



REPORTE DE INVESTIGACIÓN LM- PI - PV- IN- 17 C – 02

Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente

INFORME PARCIAL N° 2

FASE 1

Investigador principal

Ing. Guillermo Loría

Investigadores asociados

Ing. Mario Arce

Ing. Fabián Elizondo

Ing. José Pablo Aguiar

Diciembre 2004

Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente

1. INTRODUCCIÓN

Como parte fundamental en la caracterización de las mezclas asfálticas se encuentran los ensayos de fatiga, los cuales se relacionan directamente con la capacidad de soportar carga a largo plazo de una mezcla asfáltica, característica fundamental para el diseño estructural de un pavimento y para poder efectuar un adecuado análisis financiero del mismo.

Dentro de la línea de investigación que está siguiendo el LANAMME, para calibrar los métodos de diseño estructural es básico entender el desempeño a fatiga de la mezcla asfáltica.

Para esto, es necesaria la ejecución de "ensayos de desempeño simple", los cuales están definidos por el NCHRP 465 así: **"Son aquellos métodos de ensayo que con precisión y confiabilidad miden la respuesta de una característica o parámetro de la mezcla que está altamente correlacionada con la ocurrencia de un daño al pavimento (por ejemplo agrietamiento o ahuellamiento) en un rango de tráfico y condiciones de clima"**.

Dada esta definición, no es necesario que el ensayo prediga por completo el efecto o desempeño histórico de la mezcla, pero los resultados pueden permitir la determinación de la habilidad de la mezcla para resistir la fractura o la deformación permanente ante diversas condiciones definidas.

Como objetivo fundamental dentro del estudio se pretende estudiar el comportamiento contra fatiga de capas asfálticas de capa delgada. El método que se utilizará será el de vigas a flexotracción, que se explicará adelante.

En esta línea se estudiará la influencia que tienen la granulometría, el tipo de asfalto, el contenido de asfalto efectivo, la adición de modificantes y el contenido de vacíos sobre la resistencia a la fatiga de capas delgadas de mezcla asfáltica en caliente.

Un resultado directo de la investigación, será obtener las curvas maestras de nivel de carga versus deformación unitaria para cada caso estudiado. A partir de este resultado, se efectuará la modelación estructural de diversas capas de rodamiento en sitio mediante el uso de las curvas maestras determinadas.

Finalmente, se efectuarán sondeos en sitio para determinar las variables de campo que pueden afectar la resistencia a fatiga de una capa delgada de mezcla asfáltica.

1.1 Objetivos Generales

- Determinar, con base en el experimento planteado, leyes de fatiga de mezcla asfáltica en caliente, utilizables en el diseño estructural de pavimentos, aplicables a las condiciones de los materiales propios de Costa Rica.
- Determinar rangos de especificación para el desempeño por fatiga de mezclas asfálticas de tipo denso.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar el efecto, sobre la resistencia a fatiga de mezclas asfálticas de tipo denso, de los siguientes factores:
 - Grado de desempeño del ligante asfáltico
 - Envejecimiento del ligante asfáltico, producto del proceso de producción, transporte y colocación de la mezcla asfáltica en caliente.

- Módulo resiliente a la tensión diametral de la mezcla asfáltica
- Módulo resiliente dinámico de la mezcla asfáltica
- Efecto de la temperatura
- Determinar cual es el mejor método de condicionamiento de los especímenes de ensayo, previo a la realización de este (por ejemplo, 5 días a 85 °C, ciclos de inmersión, 2 horas a la temperatura de ensayo, entre otros)

1.3 Esquema metodológico propuesto

1.3.1 Fase 1: Familiarización con el ensayo (enero – junio 2004)

Inicialmente, se ha procedido a analizar viguetas de sitio, debido a que en el laboratorio hasta hace pocos meses se contó con el compactador de vigas. Los primeros ensayos se realizaron a temperatura ambiente.

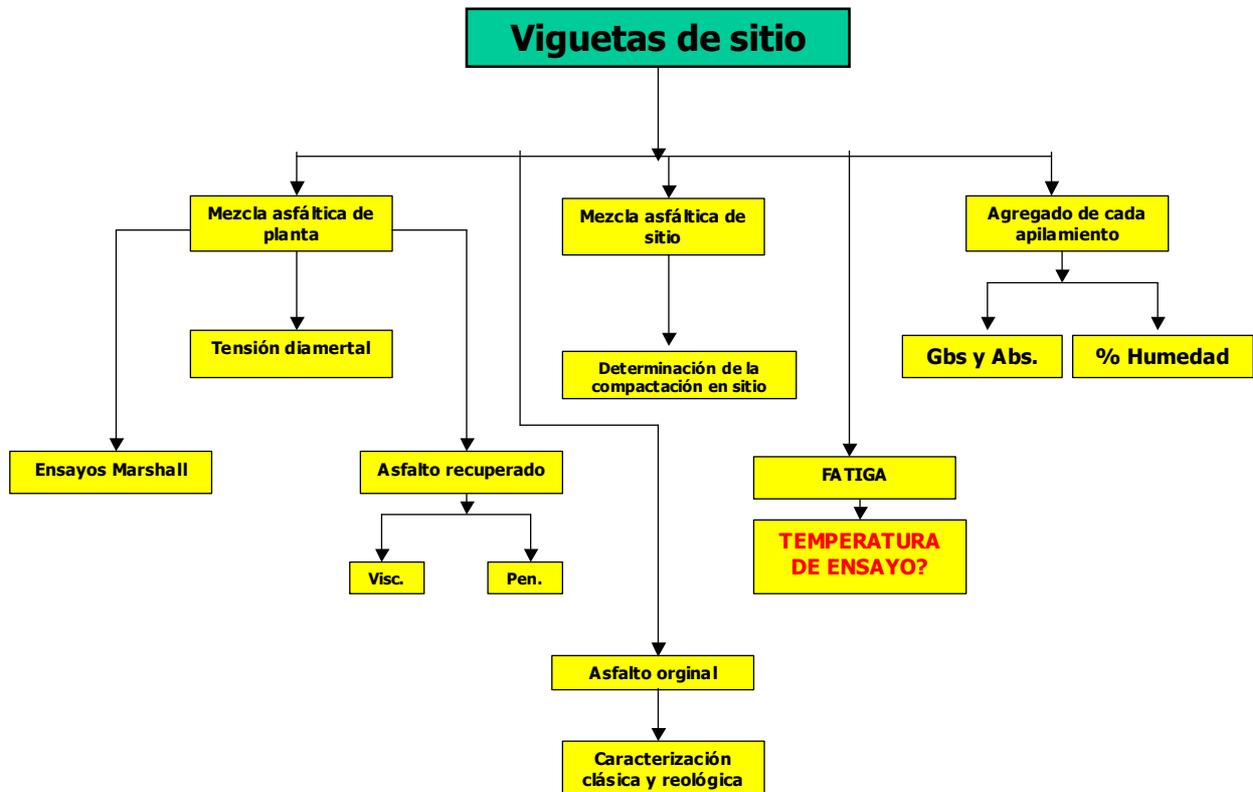


Fig N° 1: Esquema experimental original

Como se mostró en el esquema experimental, se realizarán los siguientes ensayos:

- Ensayo de resistencia a la flexotracción de vigas con deformación unitaria constante (para capas delgadas)
- Ensayo de tensión diametral retenida para cada mezcla
- Ensayos en "Pista de Laboratorio de Georgia".
- Dichas variables por analizar son las siguientes: porcentaje de vacíos de sitio, PG del asfalto recuperado, viscosidad del asfalto recuperado, densidad máxima teórica y gravedad específica bruta.

En esta etapa se podrían determinar correlaciones entre los distintos parámetros.

1.3.2 Fase 2: Ensayos de caracterización por fatiga con todas las variables de ensayo controladas: Temperatura y mezclas moldeadas en el compactador de vigas

En este caso, se puede emplear el mismo esquema experimental anterior, solo que empleando mezclas de planta compactadas en el compactador de vigas, lo cual implicaría, el control en laboratorio, del contenido de vacíos en el laboratorio.

Adicionalmente, la reciente adquisición de la nueva cámara térmica, facilita al ejecución de condicionamientos y control de temperatura durante el ensayo.

1.3.3 UBICACIÓN DEL AVANCE DEL PROYECTO

A la fecha se han analizado cuatro muestras completamente (ejecutando el ensayo con tres deformaciones unitarias controladas), a temperatura ambiente.

1.3.4 MODIFICACIÓN AL ESQUEMA EXPERIMENTAL

De la experiencia determinada por la etapa experimental inicial, se ha determinado en la siguiente etapa del proyecto, trabajar con mezclas tomadas de plantas asfálticas y con especímenes extraídos de sitio (bloques). Sin embargo, se dará prioridad, a las muestras moldeadas con el compactador de vigas del laboratorio, dada la gran variabilidad y escaso control que se posee respecto de los procesos de compactación en sitio de las mezclas asfálticas colocadas y compactadas en el país.

Las mezclas tomadas de planta serán completamente analizadas a nivel de laboratorio. También serán objeto de un seguimiento en cuanto al procedimiento de compactación, propiedades de la mezcla compactada y el deterioro que ocurre con el tiempo. Estas etapas se indican a continuación.

En esta etapa el ensayo de fatiga deberá realizarse a temperatura controlada, de 20 °C. Para la mezcla compactada en el compactador de vigas, se tiene el siguiente análisis:

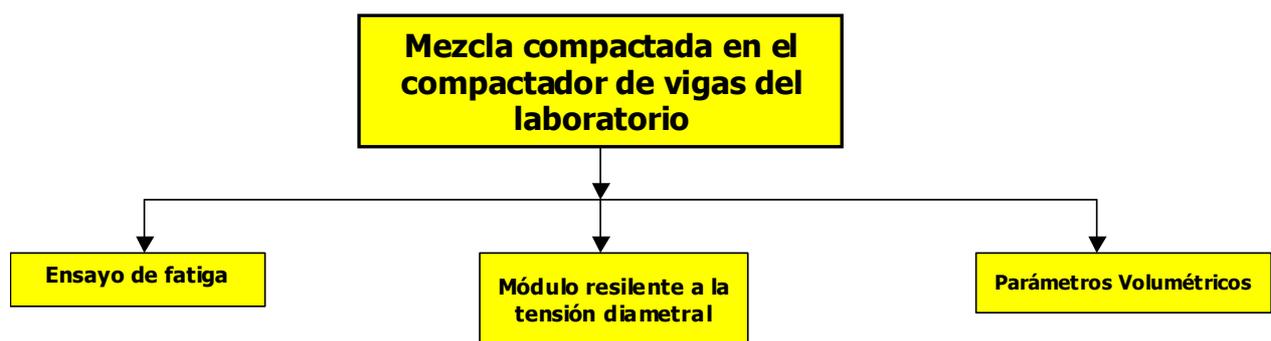


Fig Nº 2: Esquema experimental, mezcla compactada en el compactador de vigas

Para la mezcla compactada mediante el procedimiento Marshall y SUPERPAVE, asfalto y agregados, se seguirán los siguientes ensayos:

