

**INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFALTICOS**

**JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTA DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÀ D.C  
2004**

# 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

Uno de los principales problemas que encontramos en los pavimentos es la fisuración por fatiga, la cual se presenta en el momento de la aplicación repetida de cargas, es mas critica a temperaturas intermedias, generalmente ocurre tarde en la vida del pavimento. Se puede hablar de un deterioro progresivo, pues es el producto de fisuras iniciales que se unen con otras. Estas fisuras se presentan en la dirección del transito.

Cuando la mezcla asfáltica es muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga, se ha determinado que cuando en la subrasante el drenaje es de baja calidad los pavimentos se convierten en blandos con grandes posibilidades de deflectarse ocasionando inevitablemente la fisuración por fatiga.El envejecimiento, la humedad, la temperatura y otros factores inciden en el comportamiento a la fatiga de materiales asfálticos.

Si determinamos su comportamiento por medio de ensayos de laboratorio podremos proponer posibles alternativas para mejorar las características del asfalto y optimizar las mezclas para hacer pavimentos mas duraderos; para lograr este fin realizamos ensayos de diseños racionales y provenientes del programa SUPERPAVE.

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de esta Tesis es investigar el comportamiento a la fatiga de materiales asfálticos como consecuencia del envejecimiento.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar la deformación que sufre una mezcla asfáltica cuando se ve sometida a una serie de repeticiones de vehículos con el paso de tiempo, esto se ve reflejado en el ensayo de fatiga.
- Simular el envejecimiento experimentado durante la producción y colocación del Pavimento en el ensayo RTFO
- Determinar el envejecimiento acelerado (la oxidación) a largo plazo que ocurre durante la vida útil del pavimento a través del ensayo PAV.
- Encontrar el grado óptimo de desempeño de materiales asfálticos a diferentes temperaturas utilizando el reómetro (DSR).
- Obtener parámetros necesarios para hacer una comparación real de comportamiento de los asfaltos envejecidos y asfaltos envejecidos provenientes de mezclas asfálticas.

## 1.4 ALCANCE

Determinar el comportamiento a la fatiga de materiales asfálticos, tanto mezclas originales como mezclas asfálticas con envejecimiento a largo plazo, analizar el comportamiento de los asfaltos originales y aquellos originales y envejecidos extraídos de las mezclas asfálticas con el fin de obtener resultados que permitan comparar los resultados de los asfaltos cuando sufren un proceso de envejecimiento y cuando están originales para mejorar las características de los mismos una vez se conviertan en una mezcla y entren en servicio para garantizar la mayor durabilidad y mejor comportamiento de las mismas controlando la fatiga que es producto del envejecimiento.

En estos trabajos no se incluye el estudio del ahuellamiento, solo esta dirigido al estudio de la fatiga.

## 1.5 METODOLOGÍA

1. Estudio y manejo de las normas para la correcta utilización de los ensayos.
2. Obtener asfalto proveniente de la refinería de Barrancabermeja
3. Se realizara diseño Marshall para obtener le porcentaje optimo de asfalto
4. Realizar el ensayo RTFO para asfaltos con el fin de determinar envejecimiento en mezcla y compactación.
5. Posteriormente se realizará el ensayo PAV tanto para asfaltos como para mezclas asfálticas compactadas.
6. Para mezclas asfálticas se compactaran briguetas con el fin de realizar ensayos de fatiga, a continuación recuperamos el asfalto de estas mezclas para luego ensayarlo en el DSR.

7. Se realizarán pruebas en el equipo DSR: (Reómetro de corte dinámico). Se realizan barridos de temperatura, frecuencias y amplitudes a muestras originales y envejecidas y se determina modulo dinámico complejo y ángulo de fase en cada ligante asfáltico.
8. Con los datos obtenidos en el DSR comparamos las propiedades del asfalto envejecido con el asfalto envejecido extraído de las mezclas asfálticas con el fin de obtener parámetros que permitan mejorar las características de los asfaltos y permita mezclas mas duraderas y de mejor comportamiento ante problemas de fatiga, determinando de una manera mas exacta el comportamiento de un asfalto dentro de una mezcla asfáltica.
9. Se realizara un informe con los resultados arrojados y las recomendaciones y conclusiones que se determinan para la optimización de los materiales asfálticos.

## 2. MEZCLA ASFÁLTICA

También llamado concreto asfáltico. Es un material vial compuesto de ligante asfáltico y un agregado mineral. El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema.

### 2.1 LIGANTE ASFÁLTICO

El ligante asfáltico, es un cemento asfáltico que actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva, es un material altamente susceptible a cambios de temperatura y aplicaciones de carga que dependen de la velocidad con que se aplique. El ligante asfáltico tiene características de viscosidad que es la medida de la resistencia del material a fluir y refleja la rata de disipación de energía deformacional mediante flujo, y de elasticidad que constituye la habilidad del material de almacenar energía deformacional, que permite recobrar su forma después de haber sido deformado.

Cabe anotar que a temperaturas intermedias al asfalto tiene características visco-elásticas en la cual el asfalto al estar caliente actúa como lubricante y al enfriarse como ligante, excelente material adhesivo pero de comportamiento complejo.

Por su composición orgánica es muy susceptible al contacto con el oxígeno del medio ambiente, esta reacción se denomina oxidación y la estructura de las moléculas del asfalto se ven afectadas. El oxígeno al reaccionar con el asfalto la

estructura se hace mas dura y mas frágil encontrando el endurecimiento por envejecimiento.

## **2.1.1 Clasificación de los Componentes del Asfalto**

### **2.1.1.1 Los Asfaltenos**

Son partículas sólidas, cuyo color va desde el café oscuro hasta el negro, sin punto de fusión definido; al calentarse forman una masa viscosa que se descompone, se hincha y aglutina, dejando un residuo de carbón. Son hidrocarburos de moléculas de alto peso molecular  $10^3$  a  $10^5$  UMA (Unidades de Masa Atómica), de carácter predominantemente aromático.

Formados por sistemas de anillos aromáticos polinucleares rodeados de cadenas alquílicas de 1000 a 4000 UMA, estas a su vez se unen en grupos de 5 o 6 para formar un cristal con peso molecular de 4000 a 10000 UMA; estos cristales se agrupan formando micelas con peso molecular de 40.000 a 40.000.000 de UMA que contienen en su interior metales como Níquel y Venadio.

A estos agrupamientos se les conoce como la macroestructura de los asfaltenos. Los asfaltenos concentran los compuestos indeseables de los asfaltos, pues contienen los metales pesados y el azufre. El contenido de asfaltenos en un cemento asfáltico varia generalmente entre el 15% y un 20%.

### **2.1.1.2 Los maltenos**

Los maltenos están constituidos por anillos aromáticos, anillos nafténicos y una muy poca cadena parafínica; generalmente existe mayor proporción de maltenos que asfáltenos.

Los maltenos se separan por métodos físicos en resinas y aceites; las resinas son más pesadas que los aceites, tienen un punto de ebullición más elevado y un carácter más aromático, presentan mayor poder de absorción.

#### **2.1.1.2.1 Las Resinas y los Aceites**

Las resinas con un mayor poder de absorción y actúan como agente estabilizador de los asfáltenos, tienen un peso molecular de 1100 UMA.

Los aceites, a su vez, poseen un menor poder de absorción. Son compuestos aromáticos de nafta y componentes saturados, con un peso molecular de 700 UMA. El nivel de compuestos saturados es importante en los asfaltos, ya que las ceras o parafinas se consideran como componentes no deseables en él.

Los asfáltenos son los principales componentes del núcleo de las micelas, los aceites predominan en el líquido intermicelar y las resinas constituyen una fase intermedia entre núcleo y líquido intermicelar.



## 2.2 INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DEL ASFALTO

Los asfáltenos contienen las moléculas más pesadas del asfalto con un carácter aromático muy marcado, presentándose un descenso de esta característica en la serie resinas y aceites. Los asfáltenos están formados por hidrocarburos aromáticos, mientras que en los maltenos existe principalmente hidrocarburos saturados.

Los asfáltenos son los responsables de la dureza de los asfaltos. Las resinas le proporcionan sus características cementantes o aglutinantes, mientras que los aceites la consistencia necesaria para hacerlos trabajables.

Los aceites son líquidos poco viscosos, de color claro, no adherentes, muy estables y semejantes a los aceites lubricantes

Las resinas son cuerpos traslúcidos, semisólidos y muy adherentes. Su adhesividad se debe al contenido de aromáticos y a los ácidos nafténicos.

Un asfalto con un alto contenido de aceites, se comportara como un fluido viscoso, ya que las micelas formadas por los asfáltenos rodeados de las resinas absorbidas, flotarán en el líquido aceitoso sin tocarse.

Cuando el asfalto es sometido a los efectos del calentamiento en la planta, se va presentando una reducción gradual de los aceites, hay un acercamiento entre los núcleos de los asfáltenos y la fricción originada hace que el asfalto incremente su viscosidad.

Según Hugo León Arenas Lozano en su trabajo "Tecnología del cemento asfáltico" en los cementos asfálticos normales hay un predominio de los asfáltenos y las resinas, ante un bajo contenido de los aceites.

## 2.3 AGREGADO MINERAL

Como se mencionaba anteriormente le da la resistencia y rigidez al sistema de la mezcla, su origen puede ser natural o extraído de las canteras realizando un tamizado para ser clasificado según el tamaño.

En muchos casos el agregado es de origen sintético, esto quiere decir que no es ni extraído de canteras, ni natural, un ejemplo de ello es la escoria de alto horno, estos tipos de agregados se utilizan para aportar características especiales necesarias en mezclas.

Es recomendable que los agregados tengan textura rugosa y no lisa, que sean de forma no redondeada para obtener mayor resistencia, debido a que las partículas angulares se agrupan mas fácilmente dando como resultado mayor fuerza de la mezcla.

El comportamiento al corte de los agregados se puede explicar por medio de la teoría de Mohr Coulomb en la cual la resistencia al corte depende de: cuan unidas estén las partículas del agregado, la tensión normal a la que están sometidos los agregados y la fricción interna de los agregados.

La ecuación de Mohr Coulomb para expresar la resistencia al corte de un material es:

$$\tau = X + \sigma \tan \varphi$$

$\tau$ : Es la resistencia al corte de la mezcla de los agregados

$\sigma$ : Es la tensión normal a la cual esta sujeto el agregado

$X$ : Es la cohesión del agregado

$\varphi$ : Es el ángulo de fricción interna

La resistencia al corte depende de la oposición al movimiento que ofrecen los agregados, una masa de agregados tiene baja cohesión, mayor ángulo de fricción; al aumentar el ángulo de fricción aumenta la capacidad del agregado para entrelazarse y así, la masa de agregado se vuelve mas fuerte.

### 3. TIPOS DE DETERIOROS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

#### 3.1 DEFORMACIÓN PERMANENTE

Es causada por cargas de tráfico repetidas, se observa que es mas critica a temperaturas altas, se llama deformación permanente por la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por cargas, esta deformación es irrecuperable. Para disminuir el ahuellamiento se utilizan materiales más rígidos que en cierta medida son efectivos.

Generalmente el problema se presenta por la sección de pavimento muy delgada, la cual sin la profundidad suficiente no permite reducir las tensiones sobre la subrasante cuando las cargas se aplican, también se presenta por posible infiltración de humedad en la subrasante convirtiéndola en un soporte débil el cual repercutirá en la deformación de la capa asfáltica.

Otra de las causas por la cual se presenta ahuellamiento la poca resistencia al corte de la mezcla asfáltica, lo que la hace muy débil para soportar cargas a las cuales se ve sometida.

Cuando una mezcla asfáltica tiene baja resistencia al corte cuando se le aplican cargas pequeñas o grandes la deformación será permanente. Las altas temperaturas se asocian con ahuellamiento.

Se determino que tanto el agregado mineral como el ligante asfáltico son responsables del ahuellamiento.

Debido a que el ahuellamiento es una acumulación de pequeñas deformaciones, la resistencia al corte en la mezcla se asegura con un cemento asfáltico de comportamiento muy elástico a altas temperaturas, así cuando se apliquen cargas la mezcla recuperara con mayor facilidad su estado original, hay que tener en cuenta que con un agregado con buena rugosidad y angularidad tendrá un buen contacto entre partículas y dará mayor resistencia a la mezcla.

### **3.2 FISURACIÓN POR FATIGA**

Se presenta donde las cargas son aplicadas, es mas critica a temperaturas intermedias del pavimento, generalmente ocurre tarde en la vida del pavimento. Se puede hablar de un deterioro progresivo, pues es el producto de fisuras iniciales que se unieron con otras. En las vías esto se ve reflejado por un deterioro progresivo llamado piel de cocodrilo porque la forma de la fisuración se asemeja a la piel de un cocodrilo. Estas fisuras se presentan en la dirección del transito.

