Estados Unidos gracias al proyecto de NCHRP 1-37A (*Development of Mechanistic-Empirical Pavement Design*). Este método requiere nuevos ensayos para la caracterización de mezclas tales como el módulo dinámico (*dynamic modulus*), la tensión indirecta (*indirect tension*); al igual que información específica de tráfico y clima. Debido a lo nuevo de este método, los nuevos equipos requeridos para los ensayos, y la falta de familiaridad por parte de los usuarios, este método no ha sido oficialmente adoptado. A la fecha, muy pocos pavimentos han sido diseñados con este nuevo método.

Este estudio documenta uno de los primeros esfuerzos en incorporar los ensayos requeridos para el diseño estructural de pavimentos utilizando el nuevo programa mecanístico-empírico.

El módulo dinámico de dos mezclas asfálticas de 19 milímetros fue determinado utilizando los ensayos propuestos por el proyecto NCHRP 465: Ensayos Simples para Mezclas Asfálticas (*Simple Performance Test for Mix Design*), o SPT. Una de las mezclas fue preparada con asfalto PG 64-28 sin modificación; la otra mezcla fue preparada con asfalto PG 58-34 modificado con 25% de TLA (Asfalto del Lago Trinidad). Usando los resultados del SPT, y las propiedades volumétricas de Superpave, el método de diseño estructural mecanístico-empírico fue utilizado para predecir el rendimiento del pavimento basado en las condiciones típicas del estado de Utah por un periodo de 20 años.

Utilizando los resultados obtenidos en este estudio, los beneficios económicos de modificar el asfalto fueron evaluados de acuerdo a la duración de los pavimentos dado cierto tráfico y clima. Esta duración está basada en daños específicos tales como deformación permanente

(*rutting*), agrietamiento por temperatura (*thermal cracking*), etc. Con estos nuevos métodos, las agencias encargadas de la construcción de carreteras pueden fácilmente determinar si el costo de modificar el asfalto es justificado basado en el rendimiento específico del pavimento. La adopción del nuevo sistema de diseño mecanístico-empírico es recomendada.

1. Introducción

El diseño estructural de pavimentos basado en conceptos mecanístico-empíricos es una idea que nació hace más de 50 años [1, 2]. Sin embargo, la aplicación de estos conceptos tuvo que esperar hasta el desarrollo de computadoras personales modernas. Recientemente, un proyecto de investigación para el desarrollo de un método de diseño estructural de pavimentos fue terminado en los Estados Unidos bajo el auspicio del Programa Nacional de Investigación de Carreteras (NCHRP en inglés). Este proyecto, titulado NCHRP 1-37A: Desarrollo de Diseños Mecanístico-Empíricos de Pavimentos (*Development of Mechanistic-Empirical Pavement Design*), requiere nuevos ensayos para la caracterización de mezclas tales como el módulo dinámico (*dynamic modulus*), la tensión indirecta (*indirect tension*); al igual que información específica de tráfico y clima. Debido a lo nuevo de este método, los nuevos equipos requeridos para los ensayos, y la falta de familiaridad por parte de los usuarios, este método no ha sido oficialmente adoptado. A la fecha, muy pocos pavimentos se han diseñado con este nuevo método. Sin embargo, ciertas comparaciones son posibles utilizando la información existente.

Este estudio documenta uno de los primeros esfuerzos en incorporar los ensayos requeridos en el diseño estructural de pavimentos utilizando el nuevo programa mecanístico-empírico. Los resultados obtenidos predicen el rendimiento del pavimento basado en las condiciones típicas del estado de Utah por un periodo de 20 años.