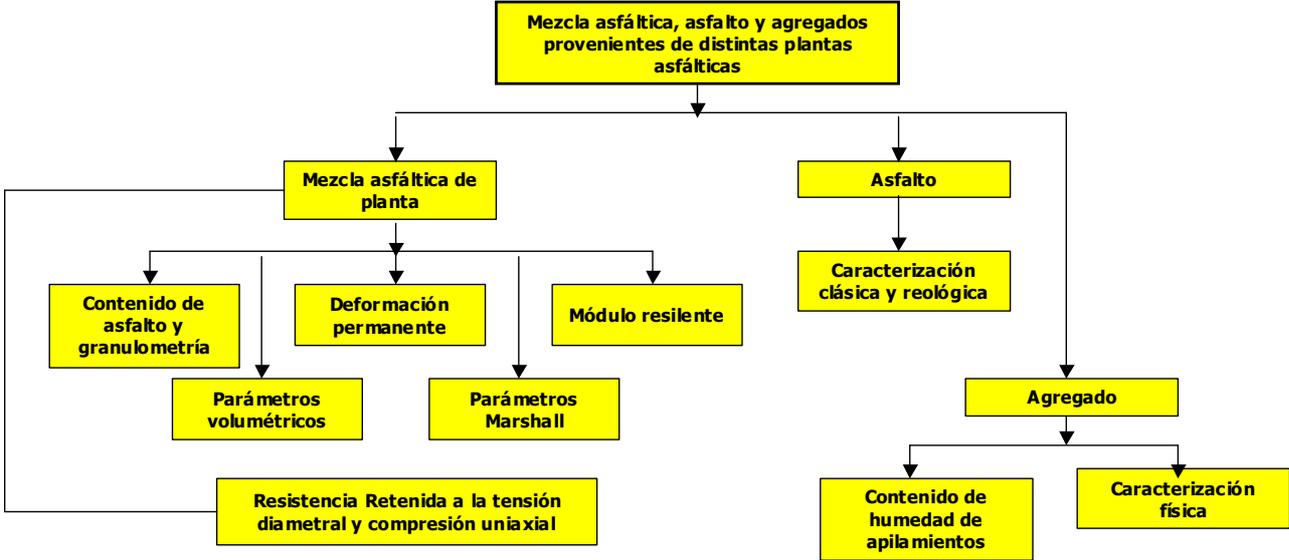


Fig N° 3: Esquema experimental. Caracterización de la materia prima

2. Marco teórico

La resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica en caliente es de suma importancia, en cuanto a la vida útil de esta, pues uno de las principales modos de falla de los pavimentos asfálticos es el agrietamiento debido a la fatiga, o también conocido como agrietamiento por fatiga. Por lo tanto, una predicción precisa de las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica es de gran utilidad en la predicción de la vida del pavimento.

El agrietamiento por fatiga, originado en la estructura de la mezcla asfáltica, ha sido reconocido como una de las formas de falla más costosas de corregir durante el proceso de rehabilitación de la estructura del pavimento. Si la falla se extiende ampliamente, la rehabilitación podría llevar a remover totalmente la capa asfáltica.

La falla por fatiga ocurre cuando las cargas repetidas de los vehículos generan esfuerzos de tensión de suficiente magnitud para iniciar el agrietamiento que, eventualmente, se propaga hasta la superficie.

Algunos factores que contribuyen a esta forma de falla son una inadecuada estructura del pavimento, materiales de baja calidad en las capas inferiores o una mezcla asfáltica con propiedades inadecuadas.

Actualmente, los pavimentos asfálticos que presentan un buen desempeño en el largo plazo, tienen características que previenen el agrietamiento por fatiga. Primeramente, tienen el suficiente espesor de mezcla asfáltica para limitar los esfuerzos a tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica de manera que no inicie el agrietamiento. También tienen sólidas fundaciones que soporten la estructura. Además, la mezcla asfáltica presenta la suficiente flexibilidad para contrarrestar el inicio del agrietamiento, a bajos niveles de esfuerzo a tensión.

2.1 Elementos que afectan la vida de fatiga de la mezcla asfáltica

La determinación de los efectos del ligante asfáltico y el contenido de vacíos de aire en los ensayos de fatiga y resistencia a la flexo-tracción en el laboratorio son un paso inicial necesario en la determinación de sus efectos en el desempeño del pavimento asfáltico en sitio.

Sin embargo, como las propiedades volumétricas afectan significativamente la resistencia a la flexo-tracción (y por tanto, los esfuerzos inducidos al pavimento como resultado de las cargas de tránsito) y la vida a fatiga, la relación entre el desempeño a fatiga en experimentos de laboratorio no es necesariamente directa al desempeño en campo. Por tanto, es necesario combinar las simulaciones analíticas de las deformaciones en sitio con los modelos de fatiga generados en el laboratorio para predecir el desempeño en sitio.

2.1.1 Ligante asfáltico

Incrementos en el contenido de ligante asfáltico, determinan incrementos en la película de ligante que recubre las partículas de agregado y un incremento en la proporción de asfalto en la sección normal a la dirección de los esfuerzos a tensión. Dado que los esfuerzos a flexo-tracción se concentran en el ligante asfáltico (ya que las partículas de agregado son mucho más rígidas), películas más gruesas significan menores esfuerzos al ligante.

2.1.2 Contenido de vacíos

Un contenido de vacíos de aire bajo tiene al menos dos efectos que contribuyen a una mayor vida a fatiga. Primero, puesto que el aire transmite poco o ningún esfuerzo, si se reemplaza por ligante asfáltico o agregado, se reduce el nivel de esfuerzo en dichos componentes. Segundo, un contenido de vacíos de aire bajo genera una estructura ligante-agregado más homogénea, lo que resulta en menor concentración de esfuerzos en el interfase sólido-aire.

2.1.3 Vacíos llenos con asfalto

Se ha encontrado que una porosidad reducida incrementa la rigidez y la resistencia de la mezcla asfáltica. Esto generalmente se ha relacionado con los vacíos llenos de asfalto (VFA).

2.1.4 Película de asfalto entre agregados

Adicionalmente, la combinación del incremento en el contenido de ligante asfáltico y la reducción consecuente en los vacíos de aire, transmite los esfuerzos de tensión a través del sólido, en concentraciones reducidas debido a los vacíos limitados y donde las partículas de agregado están en contacto directo. Las microgrietas que empiezan a formarse bajo cargas repetitivas de carga crecen más lentamente y requieren de mayor tiempo para interconectarse debido al reducido número y contenido de vacíos de aire, que concentran esfuerzos y eventualmente permiten que las grietas se extiendan de un lado a otro.

2.2 Método de ensayo a escala de laboratorio

La forma de carga, generalmente controlada por esfuerzo o por deformación para los ensayos de laboratorio, es además uno de los principales factores que afectan la respuesta a la fatiga. El contenido de vacíos de aire y la temperatura, que tienen un efecto sobre la rigidez de la mezcla, podrían tener una influencia sobre la fatiga mayor que cualquiera de los otros factores. Además, como se mencionó, muchas propiedades de la mezcla, el tipo de carga y los factores ambientales afectan el desempeño a fatiga y deben de considerarse en el desarrollo de los protocolos de ensayo y en la determinación de las propiedades del ligante y la mezcla asfáltica pues son esenciales para la resistencia a la fatiga de los pavimentos.

Un enfoque más reciente, consiste en obtener mezclas asfálticas infinitamente resistentes a la fatiga. Estos se conocen como pavimentos perpetuos, y se logran buscando la forma de reducir los esfuerzos a los que está sometida la mezcla asfáltica en las fibras donde se inicia el agrietamiento.

Una de las formas típicas de estimar las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica colocada en sitio es el ensayo a flexo-tracción. El ensayo a flexo-tracción determina la vida a fatiga de una pequeña viga (380 mm de largo x 50 mm de espesor x 63 mm de ancho) sometiéndola a repetidos esfuerzos de flexo-tracción hasta alcanzar la falla. El espécimen de muestra es extraído de mezcla asfáltica producida en el laboratorio o compactada en campo. Los resultados generalmente se grafican para mostrar los ciclos a la falla vs. esfuerzo o deformación aplicada.

Finalmente, y en términos generales, se buscaría determinar las leyes de fatiga para la mezcla asfáltica, con lo que se puede encontrar las deformaciones, esfuerzos y deflexiones admisibles de la mezcla.

El ensayo estándar para determinar la resistencia ante la fatiga a escala de laboratorio está definido por:

AASHTO TP 8: Determinación de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica compactada en caliente sometida a flexo-tracción.