Cuando la mezcla asfáltica es muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga, se ha determinado que cuando en la subrasante el drenaje es de baja calidad los pavimentos se convierten en blandos con grandes posibilidades de deflectarse ocasionando inevitablemente la fisuración por fatiga.

Capas de pavimentos muy delgadas y muy rígidas expuestas a cargas repetidas son susceptibles a fatigarse.

La fisuración por fatiga es el signo de “agotamiento” de los pavimentos y muestra que debe ser rehabilitado.

Según T.W Kennedy y R.M. Anderson “The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays”, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-407, 1994, la mejor forma de superar el fisuramiento por fatiga es:

- Estimación del número de cargas pesadas en la etapa de diseño
- Mantener, por todos los medios posibles, seca la subrasante
- Usar pavimentos de mayor espesor
- Emplear materiales que no sean excesivamente débiles ante la presencia de la humedad y
- Utilizar materiales para pavimentos que sean lo suficientemente resilientes para resistir deflexiones normales.

La humedad no afecta en gran medida las mezclas asfálticas, una base no ligada cuyas partículas finas impiden el rápido drenaje del agua permitirá que se presente fisuración por fatiga.

La mezcla asfáltica para evitar fisuración por fatiga debe ser un material elástico blando, esto se logra con un cemento asfáltico de propiedades blandas con límites superiores ubicados en la parte elástica de su rigidez.

### **3.3 FISURACIÓN POR BAJA TEMPERATURA**

Es un deterioro causado por las condiciones del medio ambiente. Se caracteriza por fisuras perpendiculares ala dirección del transito. Se presenta cuando una capa de pavimento se contrae en climas fríos. Las tensiones de tracción exceden la resistencia a tracción del pavimento y se presenta la fisuración, se puede presentar también por varios ciclos climáticos fríos.

El papel del ligante asfáltico es determinante en la fisuración por baja temperatura, se recomienda usar un ligante blando, un ligante no muy propenso al envejecimiento, hay que controlar el contenido de vacíos en el ligante para evitar que resulte oxidado.

## 4. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para el diseño de mezclas asfálticas se utilizó el método Marshall, el cual por medio de un experimento de laboratorio determina la mezcla más adecuada por medio del análisis de:

### **Estabilidad / Fluencia**

### **Densidad / Vacíos**

La relación densidad – vacíos garantiza que las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla están dentro de los rangos adecuados que garanticen una mezcla duradera.

El objetivo del ensayo es determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico con el fin de obtener un pavimento más durable en el cual se garantice la compactación adecuada con una condición en la cual las partículas son adecuadamente ligadas, que la mezcla sea lo suficientemente manejable que permita la compactación sin llegar a segregarse, adecuado contenido de vacíos en el momento en que la mezcla entre en contacto con las cargas y se vea expuesta a diferentes temperaturas.



## 5. PROTOCOLO SUPERPAVE PARA LIGANTES ASFÁLTICOS

Superpave es el producto de SHRP (programa estratégico de investigación en carreteras), este programa es un sistema integrado de: selección de materiales, diseño de mezclas asfálticas, ensayos de desempeño de mezclas asfálticas y predicción del desempeño del pavimento.

El superpave es una nueva especificación sobre ligantes asfálticos con un conjunto de ensayos, esta es una especificación basada en el desempeño (Performance), especifica ligantes en base al clima y a la temperatura prevista en el pavimento, las propiedades físicas exigidas se mantienen, pero cambia la temperatura para la cual los ligantes cumplen propiedades relacionadas con la rigidez.

Se determina el grado Performance a mayor y menor temperatura en el cual va a tener un óptimo desempeño el asfalto.

El objetivo de utilizar este sistema es definir características químicas y físicas del asfalto y su relación con el desempeño en sistemas de pavimentos, a si mismo se espera mejorar la capacidad de diseño y mejorar el control sobre los materiales para obtener beneficios económicos.

Como ya lo habíamos mencionado las altas temperaturas y cargas aplicadas a baja velocidad hace que el asfalto tenga un comportamiento como fluido viscoso, así mismo experimenta deformación permanente, la mezcla se hace plástica y se presenta el ahuellamiento: A bajas temperaturas y cargas aplicadas a gran

velocidad forman un comportamiento del asfalto como sólido elástico y se presentan fisuramientos térmicos, la mezcla se hace vidriosa y ocurren fisuramientos horizontales.

Las propiedades físicas de los asfaltos se pueden medir mediante diferentes equipos:

- RTFO: Simula el envejecimiento del ligante por oxidación que ocurre durante mezcla y compactación en el horno de película delgada.
- PAV: Simula el envejecimiento que sufre el ligante después de varios años de entrar en servicio.
- Reómetro de corte dinámico (DSR): Se utiliza para caracterizar las propiedades visco-elásticas del ligante.
- Viscosímetro Rotacional (RV): caracteriza la rigidez del asfalto a 135° C, temperatura a la cual actúa casi enteramente como un fluido.
- Reómetro de Flexión (BBR): El cual se usa para caracterizar las propiedades de rigidez de los ligantes a bajas temperaturas.
- DDT: Ensayo que provee la deformación específica de falla (rotura) en tracción.

## 5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS AGREGADOS MINERALES EN EL DESEMPEÑO DE UN PAVIMENTO

El Agregado mineral también juega un rol clave en el desempeño de la mezcla. En el sistema superpave se tienen en cuenta dos tipos de propiedades:

### 5.1.1 Propiedades de Consenso

Son las propiedades críticas para alcanzar un elevado desempeño en la mezcla, estas propiedades dependen del nivel del tránsito y mezclas para la carpeta de rodamiento, estas son:

- **Angularidad del agregado grueso:**

Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm (No. 4) con una o más caras fracturadas. Usualmente deben contarse las partículas manualmente para determinar las caras fracturadas. Como norma se puede utilizar la "Pennsylvania DOT's Test Method No. 621". Los requerimientos en Superpave son:

TABLA 5.1 ANGULARIDAD DEL AGREGADO GRUESO

| Tránsito en<br>10 ESALs | Profundidad desde la<br>superficie, < 100 mm | Profundidad desde la<br>superficie, > 100 mm |
|-------------------------|--|--|
| < 0.3                   | 55/-   | -/-  |
| < 1                     | 65/-   | -/-  |
| < 3                     | 75/-   | 50/-   |
| < 10                    | 85/80*                                       | 60/-   |
| < 30                    | 95/90  | 80/75  |
| < 100                   | 100/100                                      | 95/90  |
| ≥ 100                   | 100/100                                      | 100/100                                      |

\* “85/80: 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y 80% tiene dos caras fracturadas.

FUENTE: R.J. Cominsky, R.B. Leahy y E.T. Harrigan, “Level one mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning”, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, 1994.

- **Angularidad del agregado fino**

Esta propiedad asegura un grado alto de la fricción interna del agregado fino y de la resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados, menores de 2.36 mm (No. 8). Un procedimiento de ensayo promulgado por la “National Aggregates Association” se usa para medir esta propiedad. Los requerimientos en Superpave son:

**TABLA 5.2 ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO**

| <b>Tránsito en<br/>10 ESALs</b> | <b>Profundidad desde la<br/>superficie, &lt; 100 mm</b> | <b>Profundidad desde la<br/>superficie, &gt; 100 mm</b> |
|---------------------------------|---|---|
| < 0.3                           | -   | -   |
| < 1                             | 40  | -   |
| < 3                             | 40  | 40  |
| < 10                            | 45  | 40  |
| < 30                            | 45  | 40  |
| < 100                           | 45  | 45  |
| $\geq 100$                      | 45  | 45  |

FUENTE: R.J. Cominsky, R.B. Leahy y E.T. Harrigan, "Level one mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, 1994.

- **Partículas alargadas y chatas**

El procedimiento es la norma ASTM D 4791. Los requerimientos en Superpave son:

**TABLA 5.3 PARTÍCULAS ALARGADAS Y CHATAS**

| Tránsito en 10 ESALs | Porcentaje | Equivalente de arena mínimo |
|----------------------|------------|-----------------------------|
| < 0.3                | -          | 40                          |
| < 1                  | -          | 40                          |
| < 3                  | 10         | 40                          |
| < 10                 | 10         | 45                          |
| < 30                 | 10         | 45                          |
| < 100                | 10         | 50                          |
| $\geq 100$           | 10         | 50                          |

FUENTE: R.J. Cominsky, R.B. Leahy y E.T. Harrigan, "Level one mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, 1994.

- **Contenido de arcilla**

La norma para determinar el contenido de arcilla es la AASHTO T 176

Determinando la angularidad de los agregados se busca lograr un ángulo de fricción mas alto, por consiguiente una alta resistencia la corte y como consecuencia resistencia al ahuellamiento.

### 5.1.2 Propiedades de Origen del Agregado

Son utilizadas para calificar las fuentes locales de los agregados, estas son:

- Tenacidad
- Durabilidad, y

- Materiales deletéreos

Para determinar las propiedades de origen del agregado se realizan los siguientes ensayos:

- Resistencia a la abrasión en la máquina de los Ángeles (AASHTO T 96)
- Ataque con sulfato de sodio o magnesio (AASHTO T 104)
- Materiales deletéreos (AASHTO T 112),

## 5.2 SELECCIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO

Los ligantes asfálticos se seleccionan con base en el desempeño y el clima.

La temperatura para la cual los requerimientos deben cumplirse es lo que diferencia a los varios grados de ligantes, tanto para altas temperaturas como para bajas, en la siguiente tabla se especifica los grados del ligante asfáltico.

**TABLA 5.4 GRADOS DE LIGANTE SUPERPAVE**

| Alta temperatura | Baja temperatura           |
|------------------|----------------------------|
| PG 46-           | 34, 40, 46                 |
| PG 52-           | 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46 |
| PG 58-           | 16, 22, 28, 34, 40         |
| PG 64-           | 10, 16, 22, 28, 34, 40     |
| PG 70-           | 10, 16, 22, 28, 34, 40     |
| PG 76-           | 10, 16, 22, 28, 34         |
| PG 82-           | 10, 16, 22, 28, 34         |

FUENTE: T.W Kennedy y R.M. Anderson “The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays”, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-407, 1994.

Esta tabla muestra los grados de ligantes corrientes en la especificación SHRP de ligantes.

Los usuarios pueden seleccionar el grado del ligante de acuerdo a:

- Áreas Geográficas: Se desarrolla un mapa sectorizado por climas y/o decisiones políticas
- Por temperatura del Pavimento: Se necesita conocer la temperatura de diseño del pavimento.
- Por temperatura del Aire: esta temperatura es clave para utilizarse como temperatura del pavimento.



## 6. ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO DE BARRANCABERMEJA

Según Natalia Afanasieva, Mario Álvarez y Javier Arellano en su artículo “Envejecimiento natural de los asfaltos” el envejecimiento del asfalto es causado principalmente por factores del medio ambiente o por acción indirecta del hombre, las cuales se pueden ordenar de la siguiente forma:

- Medio ambiente: oxígeno u ozono, radiación solar global, temperatura ambiente, agua, sales y otros componentes inorgánicos (ácidos, óxidos), organización estratigráfica y actividad sísmica
- Envejecimiento físico o endurecimiento por evaporación de los compuestos livianos, que hace que el asfalto se torne rígido, porque la circulación de aire, que implica el paso del oxígeno dentro del asfalto, hace que el material se endurezca al aumentar las fuerzas de interacción entre moléculas reduciendo así la movilidad molecular.
- Envejecimiento químico o termoxidante, que involucra cambios moleculares en la composición química del asfalto.

Estos dos fenómenos conllevan al envejecimiento fisicoquímico constante, progresivo y de carácter irreversible debido a la complejidad de los componentes pesados de los ligantes obtenidos del petróleo.

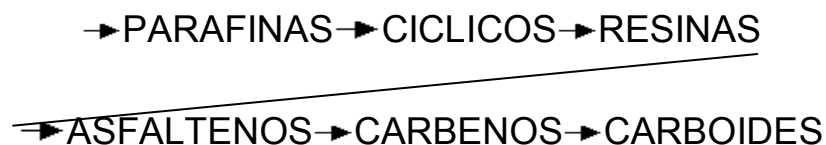
En cuanto al envejecimiento químico, se considera que la causa principal del endurecimiento y deterioro del asfalto es la interacción del mismo con el ambiente.

Se cree que el fenómeno de endurecimiento – envejecimiento se debe principalmente a la oxidación del material asfáltico con el oxígeno de la atmósfera.

El endurecimiento oxidativo es una reacción química irreversible que incrementa en los asfaltos los compuestos con el grupo funcional carbonilo, como cetonas, aldehídos y compuestos con el sulfogruppo. La velocidad del proceso de envejecimiento depende también de la severidad de los niveles de la temperatura ambiente, el tiempo, el acceso del oxígeno al asfalto y la reactividad intrínseca del ligante.