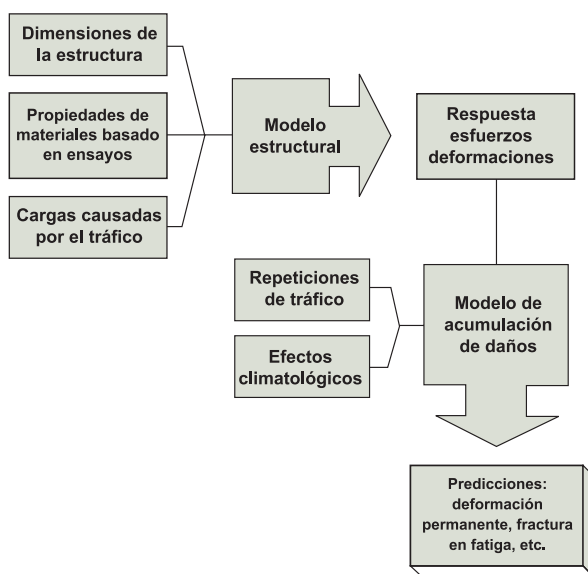
Figura 1 Ejemplo del ahondamiento en las carreteras



Figura 2 Ejemplo de la fractura por fatiga en las carreteras



Figura 3 Esquema del diseño mecanístico-empírico de pavimentos



2. Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos

El diseño mecanístico-empírico de pavimentos está basado en el concepto de que el motivo por el cual el pavimento falla, o deja de cumplir su propósito, es la acumulación de daños causados por los esfuerzos y deformaciones [3]. Para predecir el rendimiento de la carretera es necesario calcular los esfuerzos y deformaciones causadas por las cargas del tráfico utilizando algún modelo estructural. Los esfuerzos y deformaciones son incorporados en un segundo modelo que predice la acumulación de daños tales como la deformación permanente (Figura 1) y la fractura en fatiga (Figura 2) de acuerdo al número de repeticiones [3]. El primer modelo estructural está basado en la mecánica de materiales así que corresponde a la parte mecánica del diseño. El segundo modelo está basado en observaciones y relaciones estadísticas así que corresponde a la parte empírica del diseño. La relación entre estos modelos está representada en la Figura 3.

3. Caracterización de Materiales

La utilización del modelo estructural requiere, entre otras cosas, la caracterización de los materiales. Esto se refiere, en otras palabras, a la relación entre las cargas y la deformación [4]. Durante la última década, la comunidad relacionada con materiales asfálticos se ha esforzado en el desarrollo de nuevos métodos para caracterizar mezclas asfálticas. Por ejemplo, el uso de Superpave para el diseño de mezclas ha sido adoptado por muchas agencias no sólo en los Estados Unidos sino también en varios países del mundo [5]. Desafortunadamente, los ensayos mecánicos para mezclas sugeridos por el sistema Superpave no fueron bien recibidos. Para remediar esta situación, un nuevo proyecto fue desarrollado bajo el auspicio de NCHRP para desarrollar un ensayo capaz de caracterizar las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas. El reporte de NCHRP 465: Ensayos Simples para Mezclas Asfálticas, SPT en inglés (*Simple Performance Test*) recomienda la utilización del módulo dinámico para caracterizar el material asfáltico [6]. Una foto del equipo utilizado para este ensayo se presenta en la Figura 4.

4. Módulo Dinámico y SPT

Originalmente, debido a las limitaciones de los modelos existentes, la relación entre el esfuerzo y la deformación fue representada con el módulo elástico. Sin embargo, debido a la naturaleza visco-elástica de los materiales

asfálticos, el módulo dinámico es considerado más apropiado [7].

Utilizando el SPT, el módulo dinámico es obtenido en especímenes cilíndricos de 150 mm de altura y 100 mm de diámetro. Los especímenes son preparados utilizando el compactador giratorio de Superpave, SGC (*Superpave Gyrotory Compactor*, en inglés) y luego son cortados utilizando una sierra de albañilería. Los vacíos del espécimen deben ser similares a los vacíos requeridos durante la construcción del pavimento (aproximadamente 7%).

El espécimen cilíndrico de asfalto es introducido en una cámara donde la temperatura es controlada (Figura 4). Antes de empezar a coleccionar datos, 200 ciclos de carga a 25 Hz son aplicados al espécimen. La magnitud de la carga es controlada para asegurarse que la relación entre el esfuerzo y la deformación se mantenga dentro del límite lineal del espécimen. El módulo dinámico es obtenido en frecuencias de 0.1, 0.5, 1, 5, 10, y 25 Hz. Para obtener una relación entre el módulo dinámico y la temperatura, es necesario repetir el ensayo en dos o más temperaturas usando el mismo espécimen. Por lo general, las temperaturas son seleccionadas de acuerdo a la temperatura del sitio donde se desea construir el pavimento nuevo. Las temperaturas recomendadas por NCHRP son -10, 4.4, 21.1, 37.8, y 54.4 °C.