2.2.1 Diagrama de modelo y de cortante experimental

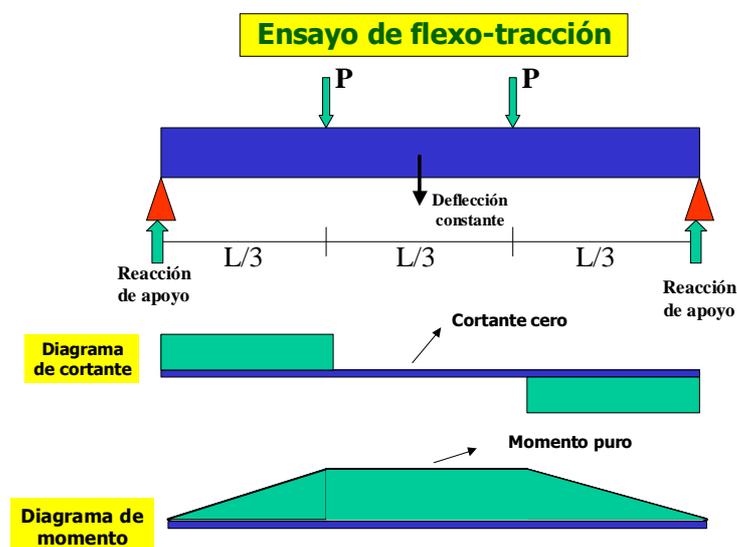


Fig N° 4: Ensayo de flexotracción

Curva Típica de Fatiga

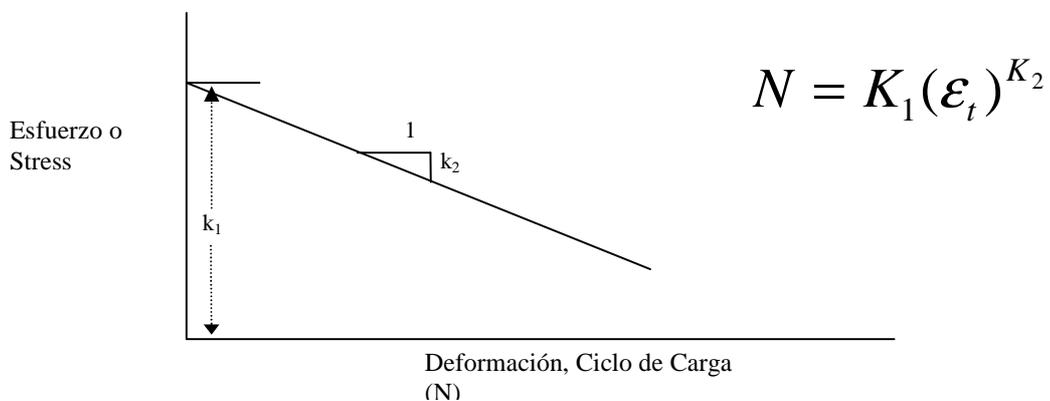


Fig N° 5: Curva típica de fatiga

Precisión en la Prueba de Fatiga

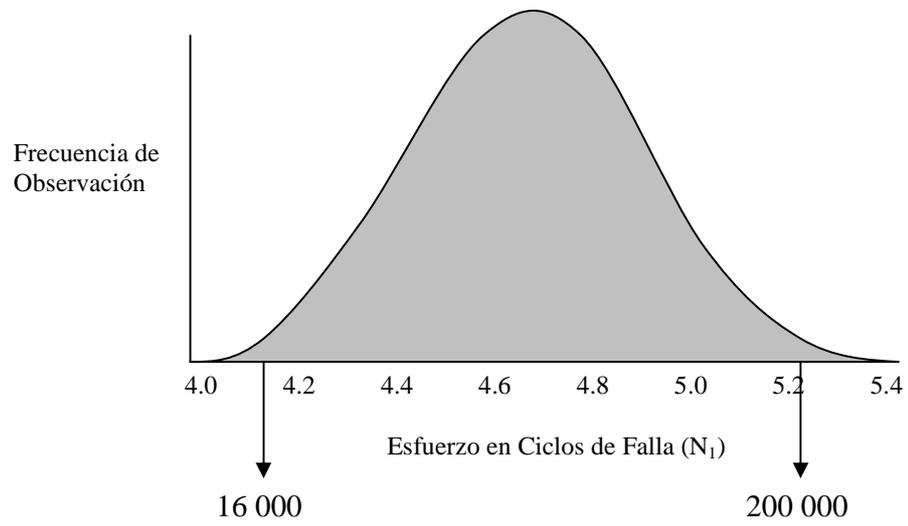


Fig Nº 6: Precisión del ensayo de fatiga

2.2.2 Resultados esperados

Con el ensayo de fatiga en la viga a flexotracción, entre otros resultados experimentales, se pueden obtener las siguientes relaciones:

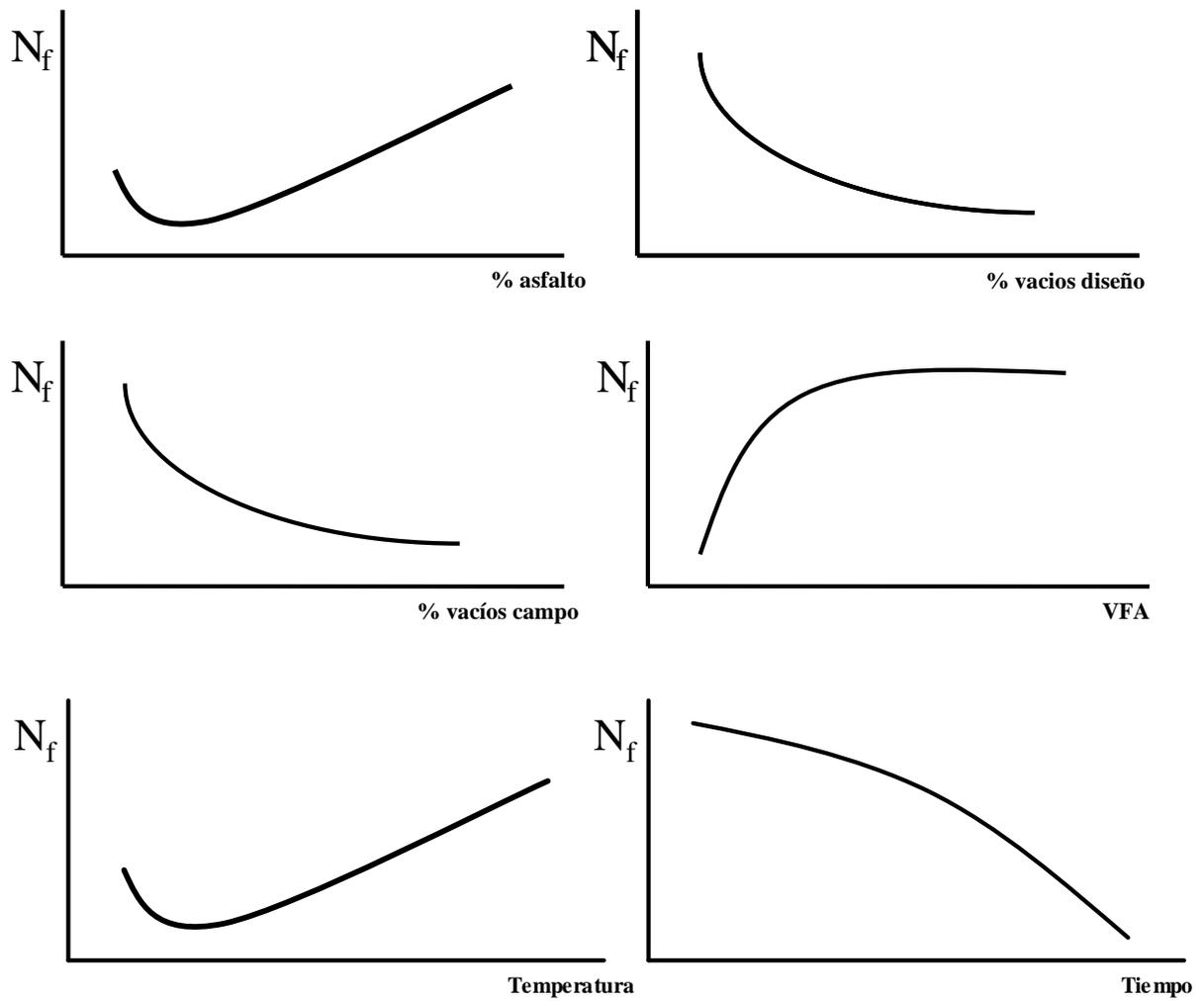


Fig N° 7: Resultados esperados

Adicionalmente, una forma alternativa para analizar los resultados, es analizar la variación de las propiedades volumétricas de cada ensayo realizado, de acuerdo con el siguiente formato de gráfico:

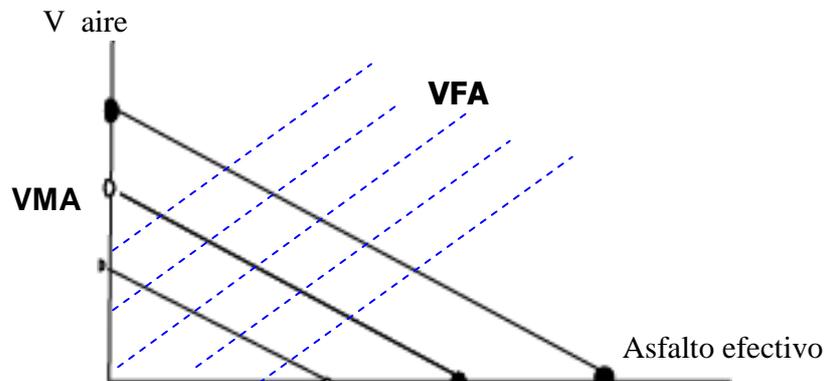


Fig Nº 8: Forma de expresión de resultados

Finalmente, los resultados experimentales mas importantes serán los siguientes:

- Módulo de rigidez
- Energía disipada durante el ensayo
- Número de ciclos de carga para un dado criterio de falla

2.2.3 Características más importantes del ensayo

- Protocolo de ensayo: AASHTO TP-8 o ASTM D 4123
- Carga en 4 puntos
- Carga sinusoidal o haversiana a 10 Hz
- Temperatura de ensayo: 20 °C
- Especímenes de 50 mm X 62.5 mm X 375 mm
- El protocolo de ensayo AASHTO TP-8, señala la realización de un condicionamiento del espécimen de 2 horas, a 20 °C.

2.2.4 Salida de resultados del software del equipo de ensayo

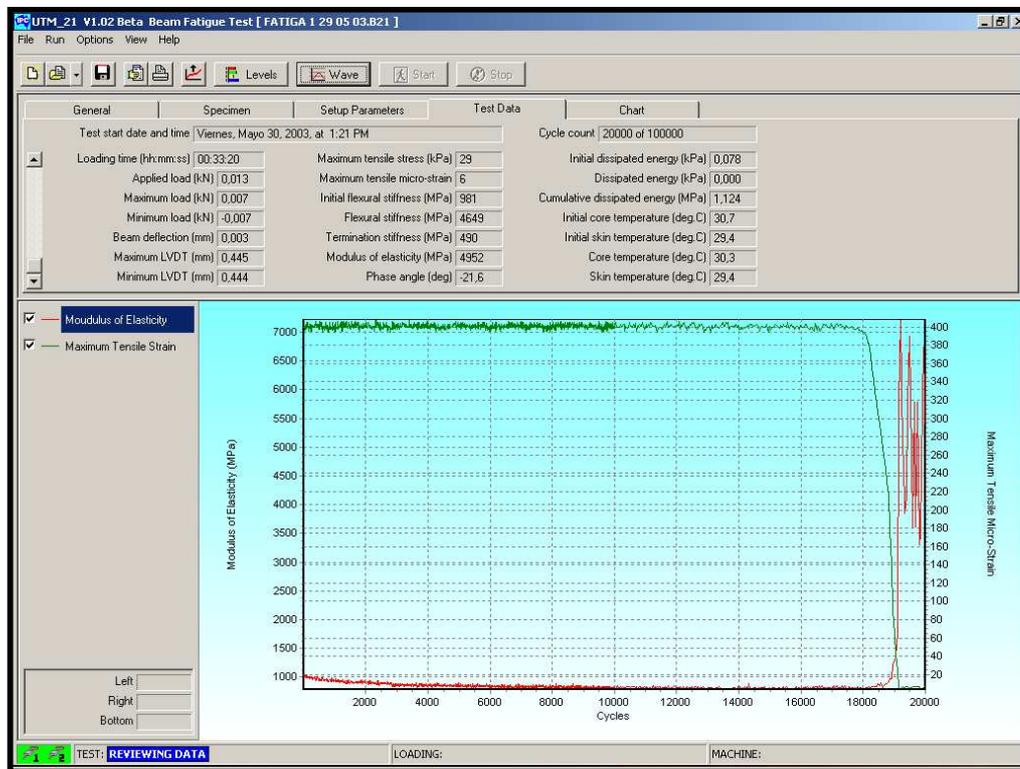


Fig N° 9: Salida del programa de cómputo del equipo empleado para determinar la fatiga

2.2.5 Resumen del procedimiento de ensayo

El Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP por sus siglas en inglés) ofrece una metodología para caracterizar la respuesta a fatiga de una mezcla un tiempo de ensayo relativamente corto. El procedimiento emplea cuatro especímenes evaluados a cuatro diferentes niveles de deformación para determinar las propiedades de resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica. Los niveles de deformación son señalados dentro de los períodos de vida típicos para una mezcla, entre 5000 y 1-2 millones de ciclos, de pendiendo, por supuesto, de la deformación unitaria o esfuerzo aplicado. El ensayo es desarrollado en el modo de esfuerzo controlado a una frecuencia de 10 Hz, como se indica:

- Realice un ensayo al cual la vida del espécimen está entre 5000 y 10000 ciclos, los rangos recomendados de deformación estarán entre 800 y 1000 μS .
- Si el primer ensayo indica una vida de fatiga mayor de 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser incrementado para el segundo ensayo. Si la vida a fatiga del primer ensayo es menor que 10000 ciclos, el nivel de deformación deberá ser reducido para el segundo ensayo.
- Los resultados de esos ensayos serán utilizados para generar la relación de deformación versus ciclos de carga:

$$N = A + B * \epsilon$$

Donde

N = Ciclos para la falla

A = intersección de la línea de regresión

B = pendiente de la línea de regresión, y

ϵ = esfuerzo aplicado

- Esta relación es utilizada para estimar la deformación que se requiere para tener una vida de fatiga aproximada entre 100000 y 350000 ciclos.
- Se deben hacer dos ensayos adicionales, uno a 100000 ciclos y el otro a 350000 ciclos de carga.
- Para cada uno de los ensayos se calcula la rigidez, los esfuerzos aplicados, las deformaciones y la energía disipada.