En presencia de la luz se aceleran las reacciones químicas características del envejecimiento foto oxidativo. En este caso el espectro de onda de rayos ultravioleta es absorbido por el asfalto y actúa como catalizador para la oxidación; la reacción es entonces mucho más rápida. En algunas publicaciones se muestra que la incidencia de estos rayos alcanza aproximadamente hasta 10 micrones de profundidad de la capa del ligante.

Los cambios en la composición genérica de los asfaltos muestran que el envejecimiento del asfalto puede ser representado por la siguiente secuencia de reacciones de transformación de los compuestos de menor peso molecular en los compuestos más complejos y de carácter policicloaromático:



El aumento en la formación de la fracción de los asfáltenos es la manifestación más clara del endurecimiento del asfalto por el envejecimiento fisicoquímico del mismo.

Se ha demostrado que a pesar de que los asfaltenos presentes originalmente son químicamente diferentes de los que se forman por el envejecimiento oxidativo, ambos tipos tienen un efecto similar sobre la viscosidad del asfalto.

Teniendo en cuenta el reporte meteorológico obtenido se observa que la variación en la temperatura del aire es más significativa durante el día que en la noche, donde se mantiene prácticamente constante.

Analizando la influencia de los factores climáticos en el cambio de las propiedades de los asfaltos, se observó que la temperatura es el factor determinante, por encima de la combinación de todos los factores climáticos

## **6.1 METODOLOGÍA**

Para lograr los objetivos propuestos en esta investigación se empleo material asfáltico de Barrancabermeja, el cual fue suministrado por Agregados Patria.

### **6.1.1 Características del Asfalto a emplear**

El asfalto del Complejo Industrial de Barrancabermeja fue seleccionado entre otros asfaltos como el Cartagena y el de Apiay por sus características físicas las cuales se encuentran en la siguiente tabla.

**TABLA 6.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA INICIAL DEL ASFALTO  
PROVENIENTE DEL COMPLEJO INDUSTRIAL DE  
BARRANCABERMEJA (CIB), CARTAGENA (CAR) Y APIAY  
DETERMINADA POR CROMATOGRFÍA LÍQUIDA EN COLUMNA  
EMPACADA**

| <b>• FRACCION (%)</b> | <b>CIB</b>     | <b>CAR</b> | <b>APIAY</b> |
|-----------------------|----------------|------------|--------------|
| <b>ASFALTENOS</b>     | <b>7,7284</b>  | 11,3553    | 17,9263      |
| <b>SATURADOS</b>      | <b>15,8509</b> | 18,5225    | 19,9164      |
| <b>AROMATICOS</b>     | <b>61,3015</b> | 59,8424    | 48,4653      |
| <b>RESINAS</b>        | <b>13,7024</b> | 14,0252    | 10,2160      |

FUENTE: AFANASIEVA Natalia, ALVAREZ Mario y AREYAN Javier. "Envejecimiento natural de los asfaltos colombianos", XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, 1994.

### **6.1.2 Comportamiento del Asfalto de Barrancabermeja frente al proceso de envejecimiento**

Según Natalia Afanasieva, Mario Álvarez y Javier Arellano en su artículo "Envejecimiento natural de los asfaltos" este asfalto es el de mayor penetración, inicialmente 82 y luego de envejecido valores mayores a 50, por tanto es el asfalto más blando y el más fácil de manejar en pavimentación y posiblemente con mejor grado de adherencia o grado de cubrimiento de los agregados pétreos

El proceso de endurecimiento del asfalto de Barranca es progresivo, presentando menor estabilidad cuando se encuentra solo que cuando es extraído de la mezcla con agregado, además los valores de penetración del asfalto extraído son menores que los del asfalto puro, es decir que el asfalto cuando está en contacto con un agregado, tipo caliza, tiende a volverse más duro con el tiempo o se endurece más rápido.

La temperatura influye en mayor grado en el endurecimiento de los asfaltos que la radiación solar.

El asfalto más estable, en cuanto al endurecimiento es el que se extrae de la mezcla con agregado, independiente de los factores climáticos incidentes en la muestra.

Se ha determinado que el asfalto con menor TAB temperatura de ablandamiento en esta zona es el de Barranca con 51.8°C y 49.5°C medidos según estudio de los investigadores mencionados de la UIS (Universidad Industrial de Santander).

El asfalto de Barranca según estudios es el asfalto más blando, inicialmente su temperatura punto de ablandamiento es de 47.2°C, y va aumentando con el tiempo de exposición.

El asfalto extraído de la mezcla con agregado se comporta de manera similar al asfalto puro, el asfalto en contacto con calizas es menos sensible a todos los factores ambientales que por separado, Entonces, si el asfalto solo es muy susceptible a la temperatura, las mezclas asfalto-agregado deben tener mayor resistencia no solo contra el calor, sino contra el agua, la humedad y la radiación.

Se ha demostrado que el asfalto menos viscoso es el de Barranca, es decir es el que tiene menor resistencia al flujo.

Los datos reportados sobre la composición química de los asfaltos fueron obtenidos por cromatografía líquida en columna empacada con absorbente sólido (sílica gel) o análisis SARA.

Es un asfalto sólido con una baja susceptibilidad al envejecimiento lo que lo cataloga como de gran calidad y buena resistencia al uso.

La resistencia al envejecimiento presentada por el asfalto de Barranca ratifica su posicionamiento en el mercado nacional como el más empleado, además de ser el que se produce en mayores proporciones.

## 7. ENSAYOS DE LABORATORIO

### 7.1 DISEÑO MARSHALL – RODADURA MDC 2

#### 7.1.1 Metodología

Para la elaboración del diseño de la rodadura MDC 2 se utilizó arena de Guamo y de Paquito, finos triturados y gravas 5/8" y 3/8" provenientes de la cantera Patria (Mosquera). Estos agregados fueron mezclados en las siguientes proporciones con el fin de que la granulometría de la mezcla encajara dentro de los rangos establecidos en las normas para las rodaduras MDC 2.

**TABLA 7.1 AGREGADOS DE LA MEZCLA**

| <b>AGREGADOS DE LA MEZCLA</b> | <b>%</b> |
|-------------------------------|----------|
| ARENA (Paquito)               | 21%      |
| GRAVA 5/8"                    | 24%      |
| GRAVA 3/8"                    | 28%      |
| FINOS TRITURADOS              | 6%       |

### **7.1.2 Norma de Referencia**

La mezcla de los agregados cumple con los rangos establecidos para la rodadura MDC 2 en las especificaciones INVIAS Artículo 450-96.

### **7.1.3 Procedimiento**

Se ensayaron mezclas con contenidos de asfaltos de 5% a 7% incrementando en 0.5% el porcentaje de asfalto proveniente de Barrancabermeja. El diseño Marshall fue realizado compactando cada probeta con 75 golpes por cara. Se analizaron las propiedades de Estabilidad, Flujo, Peso Unitario, Vacíos en los agregados Minerales y vacíos en la Mezcla, para cada una de las mezclas y se concluyó que el porcentaje de asfalto óptimo es 6.3%.

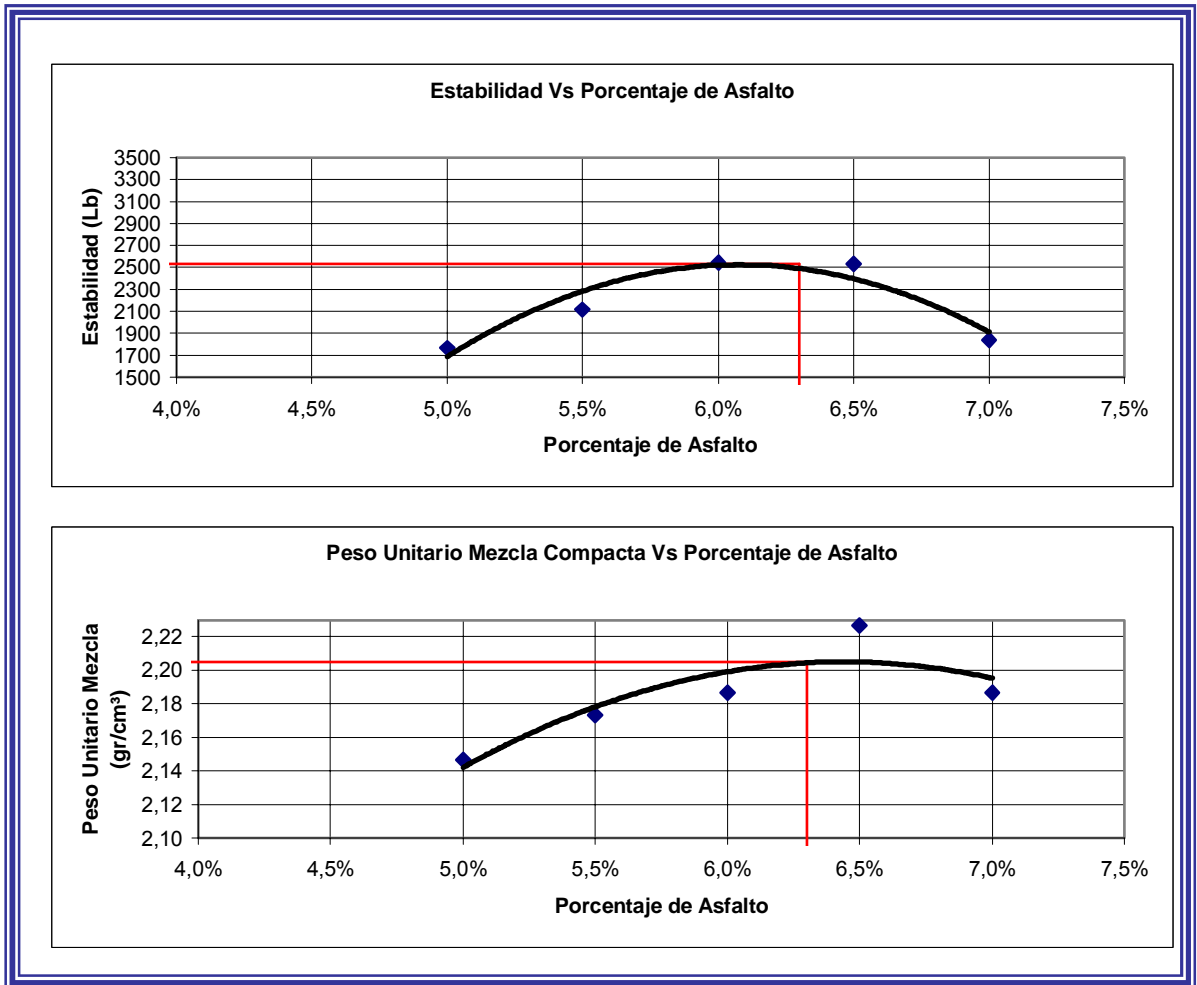
Para este porcentaje de asfalto se tiene:

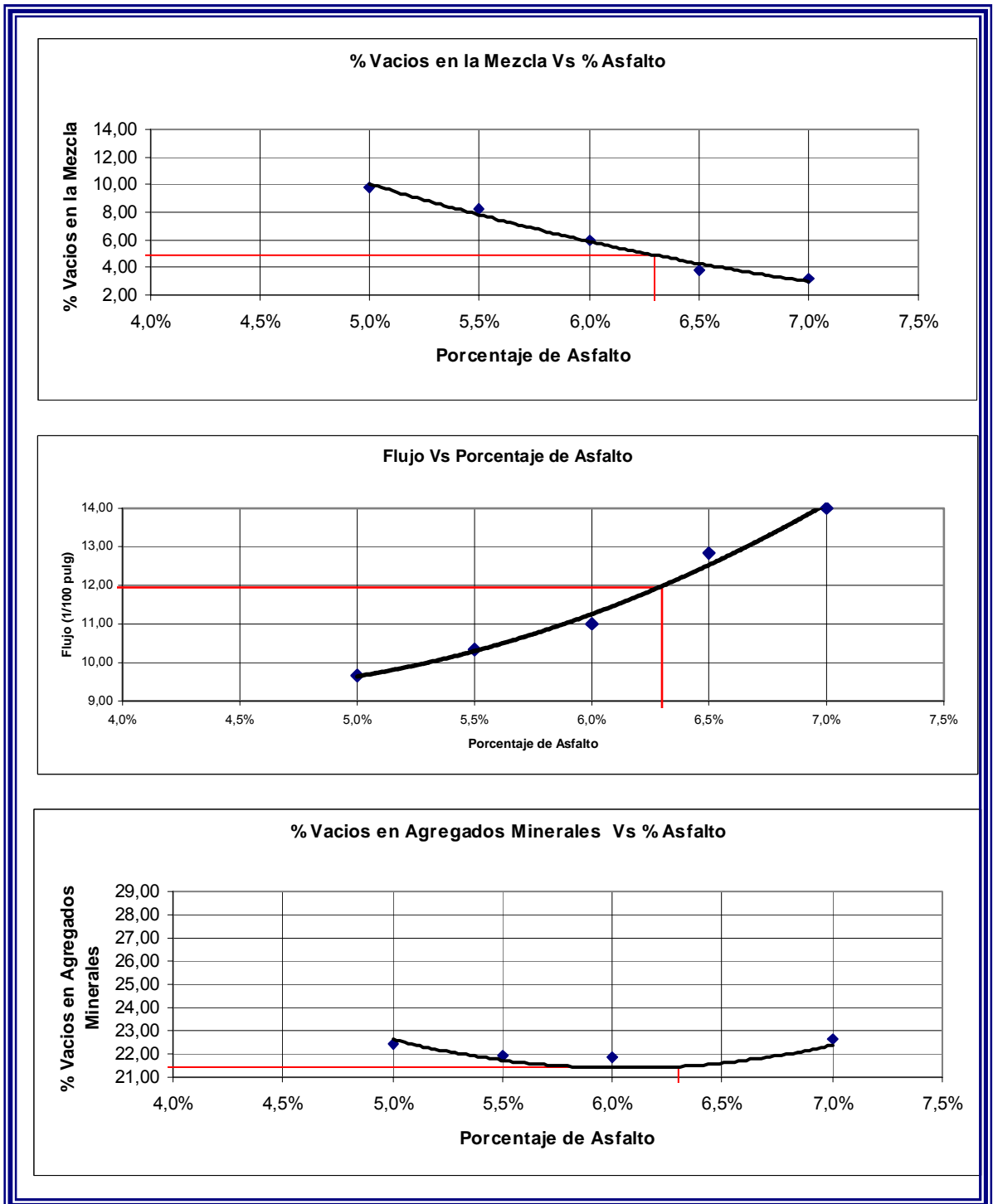


TABLA 7.2 DATOS DISEÑO MARSHALL

| Porcentaje  | Flujo | Estabilidad | Peso Unitario | % Vacíos en los agregados minerales | %Vacíos en la mezcla |
|-------------|-------|-------------|---------------|-------------------------------------|----------------------|
| <b>5,0%</b> | 9,7   | 1768        | 2,15          | 22,46                               | 9,80                 |
| <b>5,5%</b> | 10,3  | 2115        | 2,17          | 21,91                               | 8,30                 |
| <b>6,0%</b> | 11,0  | 2543        | 2,19          | 21,85                               | 5,91                 |
| <b>6,5%</b> | 13    | 2534        | 2,23          | 20,84                               | 3,77                 |
| <b>7,0%</b> | 14    | 1840        | 2,19          | 22,68                               | 3,24                 |

**FIGURA 7.1 RESULTADOS DISEÑO MARSHALL**





### 7.1.4 Resultados obtenidos

**TABLA 7.3 PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFÁLTICA**

| Propiedad                         | Norma INV 450-96 | Mezcla  |
|-----------------------------------|------------------|---------|
| Estabilidad (lb.)                 | 1653 min.        | 2533.67 |
| Flujo (1/1000 pulg.)              | 8 a 14           | 11,94   |
| Vacíos con Aire                   | 4 a 6            | 4,85    |
| Vacíos en agregados minerales (%) | 15 min.          | 21,4    |

### 7.2 ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA EN HORNO ROTATIVO (RTFO).

**FIGURA 7.2 RTFO (CITEC)**



### **7.2.1 Metodología**

El ensayo RTFO simula el envejecimiento experimentado durante la producción y colocación del pavimento.

### **7.2.2 Norma de Referencia**

Norma INVE-708 "Perdidas por calentamiento de aceites y compuestos asfálticos (RTFO).

### **7.2.3 Procedimiento**

Aproximadamente 35 gm del material son colocados en frascos cilíndricos dentro de un horno rotatorio y sometidos al efecto del aire y el calor durante 85 minutos en un horno a 163°C.

Según el Instituto Chileno del asfalto en su boletín técnico No 4 de Septiembre de 2001 este ensayo tiene como ventajas:

- Más receptible (preciso)
- Tiempo de ensayo cortó.
- Útil en asfaltos modificados.

## 7.2.4 Resultados

Se determino la perdida de masa por calentamiento arrojando como resultado para asfalto de Barrancabermeja en promedio de las muestras un porcentaje de pérdida de masa de 0.03%

## 7.3 ENSAYO PAV

**FIGURA 7.3 PAV, ENVASE DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN,  
(CITEC)**



### 7.3.1 Metodología

Este método de ensayo cubre el envejecimiento acelerado (oxidación) de cementos asfálticos por medio de aire presurizado y temperatura elevada. Este ensayo intenta simular el envejecimiento por oxidación del cemento asfáltico en servicio y está encaminado para usarse con residuo del ensayo RTFO y como complemento en nuestra investigación simulamos envejecimiento de mezcla asfáltica.

El envejecimiento del cemento asfáltico durante el servicio es afectado por variables asociadas a las mezclas tales como las proporciones volumétricas de la mezcla, propiedades de los agregados, y posiblemente otros factores. Este ensayo intenta proporcionar una evaluación de la resistencia relativa de diferentes cementos asfálticos envejecidos por oxidación a temperaturas seleccionadas y no puede considerar otras variables de la mezcla.

### 7.3.2 Procedimiento

El cemento asfáltico es primeramente envejecido realizando el procedimiento de ensayo (RTFOT). Un espesor especificado del residuo, del RTFOT, es colocado en bandejas estándar de acero TFOT (T179) y envejecido a una temperatura de envejecimiento de 100°C por 20 horas en una cámara presurizada con aire a 2.1 Mpa.

Así mismo fabricamos briguetas que por medio de un molde colocamos dentro del equipo PAV a 100°C y a una presión de 2.1 MPA para luego ser utilizadas en el ensayo de fatiga, la temperatura y la presión es la misma que con asfaltos con el fin de poder hacer una comparación real y determinar los cambios que sufre el asfalto

luego de ser envejecido y fatigado, para ello una vez la mezcla es envejecida se procede a extraer el asfalto y a ser analizado. Para finalizar el proceso PAV el cemento asfáltico es entonces desaireado con vacío.

## 7.4 RESISTENCIA A LA FATIGA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

El comportamiento a la fatiga se estudia por medio de ensayos de flexión realizados a 25°C y 10 Hz. El principio del ensayo se basa en someter una probeta trapezoidal a un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante en la parte superior. Las probetas deben estar sujetas en su base inferior; en la base superior se les aplica un tren de ondas continuas sinusoidales a una amplitud dada hasta la ruptura convencional. La ruptura se define en el momento en que la fuerza que se aplica en el extremo de la probeta se reduce a la mitad. Es necesario evaluar varias amplitudes del desplazamiento para determinar la pendiente de la ley de fatiga  $b$ , y el valor de la deformación admisible para  $10^6$  ciclos.

**FIGURA 7.4 MEZCLA FATIGADA**

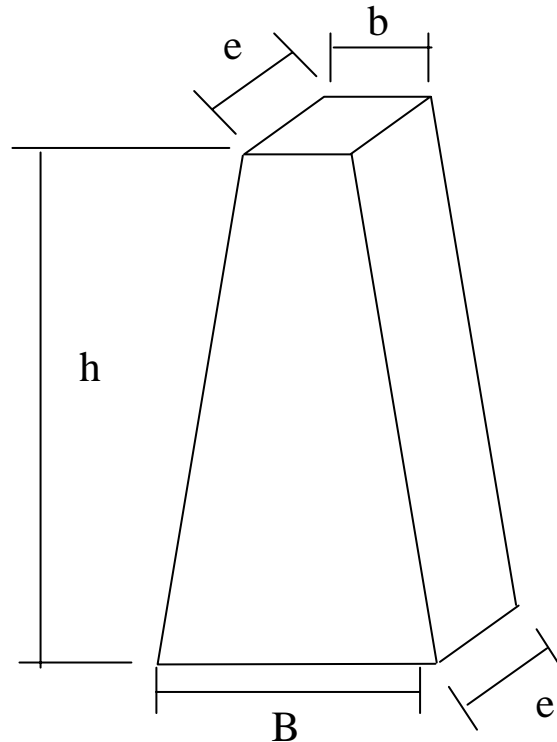


Las probetas son de forma trapezoidal isósceles de espesor constante, con altura (h) de 250 mm, espesor (e) de 25 mm y bases mayor y menor de (B) 70 mm y (b)



25 mm respectivamente. Este ensayo se realizó siguiendo la norma francesa NFP-98-260.

**FIGURA 7.5 FORMA DE LAS PROBETAS**



Debemos describir la máquina del ensayo como un sistema capaz de aplicar una flexión sinusoidal en la cabeza de la probeta y presentar, regulando el impulso en cabeza impuesto, una variación promedio del impulso en cabeza  $< 0.1$  m/N cuando la fuerza aplicada en la cabeza varía de 100 a 300 N. Para las necesidades particulares, el ensayo puede ser realizado a frecuencias diferentes, constantes 5% cerca durante la duración del ensayo.

El empotramiento de los soportes de fijación de los zócalos de las probetas con respecto al armazón rígido de las máquinas puede ser tal que el impulso impuesto en cabeza, por una probeta metálica, la deformación medida sobre la máquina de ensayo no sea inferior al 5% de aquella medida sobre un armazón en L de acero de 8 cm. mínimo de sección sobre una sollicitación del orden de 200 N.

Las probetas deben conservarse después de su corte durante un período de 15 días a dos meses antes de ser falladas, antes de pasarlas a la máquina de ensayo, cada probeta debe ser pegada por su base mayor a la ranura (del orden de 2mm) de un zócalo metálico de espesor mínimo de 20 mm.

Esta operación debe efectuarse de tal manera que se garantice el posicionamiento de las probetas sobre el armazón, un casco pegado a la cabeza de la probeta, permite la aplicación de la sollicitación.

#### **7.4.1 Norma de Referencia**

Norma Francesa NFP 98-261-1 para fatiga en las mezclas asfálticas.

#### **7.4.2 Operación del Ensayo**

Para comenzar el ensayo es necesario que la temperatura del recinto alcance la temperatura del ensayo, después de 4 horas el ensayo puede comenzar.

La probeta es sollicitada sinusoidalmente en la cabeza con un impulso de cierta amplitud impuesto en esta. Esta corresponde a la deformación relativa deseada,

entre 100 y 500 ciclos, se registran los valores promedios de las fuerzas de reacción. Este valor es el valor inicial de la fuerza de reacción

Cuando la fuerza de reacción se hace inferior a dos quintos de su valor inicial, el ensayo puede detenerse.

La deformación relativa se determina en el ensayo utilizando tres niveles de deformación con seis repeticiones mínimas por nivel.

Los niveles de deformación son escogidos en función del material de tal forma que al menos dos de las duraciones de vida de las series estén entre  $10^4$  y  $10^6$  ciclos, y una entre  $10^6$  y  $10^7$ .