El esfuerzo, σ_0 , se define de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\sigma_0 = \frac{|P_0|}{A} \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde $|P_0|$ es la máxima carga promedio durante los últimos seis ciclos y A es el área del espécimen cilíndrico.

La deformación por unidad, ϵ_0 , se define de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\epsilon_0 = \frac{|\Delta|}{L} \quad \text{Fórmula 2}$$

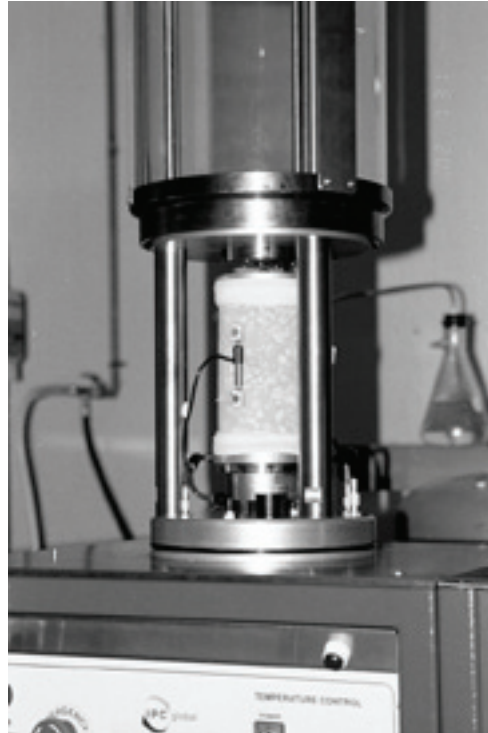
Donde $|\Delta|$ es la máxima deformación promedio durante los últimos seis ciclos y L es la distancia entre medidas de deformación.

El módulo dinámico, $|E^*|$, (mas estrictamente la magnitud) se define como:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad \text{Fórmula 3}$$

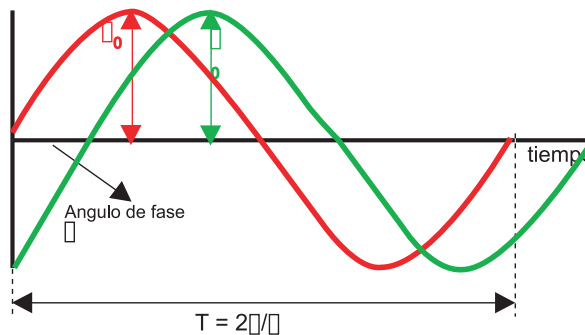
Foto del Equipo de Ensayo Simple, SPT, con espécimen e instrumentos de medición. La cámara de temperatura ha sido levantada por claridad

Figura 4



Representación del módulo dinámico. Durante el ensayo, la deformación es controlada por la máquina y el esfuerzo es medido (el ángulo de fase es exagerado para mayor claridad)

Figura 5



Como todo material visco elástico, el asfalto exhibe una diferencia entre el tiempo del máximo esfuerzo y el tiempo entre la máxima deformación. Esta diferencia en el tiempo se llama ángulo de fase, δ , y es usado para caracterizar el asfalto líquido (por ejemplo utilizando el parámetro $G^*/\sin\delta$). En las mezclas asfálticas este valor no es utilizado. Estas relaciones están representadas gráficamente en la Figura 5.

Lista 1

Lista de propiedades volumétricas de las mezclas basadas en el diseño Superpave con 100 revoluciones

	Mezcla Número 1	Mezcla Número 2
Vacíos en el Agregado Mineral (VMA), %	14.10	14.50
Densidad Máxima de la Mezcla, Kg/m ³	2 588	2 372
Densidad Promedio del Agregado, Kg/m ³	2 787	2 516
Cantidad de Asfalto Líquido, % del total de la mezcla	4.60	5.50
Manufactura y Clasificación del Asfalto Líquido	Pioneer PG 64 - 28	Koch PG 58 - 34 con 25% TLA

Ciertas mezclas de muchos vacíos (por ejemplo SMA) requieren confinamiento durante el ensayo. Para esos casos, el espécimen es sellado con una membrana exterior de látex donde una presión uniforme, similar a los ensayos geotécnicos triaxiales, es aplicada dentro de la cámara. Este es el caso descrito en la Figura 4.