2.2.5.1 Esfuerzo aplicado

El esfuerzo aplicado pico a pico es:

$$\sigma_t = \frac{3aP}{wh^2}$$

en donde

σ_t = Máximo esfuerzo de tensión, N

a = L/3, mm

L = luz de la viga, mm

P = carga aplicada, N

W = ancho de la viga, mm

h = altura de la viga, mm

2.2.5.2 Deformación

La deformación es:

$$\varepsilon_t = \frac{12h\delta}{3L^2 - 4a^2}$$

Donde

ε_t = deformación máxima, mm/mm

δ = deflexión de la viga en el eje neutral, mm

2.2.5.3 Rigidez a la flexión

Rigidez:

$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}$$

Donde S es la rigidez de la viga en Pascales.

2.2.5.4 Ángulo de fase

El ángulo de fase es:

$$\phi = 300 f * s$$

en donde

ϕ = ángulo de fase

f = frecuencia de la carga, Hz

s = Tiempo de espera entre $P_{\text{máx}}$ y $\delta_{\text{máx}}$, s.

2.2.5.5 Energía disipada

La energía disipada por cada ciclo se define como:

$$D = \pi \sigma_t \varepsilon_t \text{sen} \phi$$

En donde D es la energía disipada por ciclo en Pascales. La energía disipada acumulada es la determinada por la suma de la energía disipada por ciclo en la vida del espécimen.

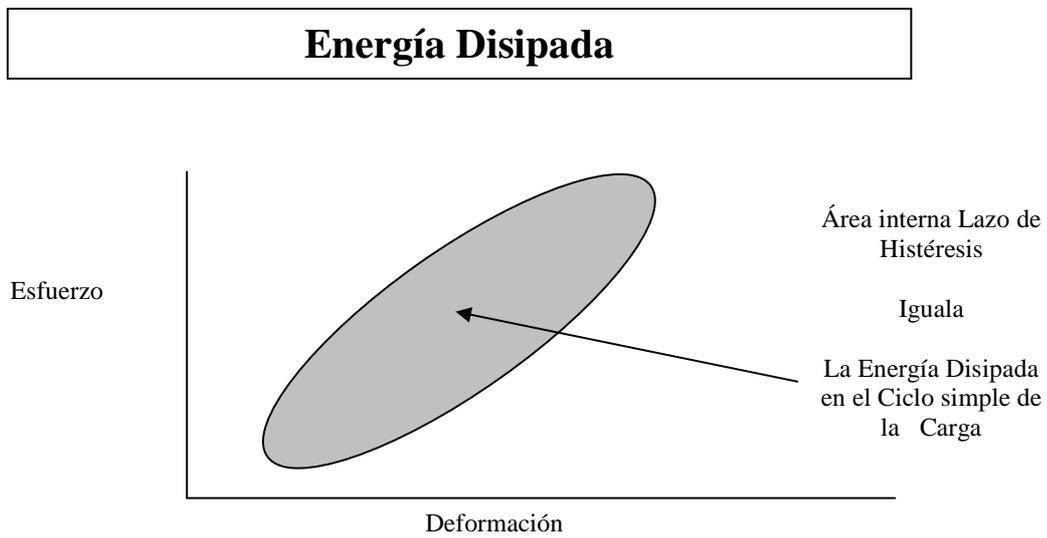


Fig N° 10: Curva de energía disipada por ciclo

2.2.5.6 Curvas de fatiga

Adicionalmente, se puede determinar una curva de vida de fatiga versus deformación aplicada, para describir cada mezcla, así:

$$N_f = K_1 \epsilon^{-k_2}$$

En donde,

N_f = vida a fatiga, en ciclos

ϵ = deformación aplicada, mm/mm

K_1 y K_2 = coeficientes de regresión

Una forma alternativa de la ecuación anterior es:

$$N_f = K_1 \epsilon^{-k_2} S^{-k_3}$$

En donde

S = Rigidez inicial de la mezcla, Pa

K_3 = Coeficiente de regresión

2.2.5.7 Módulo de elasticidad

Finalmente, el módulo de elasticidad (MPa), es el siguiente:

$$E = [Pa / \delta wh] X \left[\left(3L^2 - 4a^2 \right) / 4h^2 + k * (1 + \nu) \right]$$

En donde:

P = Fuerza pico

a = L/3, mm

δ = Deflexión pico al centro de la viga

w = Ancho de la viga

h = Altura de la viga

L = Luz de la viga

k = Esfuerzo cortante actual dividido por el esfuerzo cortante promedio (Se asume 1.5)

ν = relación de poisson por defecto

2.3 Modelación mecánica para método de análisis por fatiga en mezclas asfálticas

Para la definición de la mecánica de falla en el equipo de vigas a flexo-tracción, se hizo una evaluación estructural por el método de multicapa elástica, para la estructura de pavimento definida en la Tabla 1.

Tabla 1. Escenarios de carga estructural.

Capa asfáltica		Base Granular		Sub-base		Sub-rasante	Cargas Aplicadas (kN)
Espesor (cm)	MR (psi)	Espesor (cm)	MR (psi)	Espesor (cm)	MR (psi)	MR (psi)	
5	300000	25	20000	30	15000	7000	10
7	500000						25*
10	700000		30000		10000		40
15	900000						70

(*) Solamente para espesores de carpeta de 5 y 7 cm.

2.3.1. Análisis de respuesta mecánica por índices

Se analizaron los esfuerzos y deformaciones unitarias por tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, considerando como base indexada el resultado con carga de 10000 N.

En general se aprecia:

- El crecimiento en función de la carga para esfuerzo de tracción es menor que la deformación unitaria, en términos indexados, sin importar la combinaciones de factores de simulación. Es decir, el incremento de carga determina incrementos mayores para deformaciones unitarias que para esfuerzos.

- El incremento en el espesor de capa asfáltica determina un mayor efecto relativo del crecimiento en carga aplicada. Conforme mayor es el espesor de la capa asfáltica, mayor crecimiento en los niveles de esfuerzo y deformación unitaria al aumentar la carga aplicada.
- El incremento en rigidez, tanto de la subrasante como de la subbase, no producen diferencias significativas en los resultados mecánicos de esfuerzo y deformación unitaria obtenidos.
- Un aumento en la rigidez de la base determina un menor efecto relativo del crecimiento en carga aplicada. Conforme mayor rigidez de la base, menores los niveles de esfuerzo y deformación unitaria al aumentar la carga aplicada.

Se observó como para capas delgadas el incremento en carga aplicada no produce un incremento lineal de los esfuerzos para los diversos módulos de rigidez usados. Por otro lado este efecto se reduce para el caso de capas de mayor espesor (se obtienen líneas rectas). El mismo caso se presenta para las deformaciones unitarias, por lo tanto el realizar un análisis por medio de índices no es del todo fiable; lo que determinó recurrir al análisis de respuesta mecánica estandarizada. Por otro lado este efecto se reduce para el caso de capas de mayor espesor.

2.3.2. Análisis de respuesta mecánica estandarizada

En este caso se procede a estandarizar los resultados de esfuerzo y deformación unitaria para cada grupo de espesor y rigidez de la carpeta, rigidez de la base y el incremento de carga. En general se aprecia para el caso de carpetas delgadas:

- El crecimiento en función de la carga para esfuerzo de tracción es mayor que la deformación unitaria, en términos estandarizados, sin importar la combinaciones de factores de simulación. Es decir, el incremento de carga

determina incrementos mayores para esfuerzos que para deformaciones unitarias.

- El incremento en la rigidez de la base determina un decremento relativo en los niveles de rigidez de la carpeta y de los espesores de carpeta, aunque mantiene el incremento relativo a la carga aplicada.
- El incremento en el espesor de capa asfáltica determina un mayor efecto relativo del crecimiento en carga aplicada. Conforme mayor es el espesor de la capa asfáltica, mayor crecimiento en los niveles de esfuerzo y deformación unitaria al aumentar la carga aplicada. Sin embargo, el incremento en espesor de la carpeta determina un decremento en los niveles de esfuerzo y deformación relativos a cada carga aplicada.

Además, de los valores estandarizados para carpetas de mayor espesor se aprecia:

- El incremento en la rigidez de la base determina un decremento relativo en los niveles de rigidez de la carpeta y de los espesores de carpeta, aunque mantiene el incremento relativo a la carga aplicada igual que el caso de capas delgadas.
- El crecimiento en función de la carga para esfuerzo de tracción es un poco mayor que la deformación unitaria y conforme aumenta el espesor y rigidez de la carpeta esta diferencia tiende a cero, en términos estandarizados, sin importar la combinaciones de factores de simulación. Es decir, el incremento de carga determina incrementos un poco mayores o iguales para esfuerzos que para deformaciones unitarias.

2.3.3. Conclusiones de modelación mecánica

Del diseño experimental se concluye lo siguiente:

- La aplicación de una condición de deformación unitaria controlada rige para carpetas delgadas como en el caso aplicado de 5.0 y 7.0 cm.
- La aplicación de una condición de esfuerzo controlado o una condición de deformación unitaria controlada puede considerarse como indiferente para el caso de capas de espesor superior a los 10 cm. Se puede usar, por facilidad de ejecución de ensayo, la condición de esfuerzo controlado.
- La capacidad de soporte para la subrasante es poco relevante en cuanto a la respuesta mecánica.
- El módulo de rigidez para la subbase es poco relevante en cuanto a la respuesta mecánica de una base estabilizada con cemento.
- Se vuelve necesario realizar una modelación mecánica para cada escenario que se quiera ensayar.
- **Finalmente, en cuanto a la ejecución del ensayo, se concluye que el rango de variación, en el caso de la condición de deformación unitaria controlada, podría estar entre 200 y 600 μ S. Esto, debido a que en Costa Rica, la mayoría de las capas tienen menos de 8 cm.**

2.4 Algunos modelos de fatiga para mezcla asfáltica

Los ensayos de desempeño fundamentales pueden ser aplicados en el diseño y análisis (por ejemplo modelos de diseño mecánico – empíricos) cuando pueden ser correlacionados con modelos de desempeño. Hay tres categorías básicas de modelos de análisis empleados para estos propósitos:

- Modelos de regresión empíricos, los cuales de una manera simple representan una categoría
- Leyes de esfuerzo-deformación, que representan una segunda categoría
- Funciones matemáticas basadas en ensayos de laboratorio que representan una relación entre las relaciones empíricas y los modelos de esfuerzo-deformación.