TABLA 7.4 ENSAYO DE FATIGA PARA ASFALTO ORIGINAL

| Probeta N° | Minutos | Segundos | N                | Deformaciones |
|------------|---------|----------|------------------|---------------|
|            |         |          | $N = t(s)/(1/f)$ | Et            |
| 1          | 3940    | 236400   | 2364000          | 9,00E-05      |
| 2          | 3830    | 229800   | 2298000          | 9,00E-05      |
| 3          | 3099    | 185940   | 1859400          | 9,00E-05      |
| 4          | 3217    | 193020   | 1930200          | 9,00E-05      |
| 1          | 2521    | 151260   | 1512600          | 1,50E-04      |
| 2          | 1978    | 118680   | 1186800          | 1,50E-04      |
| 3          | 2103    | 126180   | 1261800          | 1,50E-04      |
| 4          | 2304    | 138240   | 1382400          | 1,50E-04      |
| 1          | 527     | 31620    | 316200           | 2,20E-04      |
| 2          | 752     | 45120    | 451200           | 2,20E-04      |
| 3          | 847     | 50820    | 508200           | 2,20E-04      |
| 4          | 879     | 52740    | 527400           | 2,20E-04      |

|                |             |
|----------------|-------------|
| Deformación E6 | 1,58E-04    |
| b              | -0,5081     |
| alfa           | 1,968116512 |
| f (HZ)         | 10          |

**FIGURA 7.6 DEFORMACIONES (Et) Vs REPETICIONES DE CARGA  
 PARA ASFALTO ORIGINAL**

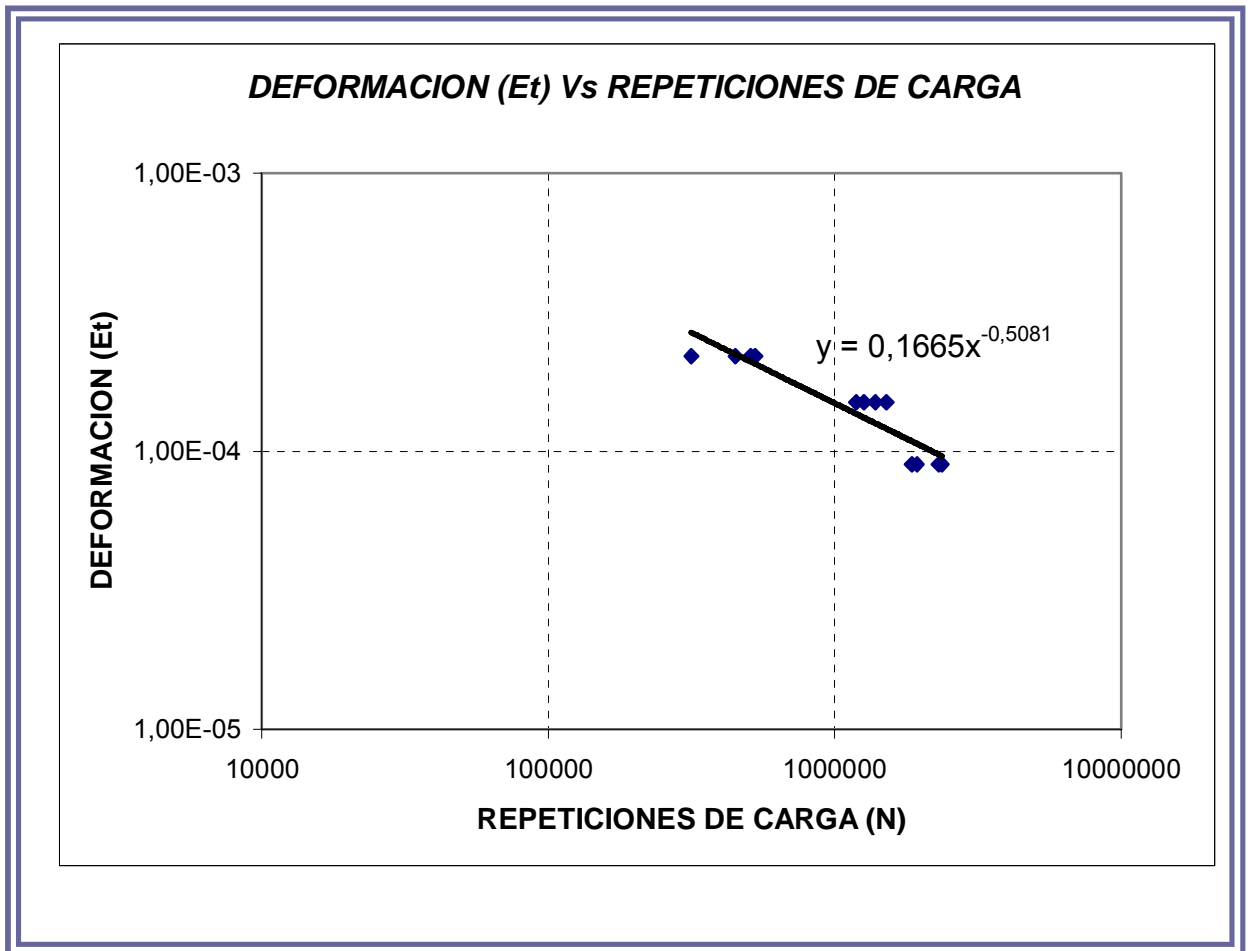
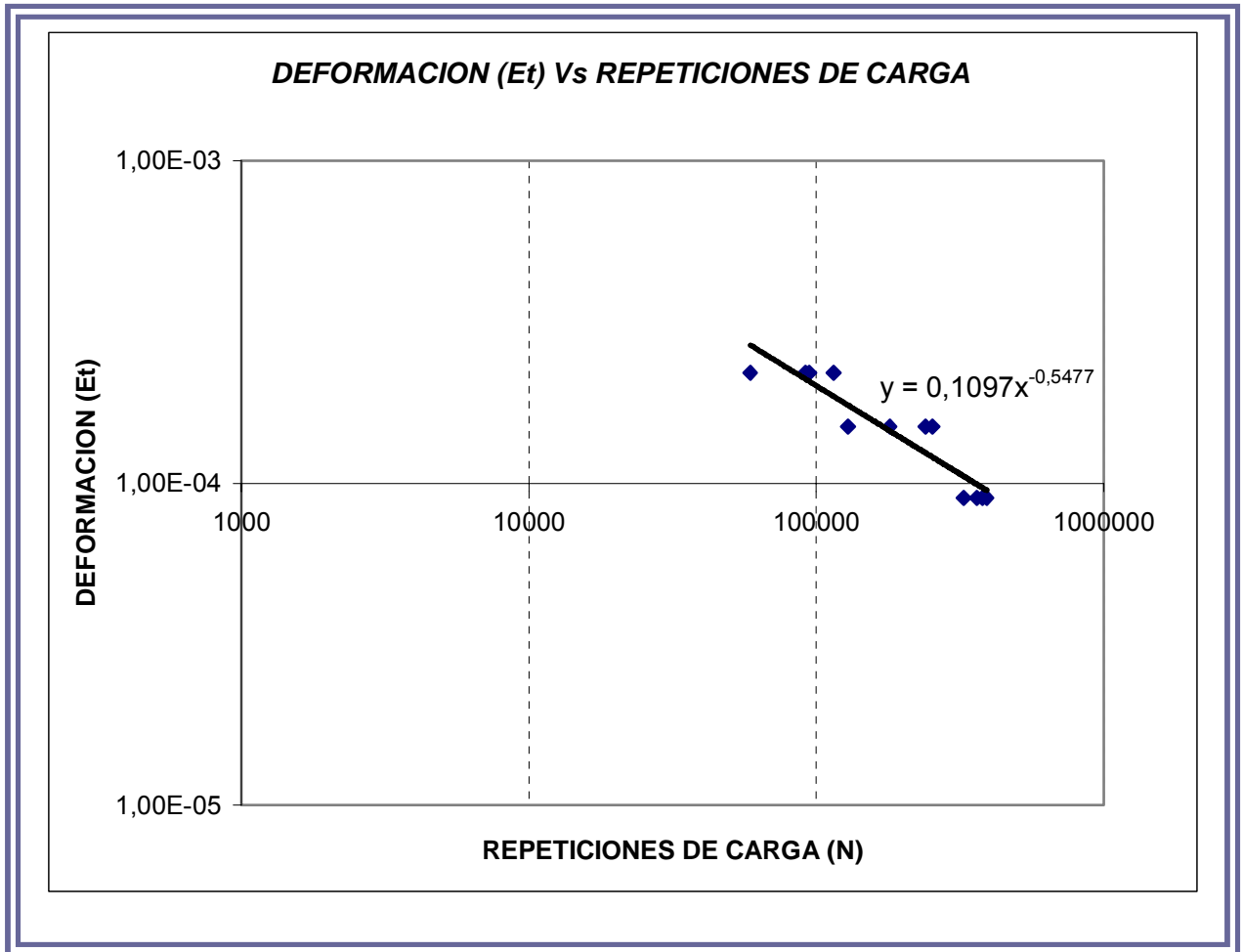


TABLA 7.5 ENSAYO DE FATIGA PARA ASFALTO ENVEJECIDO

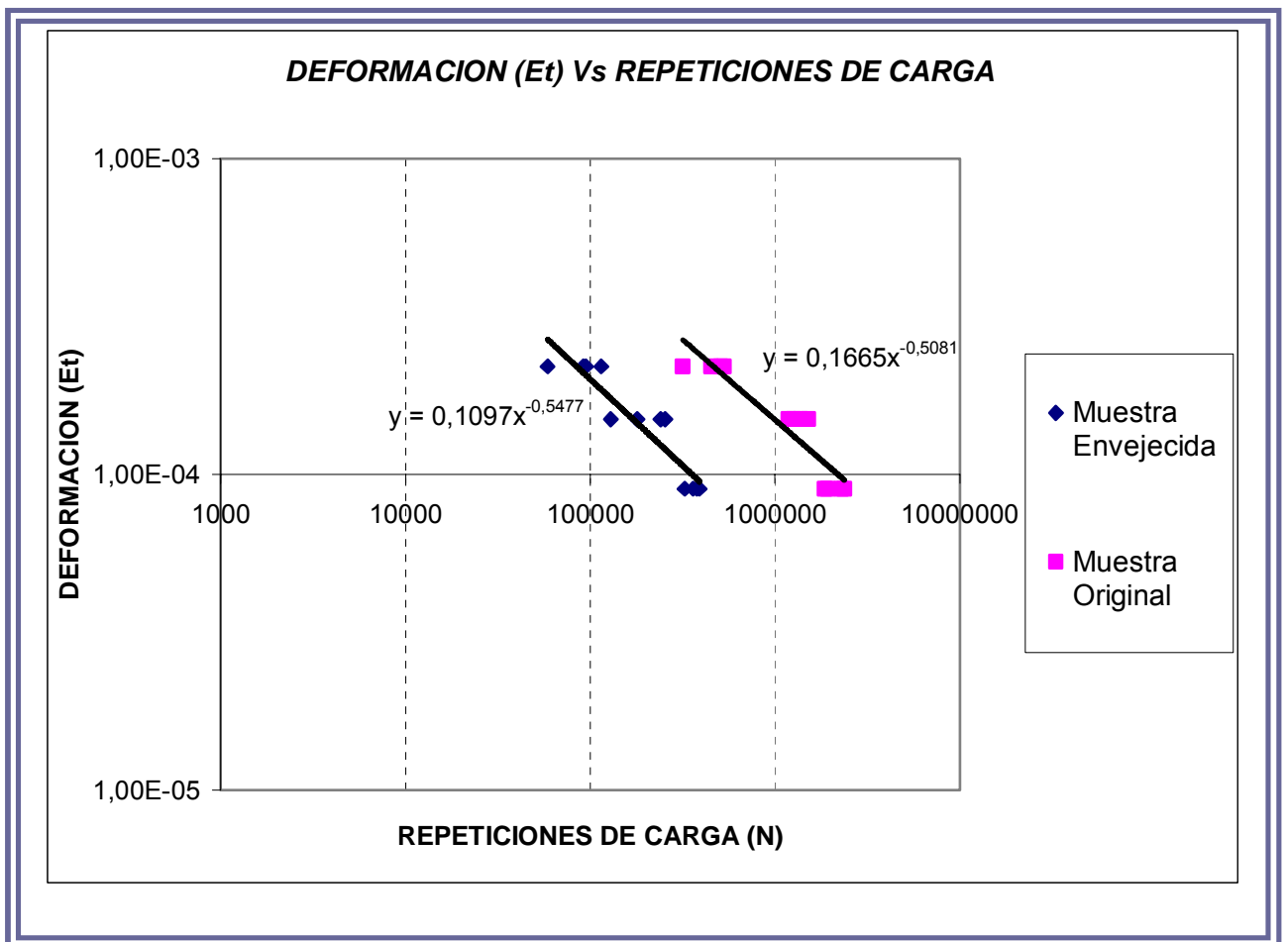
| Probeta Nº | Minutos | Segundos | N                | Deformaciones |
|------------|---------|----------|------------------|---------------|
|            |         |          | $N = t(s)/(1/f)$ | Et            |
| 1          | 652     | 39120    | 391200           | 9,00E-05      |
| 2          | 603     | 36180    | 361800           | 9,00E-05      |
| 3          | 631     | 37860    | 378600           | 9,00E-05      |
| 4          | 542     | 32520    | 325200           | 9,00E-05      |
| 1          | 400     | 24000    | 240000           | 1,50E-04      |
| 2          | 300     | 18000    | 180000           | 1,50E-04      |
| 3          | 423     | 25380    | 253800           | 1,50E-04      |
| 4          | 215     | 12900    | 129000           | 1,50E-04      |
| 1          | 191     | 11460    | 114600           | 2,20E-04      |
| 2          | 153     | 9180     | 91800            | 2,20E-04      |
| 3          | 158     | 9480     | 94800            | 2,20E-04      |
| 4          | 98      | 5880     | 58800            | 2,20E-04      |

|                   |             |
|-------------------|-------------|
| Deformación<br>E6 | 5,67E-05    |
| b                 | -0,5477     |
| alfa              | 1,825817053 |
| f (HZ)            | 10          |

**FIGURA 7.7 DEFORMACIONES (Et) Vs REPETICIONES DE CARGA  
 PARA ASFALTO ENVEJECIDO**



**FIGURA 7.8 COMPARACIÓN DEFORMACIONES (Et) Vs REPETICIONES DE CARGA PARA ASFALTO ORIGINAL Y ENVEJECIDO**





### 7.4.3 Análisis de Resultados

Analizando la gráfica podemos observar que el comportamiento de la mezcla no cumple con la norma puesto que solo una y no dos duraciones de vida de las series están entre  $10^4$  y  $10^6$  y dos entre  $10^6$  y  $10^7$ , sin embargo la deformación de la muestra original cuando  $N = 1'000.000$  ciclos es de 0.000158 mts lo cual es óptimo puesto que la norma exige que sea mayor a 0.000100 mts, este resultado nos muestra que la mezcla se va a comportar eficientemente puesto que resistirá una gran deformación a un gran número de ciclos.