5. Materiales Utilizados

Para este proyecto dos mezclas asfálticas fueron evaluadas. Ambas mezclas cumplen con los requisitos para el estado de Utah de mezclas típicas de superficie rodante de 19 mm. La diferencia entre las dos mezclas consiste en el ligante asfáltico utilizado. La mezcla número 1 es una mezcla típica que utiliza asfalto PG-64-28 sin modificar. La mezcla número 2 es considerada una mezcla experimental pues utiliza asfalto PG-58-34 modificado con 25% (por peso) de asfalto del Lago Trinidad (TLA). El asfalto del Lago Trinidad es un producto natural que ha tratado de ser introducido en los Estados Unidos. El hecho de que existe muy poca experiencia con este producto hace que el método mecanístico-empírico sea ideal para analizar los posibles beneficios de modificar el asfalto de acuerdo con el rendimiento de los pavimentos.

Ambas mezclas fueron diseñadas utilizando los métodos de Superpave y girados por 100 revoluciones. Las propiedades volumétricas obtenidas de ambas mezclas están resumidas en la Lista 1. El análisis granulométrico está representado en la Figura 6.

6. Resultados

Los resultados del módulo dinámico de las dos mezclas evaluadas están representados en la Figuras 7 y 8. La mezcla número 1 tiene un módulo dinámico mayor en todas las frecuencias y a todas las temperaturas. Estos valores pueden ser utilizados para evaluar el rendimiento del pavimento construido con estas mezclas.

Conociendo la velocidad en la carretera a ser diseñada, la frecuencia que corresponde a la duración de la carga del vehículo puede ser seleccionada para el análisis mecanístico. Esta frecuencia depende no sólo de la velocidad del vehículo sino también de la presión en las llantas y de la estructura del pavimento. Como la estructura del pavimento no es siempre conocida al inicio del análisis, las siguientes formulas han sido recomendadas [8]:

Figura 6 *Análisis granulométrico de las mezclas utilizadas en el proyecto*

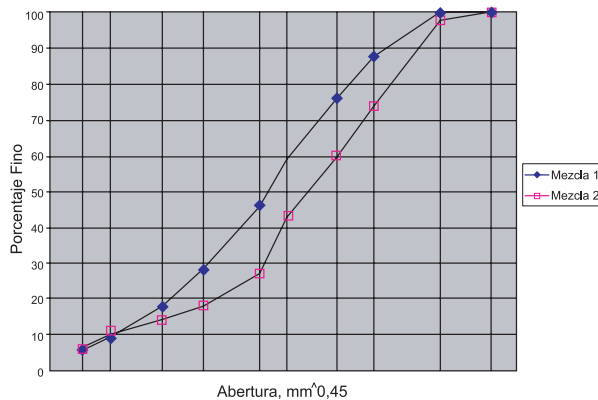
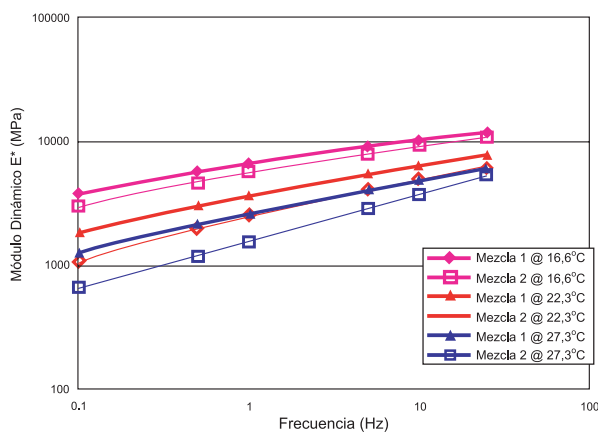