2.4.1 Modelo de fatiga de Finn

Este modelo aplica para un 45% área fisurada. Fue desarrollado por AASHTO en su pista experimental.

$$\log N_f = 16.086 - 3.291 \log\left(\frac{\epsilon_{ec}}{10^{-6}}\right) - 0.854 \log\left(\frac{E_{ec}}{1000}\right)$$

Donde

N_f = Número de repeticiones para la falla

ϵ_{ec} = esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa de mezcla asfáltica

E_{ec} = módulo de la mezcla asfáltica

2.4.2 Modelo de fatiga del Instituto del Asfalto

Este modelo es empleado para predecir el daño de la estructura provocado por un 20% del área fisurada. También fue desarrollado basándose en la pista experimental de AASHTO.

$$N_f = 0.076(\varepsilon_i)^{-3.291}(E_1)^{-0.854}$$

Donde

N_f = Número de repeticiones para la falla

ε_i = esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa de mezcla asfáltica (in/in)

E_1 = módulo de la mezcla asfáltica

2.4.3 Modelo de fatiga de Shell

$$N_f = 0.0685(\varepsilon_i)^{-5.671}(E_1)^{-2.363}$$

Donde

N_f = Número de repeticiones para la falla

ε_i = esfuerzo de tensión en la fibra inferior de la capa de mezcla asfáltica (in/in)

E_1 = módulo de la mezcla asfáltica

2.4.4 Otros modelos de fatiga

La ecuación genérica está dada por:

$$N_f = f_1 \cdot (\varepsilon_t)^{-f_2} \cdot (E_{AC})^{-f_3}$$

Donde

N_f = número de repeticiones admisibles para prevenir agrietamiento por fatiga.

ε_t = deformación unitaria por tensión en la fibra inferior de la capa más profunda ligada con asfalto en strain (mm/mm).

E_{AC} = módulo de elasticidad de la capa ligada.

f_1, f_2 y f_3 = coeficientes determinados en laboratorio mediante ensayos de fatiga con f_1 modificable para correlación con comportamiento en campo.

Los coeficientes están dados, según cada agencia, de la siguiente manera:

Funciones de transferencia para agrietamiento (Kenlayer, E_{CA} en KPa)

Ecuación	f_1	f_2	f_3
CRR (Bélgica)	$4,856 \times 10^{-14}$	4,76190	0,00000
Nottingham	$8,888 \times 10^{-13}$	4,90200	0,00000
Hudson	$5,348 \times 10^{-18}$	6,17280	0,00000
Shell	$3,981 \times 10^{-6} (0,856Vb + 1,8)^5$	5,00000	1,80000
Asphalt Institute	$0,414 \times 10^{4,84} \{ [Vb / (Vv + Vb)] - 0,69 \}$	3,29100	0,85400
Roadent 4.0	$2,83 \times 10^{-6}$	3,20596	0,00000
Animesh & Pandey	2657,8721	3,56500	1,47470

Del siguiente gráfico, se puede apreciar que las variaciones entre métodos de cálculo de fatiga son importantes:

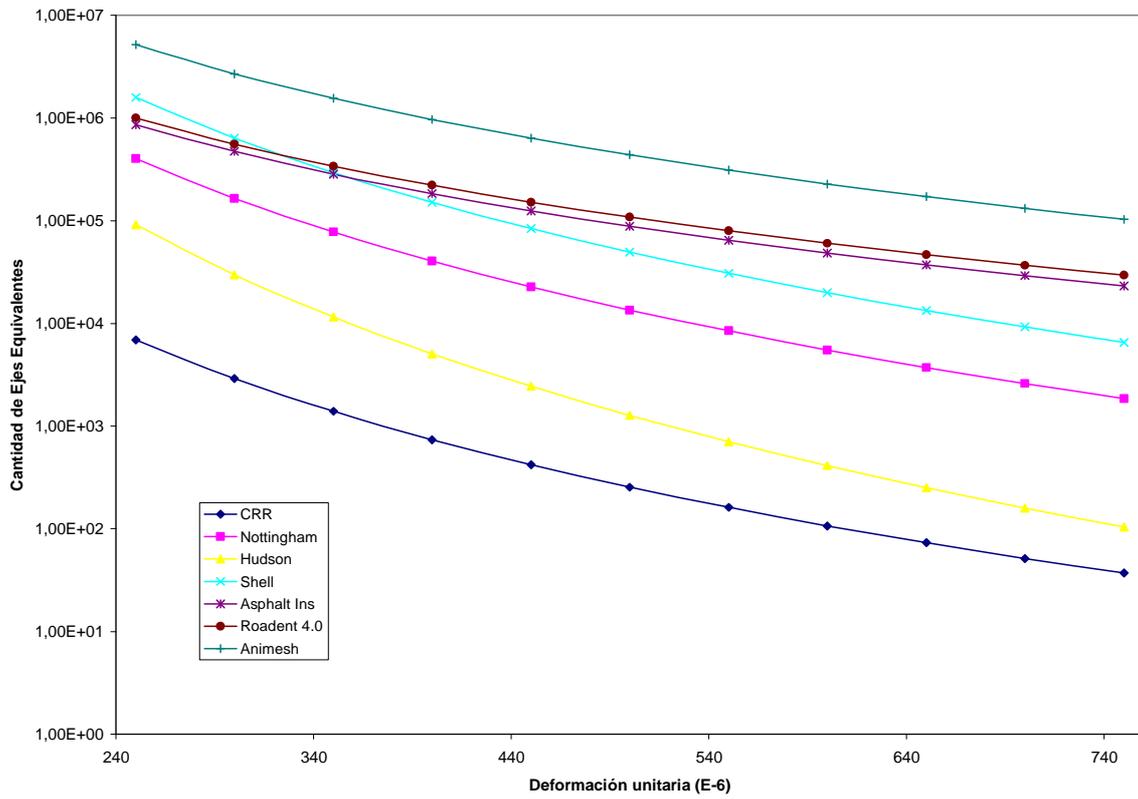


Fig N° 11: Distintas leyes de fatiga

3. RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO

3.1 Muestra 1083 – 03

Parámetros medidos en ensayo de vida a fatiga de mezclas asfálticas.				
Parámetro	Unidad	Deformación aplicada (μS)		
		200 (*)	400	600
Muestra	-	1083-03 (3)	1083-03 (2)	1083-03 (1)
Rigidez a la flexión inicial	MPa	2728	4889	4091
Rigidez a la flexión final	MPa	1364	2444	2045
Rigidez	MPa	2427	2423	2040
Módulo de elasticidad final	MPa	2571	2579	2188
Angulo de fase	°	20,6	33,5	41,1
Energía disipada en primer ciclo	kPa	0,041	0,342	0,696
Energía disipada final	kPa	0,040	0,210	0,422
Energía total disipada	MPa	135,443	150,005	23,592
Esfuerzo de tensión máximo	kPa	487	966	590
Ciclos para la falla	-	3622790	567630	50750

(*) La muestra no alcanzó la rigidez de falla.

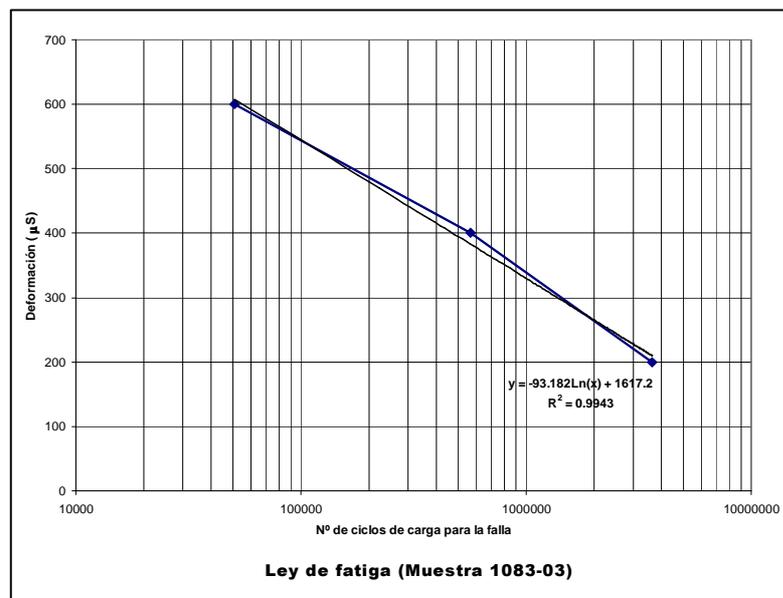


Fig Nº 12: Ley de fatiga, muestra 1083-03

3.2 Muestra 0141 – 04

Parámetros medidos en ensayo de vida a fatiga de mezclas asfálticas.				
Parámetro	Unidad	Deformación aplicada (μS)		
		250	375	500
Muestra	-	0141-04 (3)	0141-04 (4)	0141-04 (2)
Rigidez a la flexión inicial	MPa	1154	1665	1415
Rigidez a la flexión final	MPa	577	832	708
Rigidez	MPa	544	822	708
Módulo de elasticidad final	MPa	580	878	753
Angulo de fase	°	34,5	43,7	42,6
Energía disipada en primer ciclo	kPa	0,043	0,136	0,209
Energía disipada final	kPa	0,022	0,077	0,118
Energía total disipada	MPa	18,750	18,588	20,405
Esfuerzo de tensión máximo	kPa	137	308	352
Ciclos para la falla	-	837100	227180	152120
Parámetros volumétricos para mezcla asfáltica evaluada.				
Parámetro	Unidad	Espécimen		
		0141-04		
% Ligante asfáltico	%	5.88		
% Vacíos de sitio	%	11.1		
VFA	%	15		
VMA	%	60		
G_{bs} agregado	-	2.62		
% Absorción de agua	%	1.9		
% Agua atrapada	%	0.06		
$MR_{laboratorio}$	MPa	6417		
MR_{campo}	MPa	1800		