Para que dos de las tres duraciones estén entre  $10^4$  y  $10^6$  era necesario escoger unas deformaciones mayores que las establecidas, esto no se realizó porque al analizar los resultados de las mezclas fatigadas y envejecidas los valores serían muy lejanos de los que establece la norma ( $N = 1000000$ ).

Al realizar el ensayo de fatiga con envejecimiento las menores deformaciones ( $9.0 \text{ E}^{-04}$ ) alcanzaron valores cercanos a  $N = 400000$  ciclos, menos de la mitad de lo que establece la norma ( $N = 1000000$ ), lo cual nos lleva a concluir que las deformaciones que utilizamos nos dan un parámetro correcto para comparar con las mezclas originales.

La mezcla fatigada y envejecida presenta una pendiente de las mismas características que la original manteniendo una rigidez muy similar pero con un deterioro el cual no permitirá la aplicación de un gran número de cargas por su condición de envejecimiento en la cual las propiedades de resistencia se han disminuido y las altas temperaturas hicieron que la mezcla perdiera propiedades de flexibilidad.

## 7.5 RECUPERACIÓN DEL ASFALTO



**FIGURA 7.9**  
**CENTRIFUGA PEQUEÑA**

**FIGURA 7.10**  
**ROTOVAPOR**



### 7.5.1 Norma de Referencia

Para la extracción del asfalto se tuvo en cuenta la norma ASTM D 5404 y la INV E-759 1998.

### 7.5.2 Procedimiento

Se realizó el siguiente procedimiento:

- Se mete al horno la muestra
- Tan pronto la mezcla alcanza una elevada temperatura se procede a disgregarla con la espátula
- Se lleva a la centrifuga pequeña
- Se deposita en la parte superior de la centrifuga
- Se le aplica tricloroetileno hasta que cubra la muestra
- Se procede a colocarle un papel filtro
- Se coloca la tapa y se asegura bien
- Por la boquilla se coloca el frasco para recoger el asfalto junto con el solvente (Tricloroetileno)
- Se prende la maquina a 3600 RPM hasta que el asfalto junto con el solvente sea extraído
- Se trae al rotovapor, en el hay dos frascos llamados matraz que sirven para recoger el solvente y para dejar el asfalto, en uno de ellos al estar depositado el asfalto con el solvente se procede a colocarlo en un baño de aceite a una temperatura de 150 °C a 160°C
- Se realiza circulación de agua para refrigeración de la muestra y se pone el conjunto a girar a 35 RPM , el aceite debe cubrir parcialmente el matraz en el cual esta la muestra

- Se va bajando el matraz sucesivamente hasta que el aceite cubra la mitad de tal forma que la muestra al estar sometida a altas temperaturas, en contacto con el aceite, y con el proceso de recirculación, permitirá que en el matraz que esta con el aceite quede el asfalto y en el otro matraz el tricloroetileno; este proceso se mejora utilizando una bomba de succión que permite extraer en su totalidad de la muestra el tricloroetileno dejando solo el asfalto
- Por ultimo se lleva el asfalto en el matraz a un horno a 150°C a 160°C para que termine de escurrir totalmente el solvente y solo nos quede asfalto

## 7.6 DSR REOMETRO DE CORTE DINÁMICO

FIGURA 7.11 REOMETRO DE CORTE DINAMICO(CITEC)



### 7.6.1 Metodología

Se emplea para caracterizar las propiedades visco-elásticas del ligante.

### 7.6.2 Procedimiento

Según la Asociación Nacional de Pavimentadores de Asfalto, NAPA, el ensayo de DSR se realiza colocando una muestra de asfalto en forma de Sándwich entre dos platos paralelos a una temperatura específica, la muestra es sometida a un esfuerzo de corte, a una frecuencia y deformación seleccionadas, el esfuerzo y la deformación en corte son medidos por el equipo y determina el modulo complejo,  $G^*$ , y el ángulo de fase.

Al obtener la rigidez en cargas cíclicas ( $G^*$ ) y el seno del ángulo de fase, el producto entre ellos da como resultado parámetros que sirven como referencia para controlar la fatiga.

PARAMETRO DE CONTROL DE FATIGA  $G^* \times \text{sen} \delta$

Con el ensayo de DSR se puede determinar que un ligante menos rígido y más elástico será más resistente a la fatiga.

Parámetro: derivado del concepto de disipación de energía;  $Wd = \eta \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \text{sen} \delta$

Para un fenómeno controlado por deformación ( $\epsilon\sigma$ ),

$$\sigma = \epsilon \cdot G^*$$

$$Wd = \eta \cdot \epsilon \sigma^2 \cdot G^* \times \text{sen} \delta$$

Para disminuir la energía disipada es necesario un  $G^* \times \text{sen} \delta$  más bajo

Especificaciones

-AASHTO TP5

-  $\frac{G^*}{\text{sen}\delta}$  para ligantes originales y después de RTFO mínimos de 1.0 Kpa y 2.2

Kpa Respectivamente

-  $G^* \times \text{sen}\delta$  para ligantes después del RTFO-PAV máximo de 5000 Kpa.

FISURAMIENTO POR FATIGA

Medida a la temperatura promedio de diseño del pavimento.

Favorece un ligante menos rígido ( $<G^*$ ) y mas elástico (menor  $\delta$ )

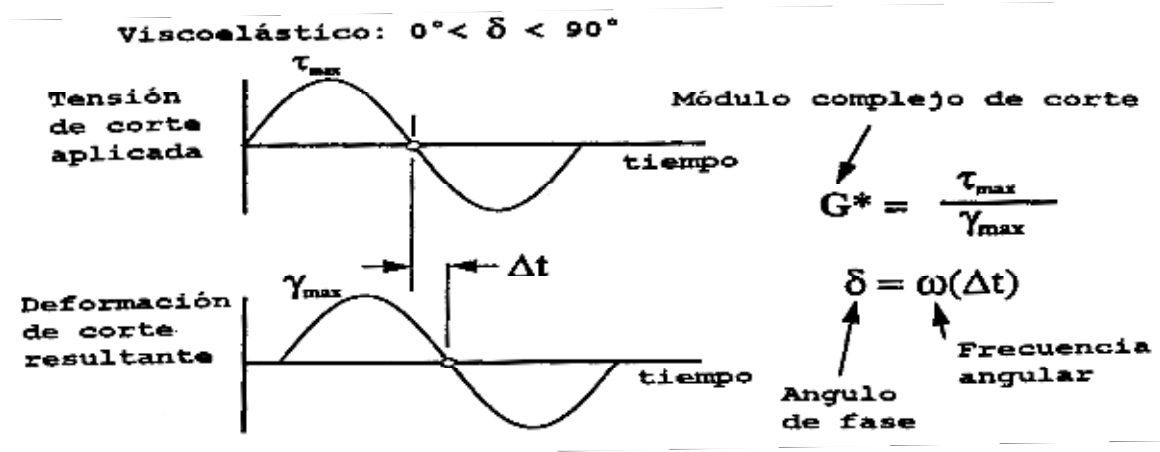
Para todos los asfaltos,  $\text{sen}\delta$  es significativa.

Puede ser muy sensible al nivel de deformación

- A 5000 KPa, el límite lineal es muy pequeño

-Modificadores rígidos pueden ser un problema.

FIGURA 7.12 CÁLCULO DE  $G^*$  Y  $\delta$



Fuente: R.J. Cominsky, R.B. Leahy y E.T. Harrigan, “Level one mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning”, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, 1994.

La respuesta de la deformación específica de corte de una muestra de ligante está desfasada un intervalo de tiempo  $\Delta\tau$  con relación a la tensión aplicada. Este intervalo de tiempo representa un retraso en la respuesta de la deformación. El retraso de la fase es normalmente dado en medidas angulares, simplemente multiplicando el retraso de tiempo  $\Delta t$  por la frecuencia angular ( $\omega$ ) para arribar el ángulo de fase ( $\delta$ ).

Para los materiales totalmente elásticos no hay retraso entre la tensión de corte aplicada y la respuesta de la deformación específica de corte, y  $\delta$  es igual a cero.

Para los materiales totalmente viscosos, la respuesta de la deformación específica está completamente desfasada de la tensión aplicada y  $\delta$  es igual a  $90^\circ$ . Los materiales visco elásticos como los ligantes asfálticos tienen un ángulo de fase entre  $0$  y  $90^\circ$ , dependiendo de la temperatura de ensayo. A altas temperaturas,  $\delta$  se aproxima a  $90^\circ$ ; a bajas temperaturas  $\delta$  se aproxima a  $0^\circ$ .

La especificación de ligantes emplea como medio para controlar la rigidez del asfalto tanto la relación  $G^*/\sin \delta$  a altas temperaturas ( $>46^\circ\text{C}$ ) como  $(G^*) \sin \delta$  a temperaturas intermedias (entre  $7^\circ\text{C}$  y  $34^\circ\text{C}$ ).

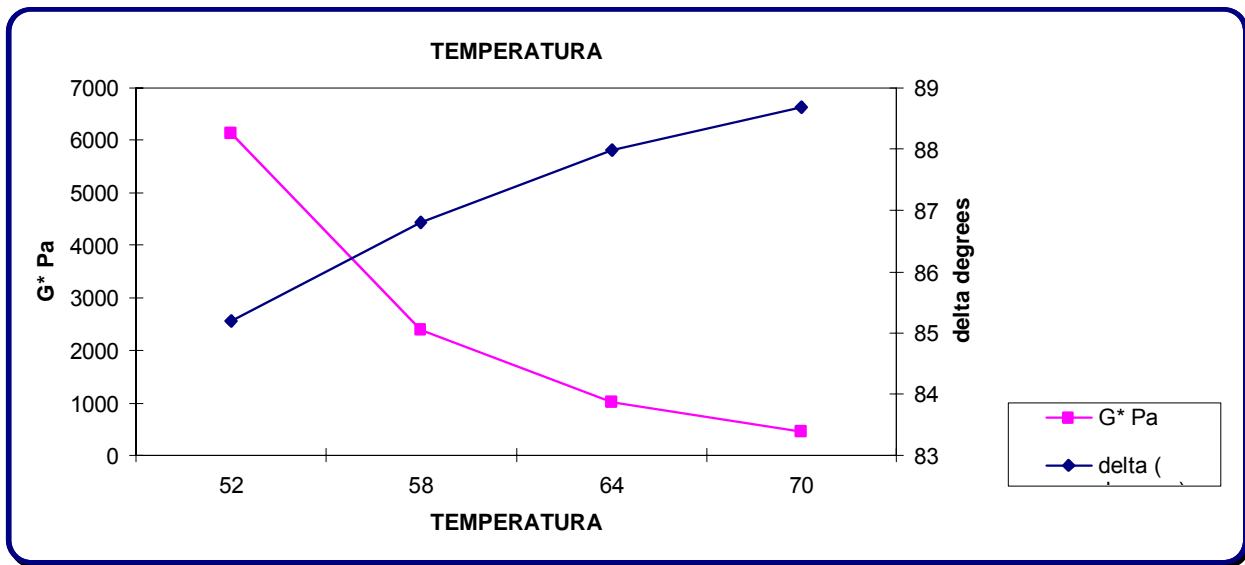
Controlando la rigidez a altas temperaturas, la especificación de ligantes garantiza que el asfalto provea su mayor aporte a la resistencia global al corte de la mezcla en términos de la elasticidad a altas temperaturas. Así mismo, la especificación asegura que el ligante no contribuya a la fisuración por fatiga al limitar su rigidez a temperaturas intermedias.