Figura 7 *Módulo dinámico a temperaturas correspondientes a la fractura en fatiga*



$$d = \frac{12a}{s} \quad \text{Fórmula 4}$$

$$f = \frac{2}{a} \quad \text{Fórmula 5}$$

Donde, d es la duración de la carga, a es el radio de la proyección de la llanta, s es la velocidad, y f es la frecuencia. Si la velocidad del vehículo es 55 km/h, y el radio de la proyección de la llanta es alrededor de 0.15 metros, la frecuencia de 10 Hz es apropiada para hacer comparaciones entre las dos mezclas. (Shell [9] recomienda una frecuencia de 8 Hz correspondiente a una velocidad de 65 km/h). Si se sospecha que la velocidad promedio del pavimento es menor (por ejemplo en una estación de peaje), una frecuencia más baja puede ser analizada.

La Lista 2 muestra el módulo dinámico de ambas mezclas basadas en una frecuencia de 10 Hz.

7. Posible Rendimiento

Utilizando los resultados del ensayo del SPT, es posible hacer predicciones relativas acerca del rendimiento del pavimento correspondiente a ambas mezclas. Basados en la lógica establecida de que entre más alto sea el módulo de la mezcla más baja es la deformación permanente, se podría decir que la mezcla número 1 es más resistente a la deformación permanente que la mezcla número 2. Avanzando el análisis, se podría aplicar el modelo del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute) para predecir el rendimiento de un pavimento dado [9].

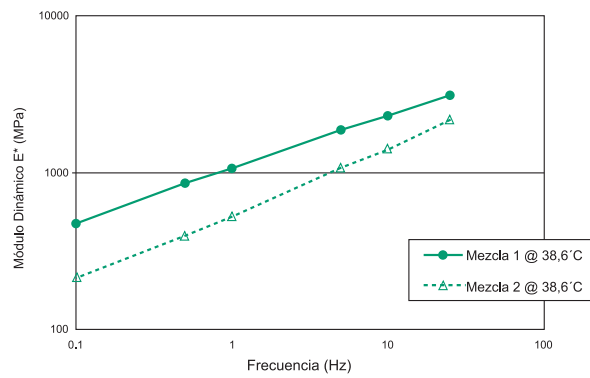
$$N_{\text{ejes}} = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4.477} \quad \text{Fórmula 6}$$

Donde N_{ejes} es el número de repeticiones, expresado generalmente como cargas equivalentes (18000 lbs por eje), para una deformación permanente de 12 mm (0.5 pulgadas) y ϵ_c es la deformación por unidad causada por las cargas del vehículo. Substituyendo la Fórmula 3 dentro de la Fórmula 6 y asumiendo que el esfuerzo causado por una carga equivalente es igual en las dos mezclas llegamos a la siguiente fórmula que establece una comparación entre ambas mezclas.

$$\frac{N_{\text{mezcla1}}}{N_{\text{mezcla2}}} = \left(\frac{E_{\text{mezcla1}}}{E_{\text{mezcla2}}} \right)^{4.477} \quad \text{Fórmula 7}$$

Módulo dinámico a temperatura correspondiente al ahondamiento

Figura 5



A 38.6 °C, la fórmula 7 predice que la mezcla número 1 puede soportar 880 más repeticiones que la mezcla número 2.

Igualmente, se puede predecir el rendimiento basado en la fractura en fatiga utilizando fórmulas similares. Este análisis mecánico-empírico puede ser utilizado para seleccionar la mezcla deseada. Sin embargo, estas predicciones sufren de varias desventajas. Entre las desventajas tenemos:

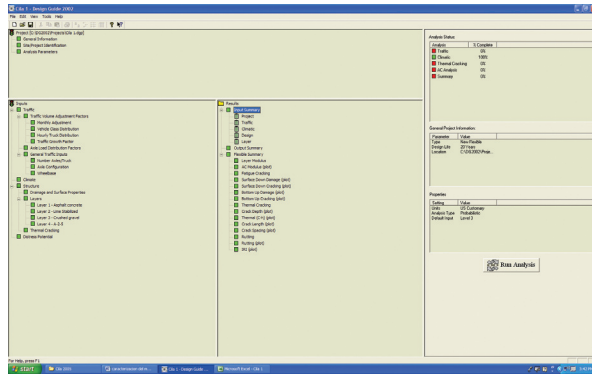
- Las predicciones (Fórmula 6) están basadas en materiales que probablemente no son representativos de los materiales usados hoy en día.
- Las predicciones están basadas en una sola temperatura. No incluyen la fluctuación diaria ni los cambios de temperatura debido a los cambios del clima.
- Las predicciones son relativas, no incluyen aspectos económicos como la relación entre las cargas y la estructura.
- Las predicciones no incluyen la interrelación entre la deformación permanente y la fractura en fatiga y el efecto al usuario medido en parámetros de rugosidad como el IRI.

Módulo dinámico de ambas mezclas en una frecuencia de 10 Hz

Lista 2

Temperatura °C	Mezcla 1	Mezcla 2
	Módulo Dinámico MPa	
16.6	10 389	9 264
22.3	6 424	5 076
27.3	4 892	3 684
38.6	2 308	1 423

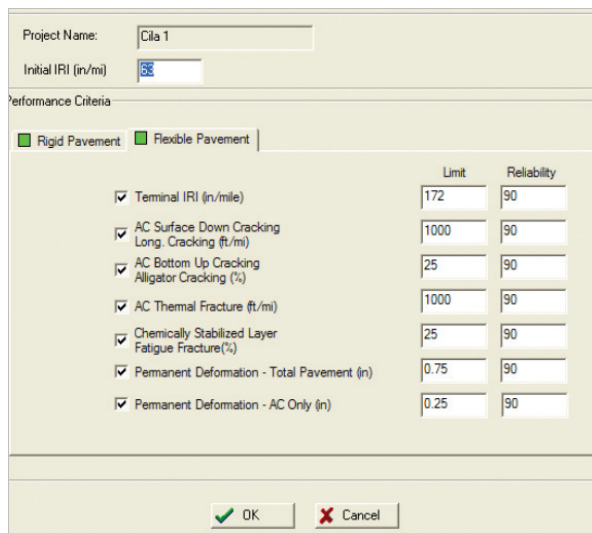
Figura 9 Pantalla principal del Programa Mecánico Empírico 2002



que existe cierta información que no es específica al proyecto (genérica) que no ha sido evaluada, y verde que la información ha sido obtenida. Cuando todos los menús están verdes, el programa puede correr.

La parte superior del menú principal contiene información general del proyecto. Esta información incluye los parámetros de análisis. Estos parámetros de análisis incluyen el IRI, el agrietamiento en la superficie, la fractura de fatiga, la fractura termal, la fractura en la base, la deformación total, y la deformación permanente en la superficie asfáltica. Como se muestra en la Figura 10, el usuario puede decidir los valores aceptables para cada situación.

Figura 10 Parámetros de análisis para el diseño mecánico empírico



El menú del centro requiere información acerca del tráfico. Esta información incluye; el tráfico total, información mensual de la distribución del tráfico por categorías, distribución de cada categoría de vehículo, distribución en cada hora de las categorías de vehículos de carga, el factor anual de crecimiento, el tipo, peso, y configuración de cada eje; incluyendo la distancia entre llantas y la presión de inflado.

La parte inferior del menú requiere la información acerca de los materiales. El análisis ofrece la opción de tres niveles. En el nivel 1, requiere los resultados del módulo dinámico con un mínimo de tres temperaturas y 4 frecuencias, grado del asfalto líquido, los resultados del ensayo de tensión indirecta a bajas temperaturas, y las propiedades volumétricas. El nivel 2, requiere ensayos a una sola temperatura y utiliza relaciones establecidas entre diferentes parámetros. El nivel 3 sólo requiere información volumétrica. El usuario debe decidir si el costo relacionado con los ensayos se justifica para cada tipo de proyecto.