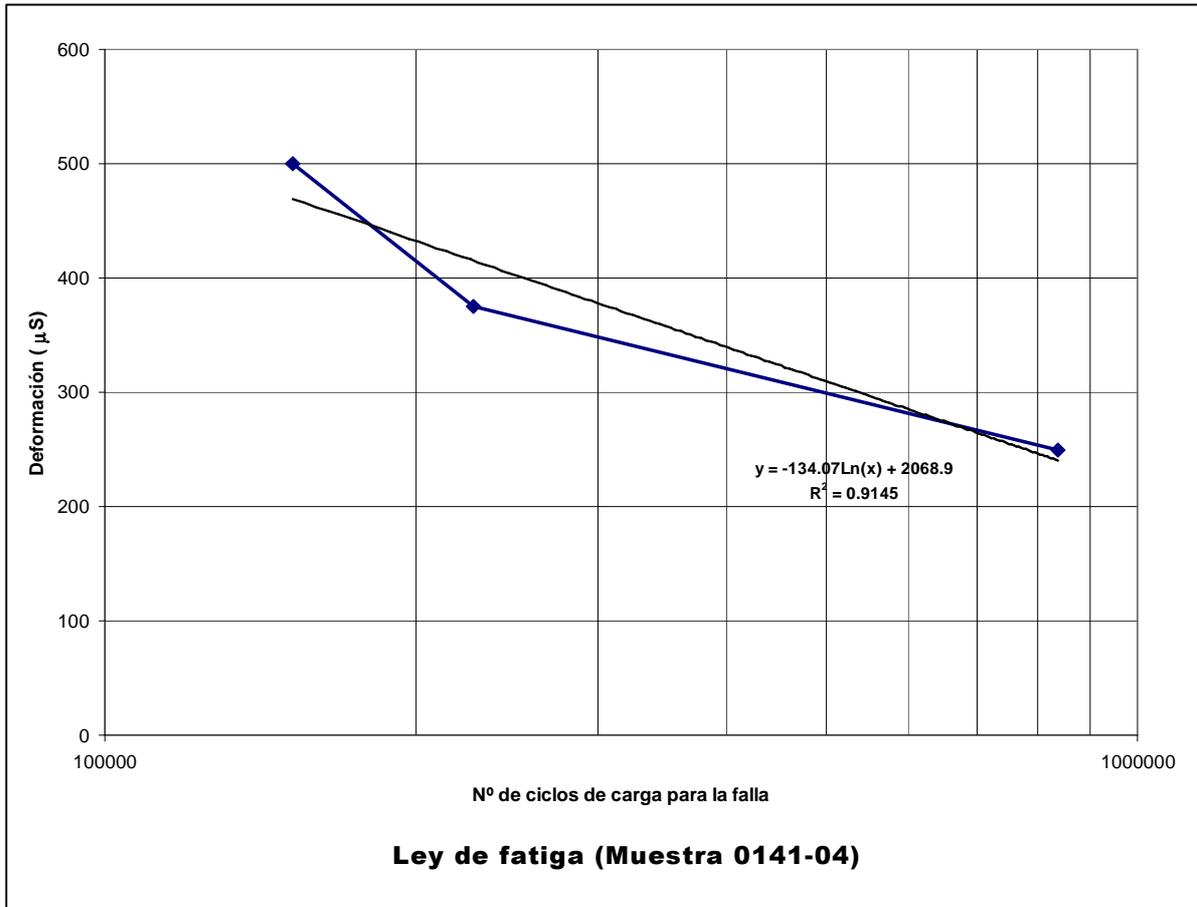


Fig Nº 13: Ley de fatiga, muestra 141-04

3.3. Muestra 0220 – 04

Parámetros medidos en ensayo de vida a fatiga de mezclas asfálticas.				
Parámetro	Unidad	Deformación aplicada (μS)		
		200 (*)	400	600
Muestra	-	0220-04 (3)	0220-04 (2)	0220-04 (1)
Rigidez a la flexión inicial	MPa	4574	5752	3559
Rigidez a la flexión final	MPa	2287	2876	1779
Rigidez	MPa	4560	2853	1776
Módulo de elasticidad final	MPa	4857	3036	1896
Angulo de fase	°	28,2	37,6	26,1
Energía disipada en primer ciclo	kPa	0,082	0,368	0,349
Energía disipada final	kPa	0,079	0,244	0,290
Energía total disipada	MPa	66,777	54,329	83,852
Esfuerzo de tensión máximo	kPa	903	1131	1059
Ciclos para la falla	-	1041370	212180	295090
(*) La muestra no alcanzó la rigidez de falla.				
Parámetros volumétricos para mezcla asfáltica evaluada.				
Parámetro	Unidad	Espécimen		
		0220-04		
% Ligante asfáltico	%	5.42		
% Vacíos	%	8.3		
VFA	%	73.2		
VMA	%	13.4		
G_{bs} agregado	-	2.62		
% Absorción de agua	%	2.0		
% Agua atrapada	%	0.08		
$MR_{laboratorio}$	MPa	3912		
MR_{campo}	MPa	2465		

Caracterización ligante asfáltico envejecido en PAV.			
Temperatura	Parámetro	Unidad	Valor
16°C	G* senδ	MPa	8.217
	δ	°	-
22°C	G* senδ	MPa	4.278
	δ	°	-
28°C	G* senδ	MPa	2.313
	δ	°	-

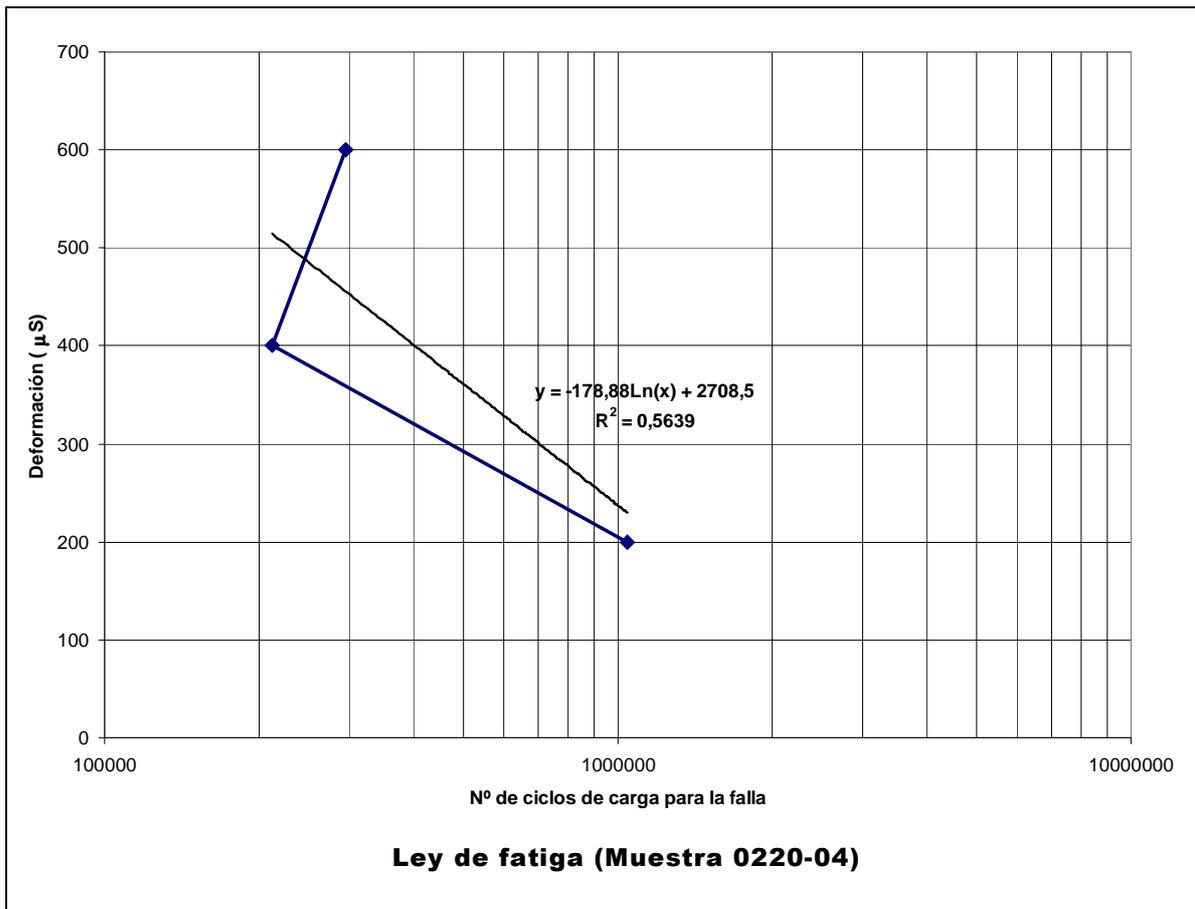


Fig Nº 14: Ley de fatiga, muestra 220-04

3.4 Muestra 336 – 04 A

Parámetros medidos en ensayo de vida a fatiga de mezclas asfálticas.				
Parámetro	Unidad	Deformación aplicada (μS)		
		400	500	600
Muestra	-	0336-04A (3)	0336-04A (2)	0336-04A (1)
Rigidez a la flexión inicial	MPa	2670	2425	2617
Rigidez a la flexión final	MPa	1335	1213	1309
Rigidez	MPa	1326	1213	1300
Módulo de elasticidad final	MPa	1415	1294	1390
Angulo de fase	°	42,6	45	48,6
Energía disipada en primer ciclo	kPa	0,235	0,360	0,561
Energía disipada final	kPa	0,136	0,193	0,311
Energía total disipada	MPa	648,780	186,554	29,194
Esfuerzo de tensión máximo	kPa	533	607	784
Ciclos para la falla	-	4267790	860050	87960
Parámetros volumétricos para mezcla asfáltica evaluada.				
Parámetro	Unidad	Espécimen		
		0336-04A		
% Ligante asfáltico	%	6.39		
% Vacíos	%	9.5		
VFA	%	81.2		
VMA	%	14.4		
G _{bs} agregado	-	2.67		
% Absorción de agua	%	1.4		
% Agua atrapada	%	.08		
MR _{laboratorio}	MPa	3207		
MR _{campo}	MPa	2022		

Caracterización ligante asfáltico envejecido en PAV.			
Temperatura	Parámetro	Unidad	Valor
16°C	G* senδ	MPa	5.631
	δ	°	-
22°C	G* senδ	MPa	3.496
	δ	°	-
28°C	G* senδ	MPa	1.715
	δ	°	-