### 7.6.3 Procedimiento de Análisis de Resultados en DSR

El objetivo es poder caracterizar los asfaltos con tecnología superpave, en este análisis utilizamos asfalto original de barranca realizamos ensayos de RTFO y de PAV para realizar barridos de temperaturas, frecuencias y amplitudes, así mismo al extraer el asfalto de la mezcla fatigada y realizar los mismos barridos obteníamos parámetros necesarios para comparar estos resultados con los obtenidos en el ensayo original RTFO puesto que en ambos casos el asfalto tuvo un proceso de envejecimiento en le momento de mezclado y por lo tanto las características originales no eran las mismas, así mismo realizamos comparaciones con mezcla fatigada y envejecida con asfalto envejecido en PAV puesto que presentarían condiciones similares para una comparación de comportamiento del asfalto.



| ang. frequency rad/sec | time s | temperature Deg C | osc. stress Pa | % strain | G*/sin(delta) kPa | G* Pa | delta degrees | G*.sin(delta) kPa |
|------------------------|--------|-------------------|----------------|----------|-------------------|-------|---------------|-------------------|
| 9,987                  | 63,69  | 52                | 737,7          | 12,027   | 6,161             | 6139  | 85,2          | 6,118             |
| 9,987                  | 47,94  | 58                | 286            | 11,957   | 2,399             | 2395  | 86,81         | 2,391             |
| 9,987                  | 63,29  | 64                | 120,9          | 11,945   | 1,014             | 1013  | 87,98         | 1,013             |
| 9,987                  | 47,8   | 70                | 54,61          | 11,914   | 0,4573            | 457,2 | 88,68         | 0,457             |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.6 y FIGURA 7.13 : BARRIDO DE TEMPERATURAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL –MUESTRA ORIGINAL-

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang. frequency<br>rad/sec | time<br>s | temperature<br>Deg C | osc.<br>stress<br>Pa | % strain | G*/sin(delta)<br>kPa | G*<br>Pa | delta<br>degrees | G*.sin(delta)<br>kPa |
|---------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| 1                         | 44,22     | 64                   | 14,17                | 11,98    | 0,1185               | 118,3    | 87,09            | 0,1182               |
| 1,274                     | 70,75     | 64                   | 17,92                | 12,042   | 0,1491               | 148,9    | 87,39            | 0,1488               |
| 1,624                     | 92,89     | 64,1                 | 22,67                | 11,974   | 0,1896               | 189,4    | 87,64            | 0,1893               |
| 2,068                     | 111,7     | 64,1                 | 28,78                | 11,934   | 0,2415               | 241,3    | 87,77            | 0,2411               |
| 2,638                     | 128,1     | 64,1                 | 36,72                | 11,962   | 0,3074               | 307,1    | 87,89            | 0,3069               |
| 3,358                     | 149,7     | 64,1                 | 46,76                | 11,956   | 0,3916               | 391,4    | 87,91            | 0,3911               |
| 4,28                      | 168       | 64,1                 | 59,69                | 11,964   | 0,4997               | 499,3    | 87,9             | 0,499                |
| 5,463                     | 188,6     | 64                   | 76,28                | 11,908   | 0,6417               | 641,2    | 87,81            | 0,6407               |
| 6,947                     | 206,2     | 64                   | 97,27                | 11,925   | 0,8173               | 816,6    | 87,69            | 0,8159               |
| 8,877                     | 224,3     | 64                   | 124,2                | 11,975   | 1,039                | 1038     | 87,52            | 1,037                |
| 11,28                     | 242       | 64                   | 157,1                | 11,975   | 1,315                | 1314     | 87,34            | 1,312                |
| 14,42                     | 260,9     | 64                   | 199,1                | 11,986   | 1,666                | 1664     | 87,11            | 1,662                |
| 18,26                     | 280,1     | 63,9                 | 251,3                | 12,014   | 2,098                | 2095     | 86,89            | 2,092                |
| 23,38                     | 298,7     | 63,9                 | 318,5                | 12,016   | 2,659                | 2654     | 86,6             | 2,649                |
| 29,73                     | 315,7     | 63,9                 | 401,3                | 12,03    | 3,344                | 3337     | 86,32            | 3,33                 |
| 37,97                     | 332,6     | 63,9                 | 507                  | 12,022   | 4,22                 | 4210     | 86,03            | 4,2                  |
| 48,54                     | 349,4     | 63,9                 | 641,6                | 11,995   | 5,329                | 5315     | 85,76            | 5,3                  |
| 61,36                     | 365,3     | 63,9                 | 818,7                | 12,072   | 6,701                | 6681     | 85,57            | 6,661                |
| 78,26                     | 381,4     | 64                   | 1036                 | 12,04    | 8,368                | 8339     | 85,21            | 8,309                |
| 100,3                     | 397,1     | 64                   | 1339                 | 11,963   | 10,58                | 10540    | 85,07            | 10,5                 |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.7: BARRIDO DE FRECUENCIA OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO ORIGINAL –MUESTRA ORIGINAL-

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

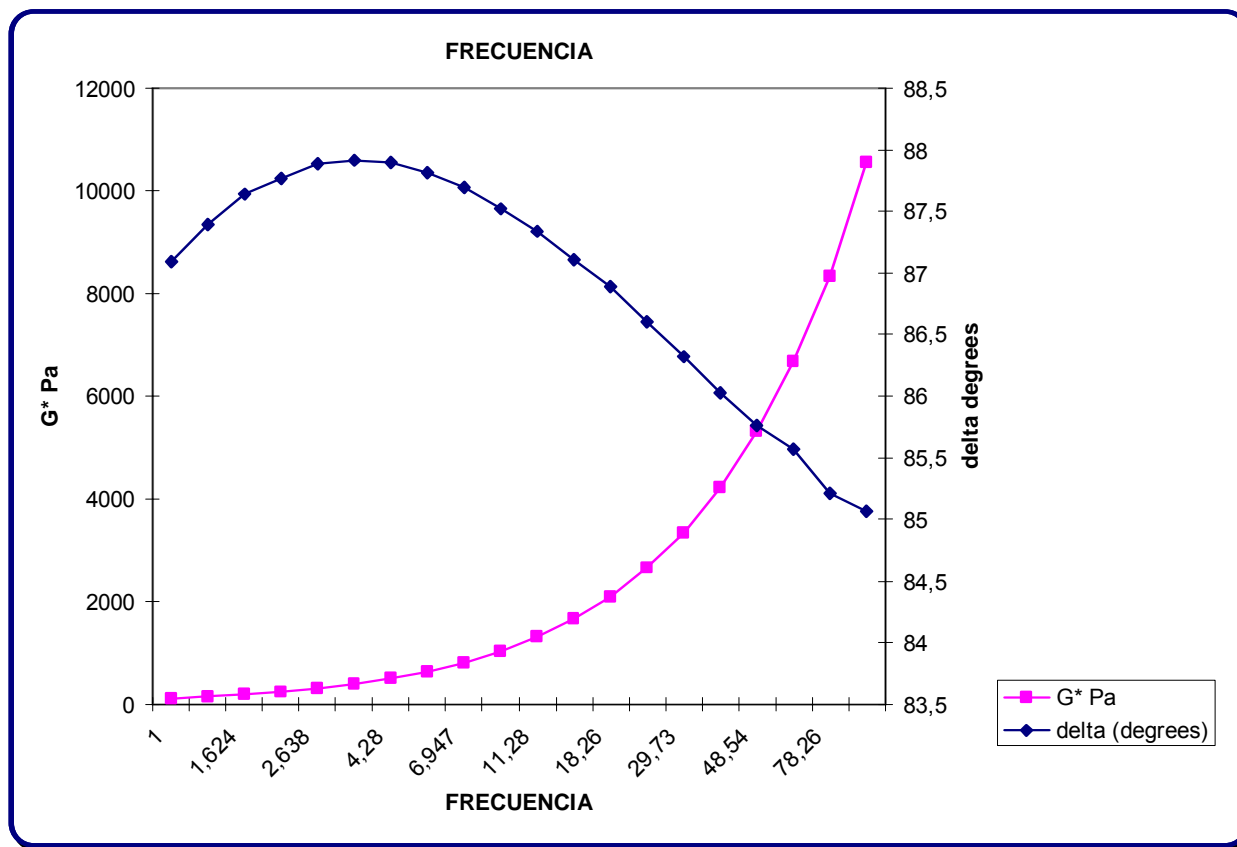


FIGURA 7.14 : BARRIDO DE FRECUENCIA OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL –MUESTRA ORIGINAL-



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang. frequency | time  | temperature | osc. stress | % strain | G*/sin(delta) | G*   | delta   | G*.sin(delta) |
|----------------|-------|-------------|-------------|----------|---------------|------|---------|---------------|
| rad/sec        | s     | Deg C       | Pa          |          | kPa           | Pa   | degrees | kPa           |
| 9,987          | 25,42 | 63,9        | 22,76       | 2,008    | 1,135         | 1134 | 87,89   | 1,134         |
| 9,987          | 44,86 | 63,9        | 80,97       | 7,1158   | 1,14          | 1139 | 87,92   | 1,138         |
| 9,987          | 64,16 | 63,9        | 140,1       | 12,383   | 1,133         | 1132 | 87,91   | 1,131         |
| 9,987          | 83,27 | 64          | 197,6       | 17,501   | 1,131         | 1130 | 87,9    | 1,129         |
| 9,987          | 102,6 | 64          | 255,4       | 22,805   | 1,122         | 1121 | 87,88   | 1,12          |
| 9,987          | 121,9 | 64          | 310,8       | 27,901   | 1,116         | 1115 | 87,92   | 1,114         |
| 9,987          | 141   | 64          | 366,1       | 32,973   | 1,112         | 1111 | 87,93   | 1,111         |
| 9,987          | 160,1 | 64          | 423,1       | 38,041   | 1,114         | 1113 | 87,94   | 1,113         |
| 9,987          | 179,5 | 64,1        | 479,6       | 43,29    | 1,11          | 1109 | 87,94   | 1,108         |
| 9,987          | 198,8 | 64,1        | 535,9       | 48,466   | 1,107         | 1107 | 87,96   | 1,106         |
| 9,987          | 218   | 64,1        | 593,1       | 53,583   | 1,108         | 1108 | 87,99   | 1,107         |
| 9,987          | 237,4 | 64,1        | 652,7       | 58,727   | 1,113         | 1112 | 87,98   | 1,112         |
| 9,987          | 256,5 | 64          | 710,2       | 64,007   | 1,111         | 1111 | 87,99   | 1,11          |
| 9,987          | 275,8 | 64          | 766,4       | 68,988   | 1,113         | 1112 | 88      | 1,111         |
| 9,987          | 295,1 | 64          | 825,1       | 74,289   | 1,112         | 1112 | 88,02   | 1,111         |
| 9,987          | 314,6 | 64          | 885,3       | 79,557   | 1,114         | 1114 | 88,03   | 1,113         |
| 9,987          | 333,9 | 64          | 939,8       | 84,593   | 1,113         | 1112 | 88,05   | 1,111         |
| 9,987          | 353,2 | 64          | 996,2       | 89,834   | 1,11          | 1110 | 88,07   | 1,109         |
| 9,987          | 372,5 | 64          | 1053        | 94,655   | 1,114         | 1113 | 88,08   | 1,113         |
| 9,987          | 391,9 | 64          | 1112        | 100,28   | 1,111         | 1110 | 88,09   | 1,11          |