8. Diseño Mecánico-Empírico de NCHRP 1-37A

Algunas de las desventajas pueden ser superadas utilizando el programa mecánico empírico desarrollado por NCHRP 1-37A. Este programa es comúnmente llamado el Método de Diseño 2002; sin embargo, no fue sino hasta el año 2004 que fue finalizado. Durante el año 2005, el uso de este programa se ha limitado a ciertos proyectos experimentales. Se espera que el método sea adoptado oficialmente en el año 2006 ó 2007.

La pantalla principal del programa está mostrada en la Figura 9. La pantalla principal tiene una serie de menús codificados con tres colores; rojo indica que se necesita información específica para correr el programa, amarillo

El programa tarda aproximadamente 30 minutos en una computadora moderna. Al final del programa, los resultados son presentados en tablas y gráficos utilizando MS Excel. Un ejemplo de esta información se presenta en la Figura 12.

9. Conclusiones

El diseño de pavimentos utilizando los nuevos conceptos mecánicos-empíricos propuesto por NCHRP 1-37A requiere un nuevo esfuerzo por parte de las agencias encargadas de caminos. El personal encargado del diseño y mantenimiento de pavimentos debe decidir si la inversión requerida para utilizar los nuevos ensayos y programas es justificada dentro de su jurisdicción.

Como se ha demostrado en este estudio, utilizando los resultados de estos nuevos métodos, los diseños pueden ser comparados y los beneficios de los nuevos materiales como el asfalto modificado pueden ser evaluados de acuerdo a la duración de los pavimentos dado tráfico y clima específico. Esta duración está basada en daños específicos tales como deformación permanente, agrietamiento por temperatura, utilizando estos daños, el ciclo económico puede ser mejor incorporado en el diseño. En las mezclas discutidas en este documento, el uso de la mezcla número 2 con asfalto modificado no se justifica.

Finalmente, los autores recomiendan la adopción del nuevo sistema de diseño mecanístico-empírico.

Referencias bibliográficas

(1) Barber, E.S.: "Application of Triaxial Compression Tests Results to the Calculation of Flexible Pavement Thickness." *Proceedings Highway Research Board*, 1946. Pp 26-39

(2) Brown, S.F., Pell, P.S., and Stock, A.F.: "The Application of Simplified Fundamental Design Procedures for Flexible Pavements." *Proceedings 4th International Conference on the Structural Design of Pavements, Vol 1*. 1977 Pp 321-341

(3) Huang, Y.H.: *Pavement Design and Analysis*. Second Edition. Pearson Prentice Hall, NJ. 2002.

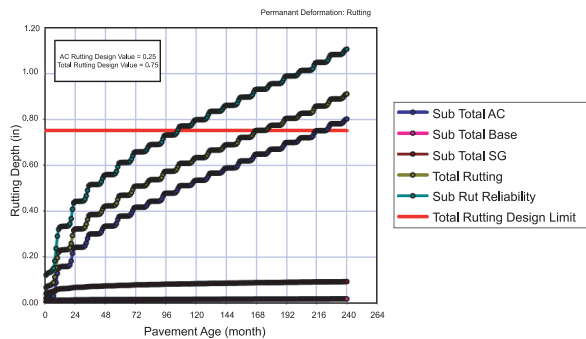
(4) Burmister, D.M.: "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways." *Proceedings Highway Research Board* Vol 23. 1943. Pp126-144

(5) FHWA Superpave Implementation Report

(6) Witczak, M.W., Kaloush, K., Pellinen, T, El Basyoun, A., and Von Quintus, H.: *NCHRP Report 465: Simple Performance Test for Mix Design*. 2002

(7) Monismith, C. L. Sousa, J., and Lysmer, J: "Modern Pavement Design Technology Including Dynamic Loading Conditions." *Vehicle Pavement Interaction, SP-765*. Society of Automotive Engineers. 1988 Pp 33-52

Predicciones de la deformación permanente en función del tiempo en el pavimento construido con la mezcla número 1



(8) Barksdale, R.G.: "Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing." *Highway Research Record* 345 1971 Pp 32-44

(9) Shell, *Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*. Shell International Petroleum, London. 1978

(10) The Asphalt Institute: *Thickness Design – Asphalt Pavements for Highway and Streets*. Manual Series No. 1 1981