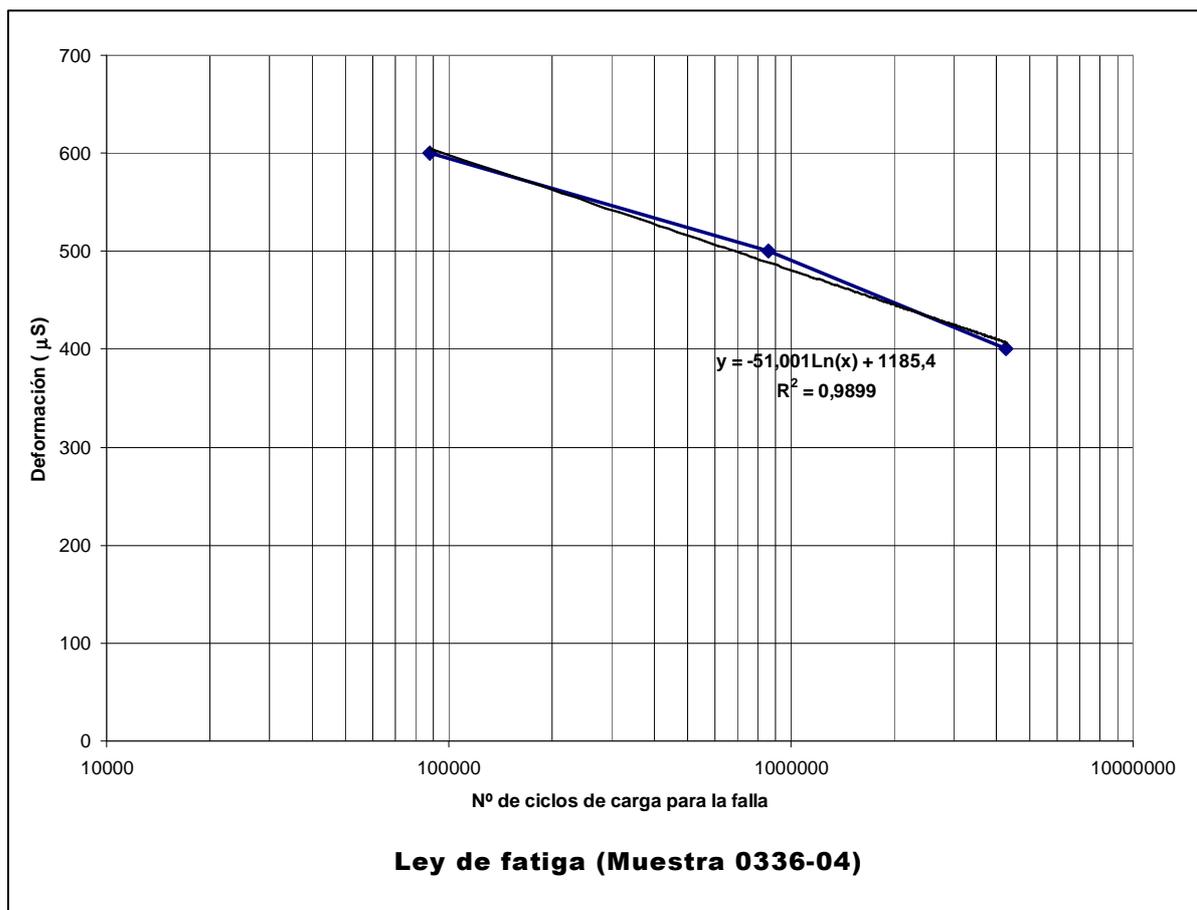


Fig Nº 15: Ley de fatiga, muestra 336-04

3.5 Resumen de leyes de fatiga para cada caso analizado

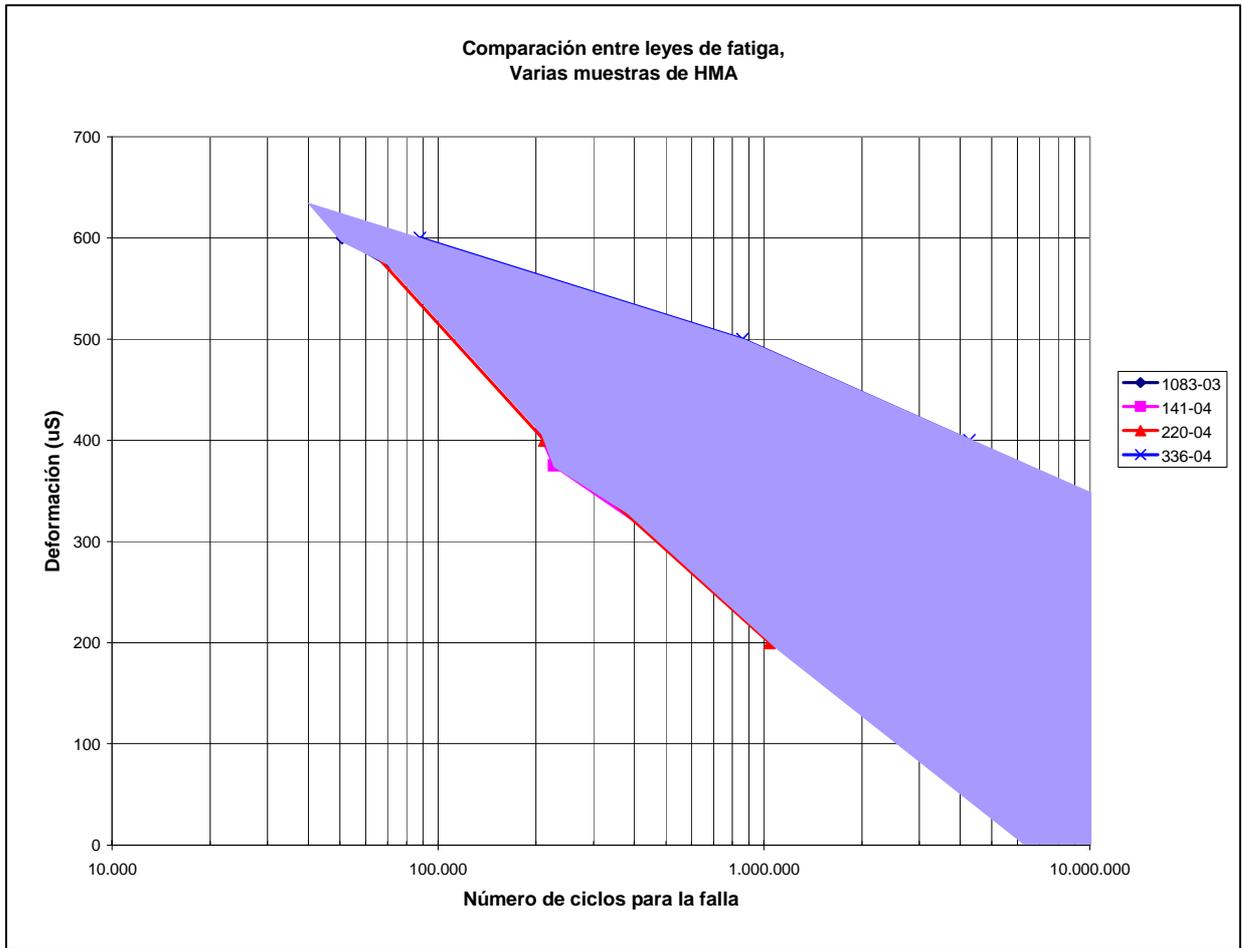


Fig N° 16: Leyes de fatiga de las 4 muestras analizadas

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO

4.1 Correlación entre factores

	Deformación aplicada	Rigidez a la flexión inicial	Rigidez a la flexión final	Rigidez	Módulo de elasticidad final	Angulo de fase	Energía disipada en primer ciclo	Energía disipada final	Energía total disipada	Esfuerzo de tensión máximo	Ciclos para la falla
Deformación aplicada	1,000	0,025	0,025	-0,380	-0,376	0,545	0,848	0,841	-0,079	0,252	-0,483
Rigidez a la flexión inicial	-	1,000	1,000	0,800	0,801	-0,292	0,369	0,473	-0,012	0,873	-0,135
Rigidez a la flexión final	-	-	1,000	0,800	0,801	-0,292	0,369	0,473	-0,012	0,873	-0,135
Rigidez	-	-	-	1,000	1,000	-0,540	-0,047	0,059	-0,054	0,660	0,075
Módulo de elasticidad final	-	-	-	-	1,000	-0,537	-0,043	0,063	-0,055	0,660	0,072
Angulo de fase	-	-	-	-	-	1,000	0,487	0,317	0,092	-0,242	-0,312
Energía disipada en primer ciclo	-	-	-	-	-	-	1,000	0,973	-0,096	0,404	-0,437
Energía disipada final	-	-	-	-	-	-	-	1,000	-0,123	0,531	-0,447
Energía total disipada	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000	-0,013	0,794
Esfuerzo de tensión máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000	-0,217
Ciclos para la falla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,000

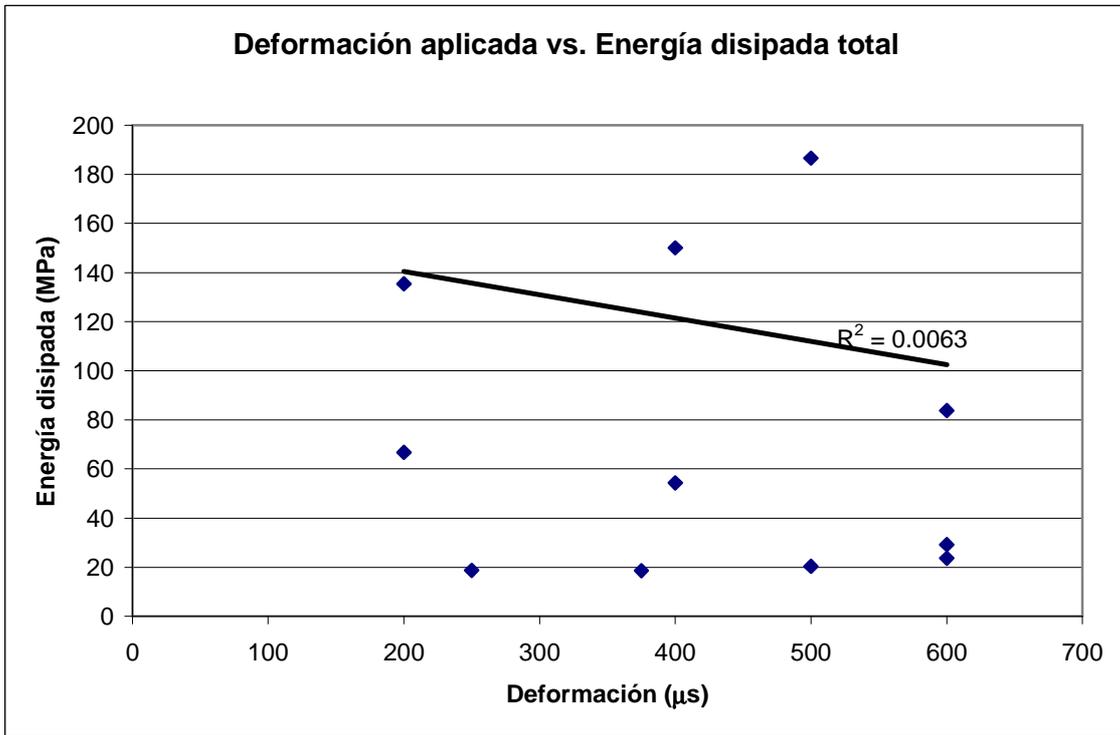


Fig N° 17

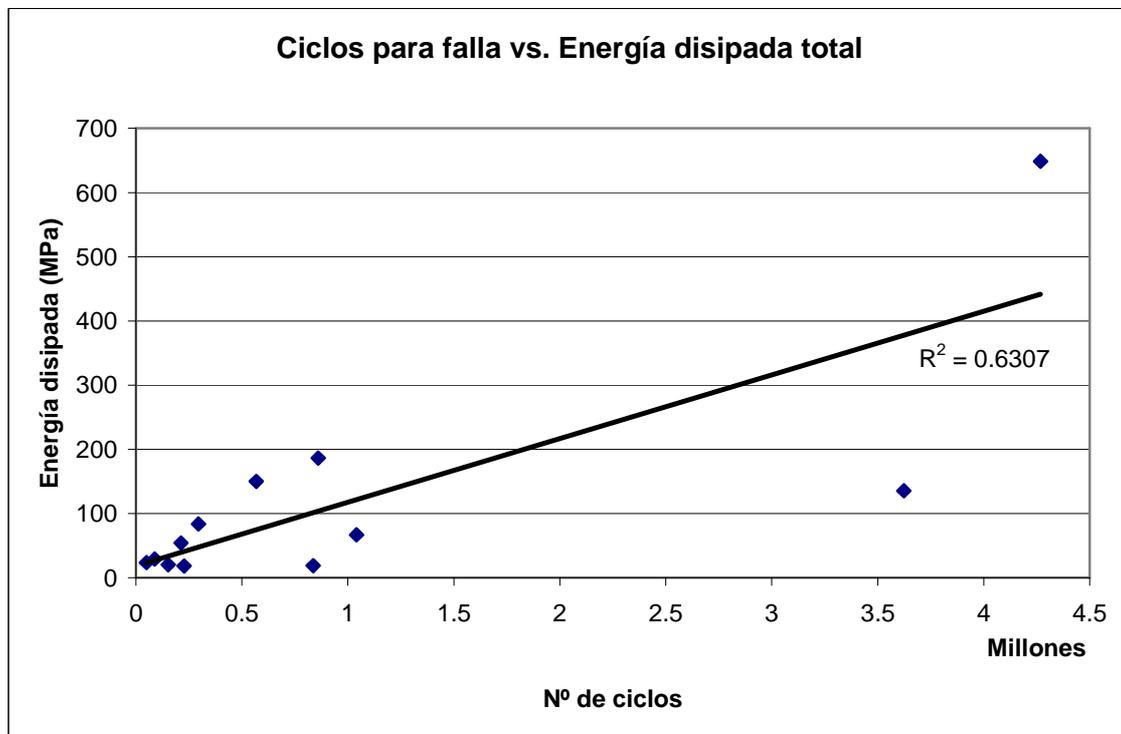


Fig N° 18

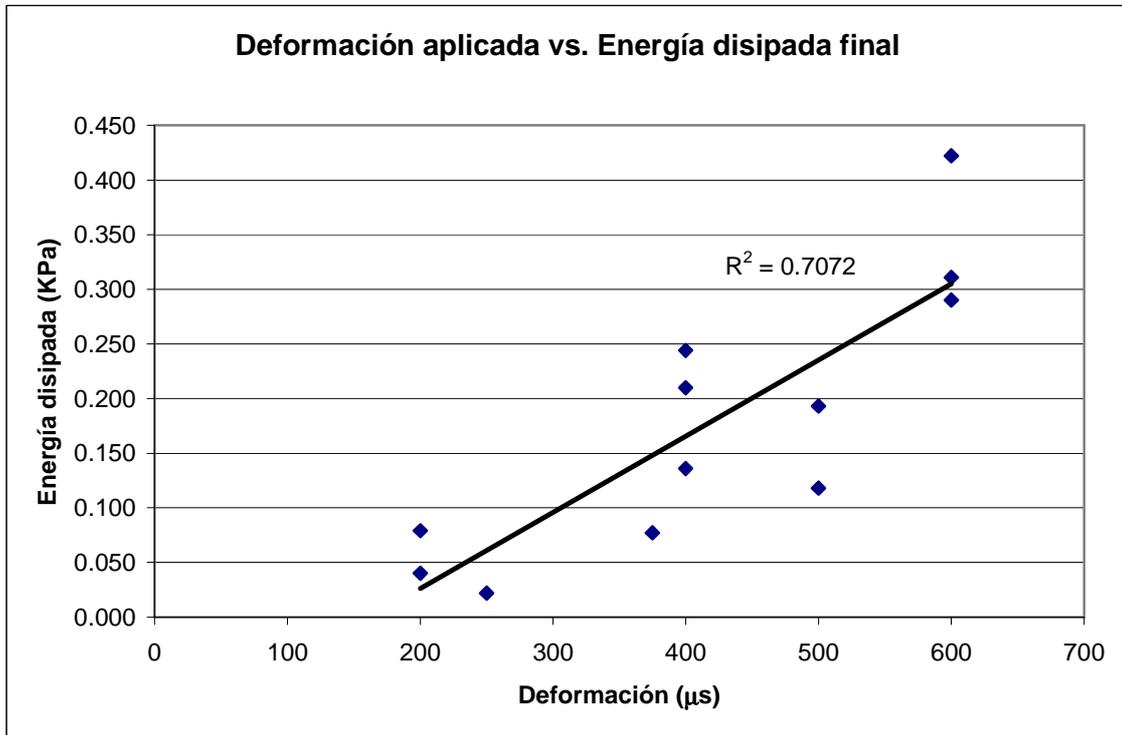


Fig N° 19

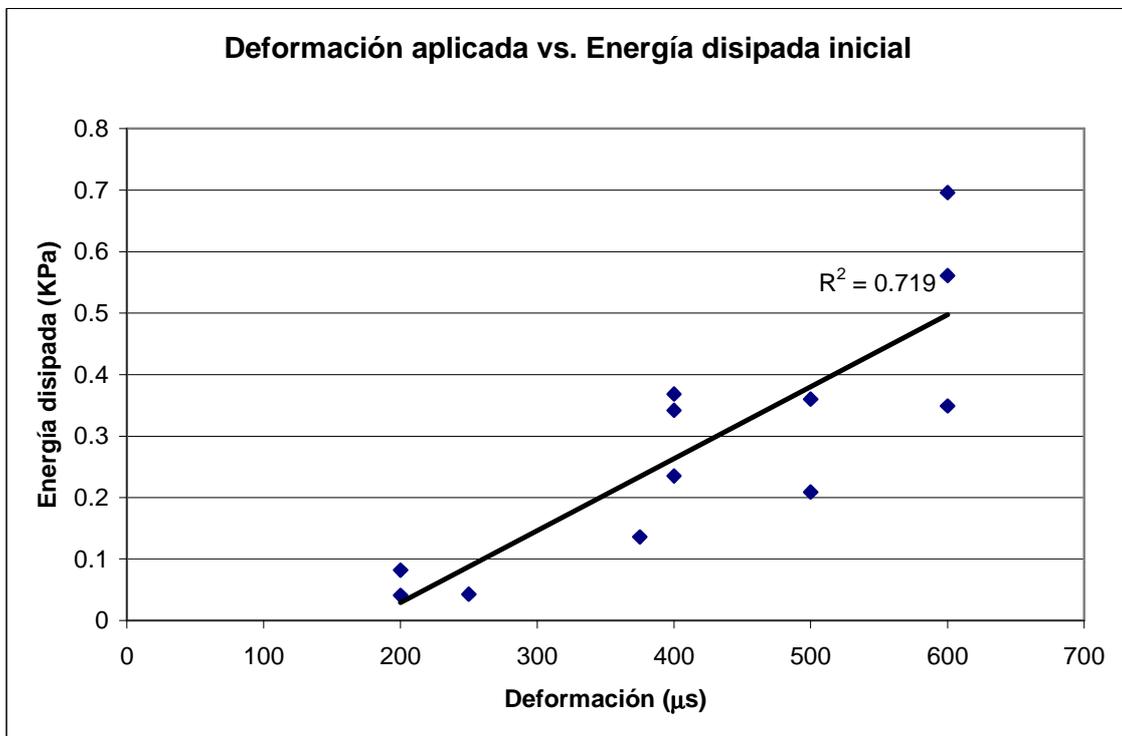


Fig N° 20

5. TRABAJO EFECTUADO DURANTE EL SEGUNDO SEMESTRE DEL 2004

Durante el periodo indicado, básicamente se realizaron ensayos para determinar las energías de compactación que se deben aplicar en el compactador de vigas, para alcanzarlos niveles de vacíos deseados en cada caso.

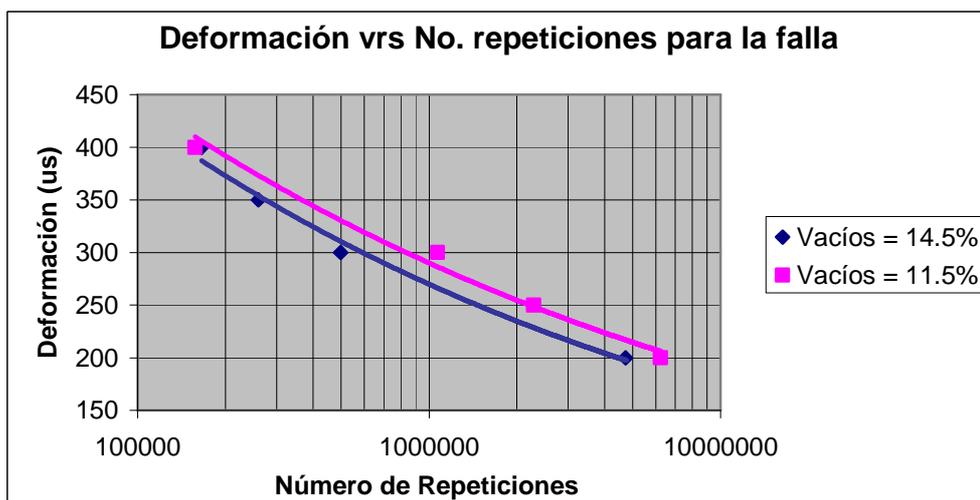
Los resultados de este experimento se presentan a continuación:

Muestra 0846-04
Bloque 1

Especímen	Deformación	# Repetic.	Vacíos
2	200	4727690	14,1
1	300	497040	14,0
4	350	259990	14,8
3	400	165790	14,9

Muestra 0846-04
Bloque 2

Especímen	Deformación	# Repetic.	Vacíos
7	200	6224260	11,6
8	250	2289350	11,4
6	300	1069980	10,7
5	400	157550	12,4



6. CONCLUSIONES

6.1 Los resultados obtenidos muestran que el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas estudiadas estuvo acorde con lo planeado, a pesar de que el ensayo se realizó sin control de temperaturas.

6.2 Los primeros modelos matemáticos generados indican que hay una buena correlación entre la deformación aplicada y la energía disipada total.

6.3 El ensayo debe realizarse a las deformaciones unitarias de 300, 450 y 600 μS . El uso de una deformación de 200 μS , provoca problemas en la realización del ensayo.

6.4 El procedimiento de compactación propuesto funciona adecuadamente para llevar los especímenes de ensayo al nivel de vacíos requerido en cada caso.

7. CRONOGRAMA DE TRABAJO

Para continuar con el experimento, se requiere de al menos el análisis de 7 muestras, en los siguientes meses. Los ensayos se efectuarán a 300, 450 y 600 μS .

CRONOGRAMA DE TRABAJO

1. ACTIVIDADES	Meses																		
	E	F	M	A	M	J	J	A											
MUESTREO 1																			
ENSAYO DE FATIGA 1																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 1																			
MUESTREO 2																			
ENSAYO DE FATIGA 2																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 2																			
MUESTREO 3																			
ENSAYO DE FATIGA 3																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 3																			
MUESTREO 4																			
ENSAYO DE FATIGA 4																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 4																			
MUESTREO 5																			
ENSAYO DE FATIGA 5																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 5																			
MUESTREO 6																			
ENSAYO DE FATIGA 6																			
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 6																			

2. ACTIVIDADES	Meses																			
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A
MUESTREO 7																				
ENSAYO DE FATIGA 7																				
ENSAYOS ADICIONALES DE DESEMPEÑO Y CARACTERIZACION 7																				
INFORME PARCIAL FASE 2																				

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Witzack et al, Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP 465, National Academy Press, 2002.
2. Flintch, G. Fatigue Testing Procedure. Virginia Tech, 2002.
3. Harvey et al. Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California. Berkeley, 1995.
4. Christensen, D. Top-down fatigue cracking of hot-mix asphalt layers. NCHRP Project 1-42, Advanced asphalt technologies, 2003.
5. Brown, E. Endurance limit of hot mix asphalt mixtures to prevent fatigue cracking in flexible pavements. NCHRP Project 9-38, NCAT, 2004.
6. Yann, L. Asphalt material fatigue test under cyclic loading. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Francia, 2003.
7. Planche, J. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. TotalFinaElf, Francia, 2003.
8. Asphalt Institute. Perpetual pavement fatigue study. AI, 2002.
9. Leiva, F. Modelación mecánica para agrietamiento por fatiga de carpetas asfálticas con bases granulares. LANAMME, UCR, 2003.