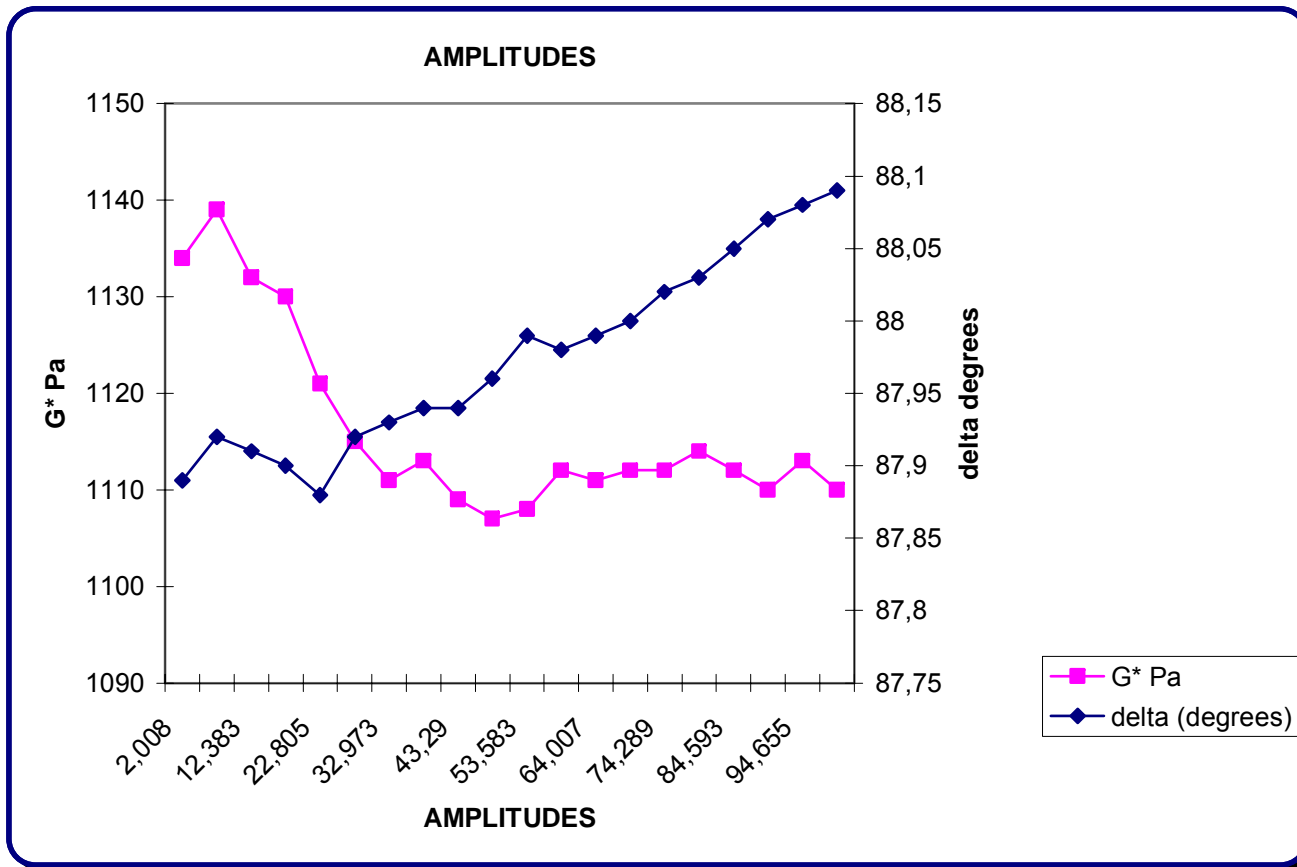
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS


DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.8 : BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL –MUESTRA ORIGINAL-

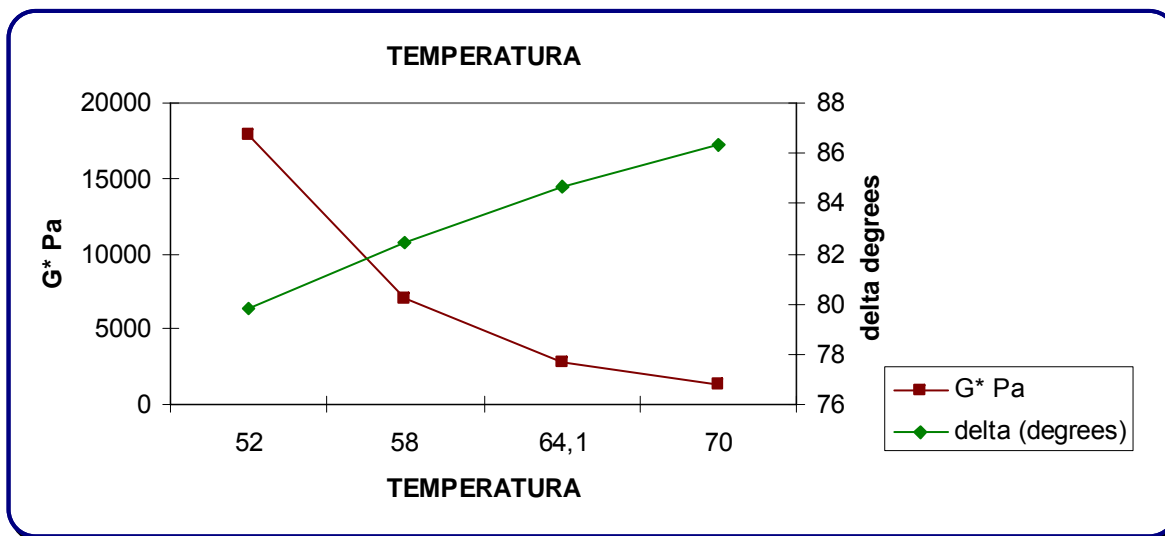
MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



|   |   |  |                                |
|---|---|--|--------------------------------|
|  | TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS | FIGURA 7.15 : BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL –MUESTRA ORIGINAL- |                                |
|   | DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL  | MIC 2004 -1 -3   | JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO |

| ang. frequency rad/sec | time s | temperature Deg C | osc. stress Pa | % strain | G*/sin(delta) kPa | G* Pa | delta degrees | G*.sin(delta) kPa |
|------------------------|--------|-------------------|----------------|----------|-------------------|-------|---------------|-------------------|
| 9,987                  | 64,82  | 52                | 1785           | 10,009   | 18,14             | 17850 | 79,8          | 17,57             |
| 9,987                  | 65,5   | 58                | 693,3          | 9,8895   | 7,08              | 7018  | 82,45         | 6,957             |
| 9,987                  | 66     | 64,1              | 283            | 9,9992   | 2,847             | 2835  | 84,67         | 2,822             |
| 9,987                  | 65,56  | 70                | 126,7          | 9,9712   | 1,276             | 1273  | 86,36         | 1,271             |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

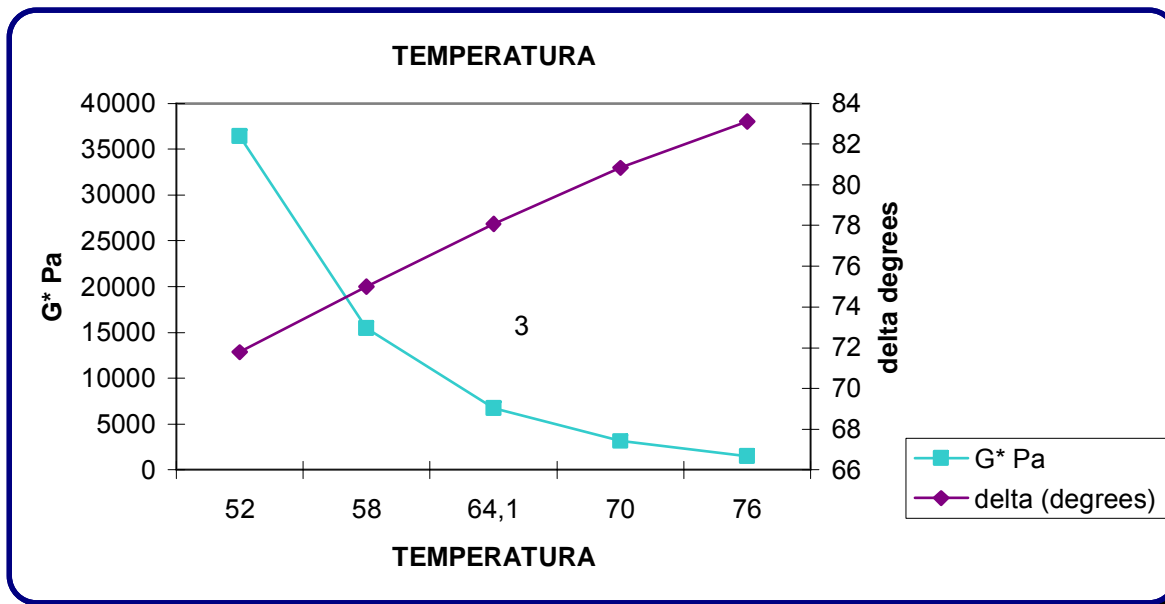
DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.9 y FIGURA 7.16: BARRIDO DE TEMPERATURAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE RTFO

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang. frequency rad/sec | time s | temperature Deg C | osc. stress Pa | % strain | G*/sin(delta) kPa | G* Pa | delta degrees | G*.sin(delta) kPa |
|------------------------|--------|-------------------|----------------|----------|-------------------|-------|---------------|-------------------|
| 9,987                  | 78,97  | 52                | 3259           | 8,9466   | 38,37             | 36450 | 71,79         | 34,63             |
| 9,987                  | 78,98  | 58                | 1544           | 10,001   | 16,01             | 15460 | 74,99         | 14,93             |
| 9,987                  | 63,49  | 64,1              | 672,8          | 9,9527   | 6,921             | 6772  | 78,08         | 6,626             |
| 9,987                  | 63,37  | 70                | 313,5          | 10,076   | 3,16              | 3120  | 80,83         | 3,08              |
| 9,987                  | 63,65  | 76                | 148,3          | 9,9369   | 1,509             | 1498  | 83,12         | 1,487             |



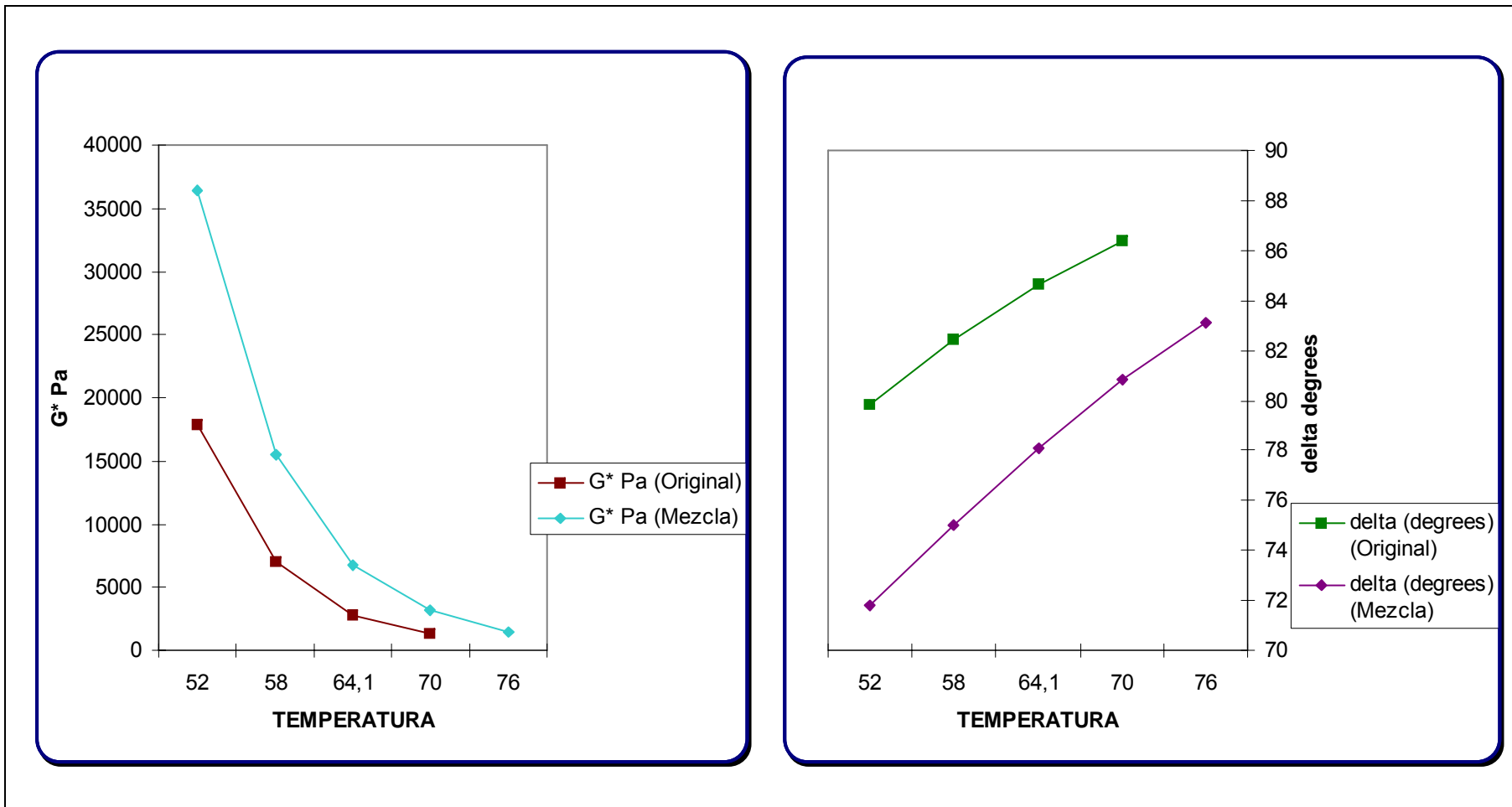
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.10 Y FIGURA 7.17: BARRIDO DE TEMPERATURAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.18 : COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE TEMPERATURAS OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE RTFO

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*    | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|-------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa    | degrees | kPa           |
| 1                 | 44,14 | 64          | 27,84          | 9,9587   | 0,2798        | 279,7 | 88,34   | 0,2796        |
| 1,274             | 82,06 | 64          | 35,76          | 9,9935   | 0,3581        | 357,9 | 88,2    | 0,3577        |
| 1,624             | 104,5 | 63,9        | 45,43          | 9,9695   | 0,4561        | 455,9 | 87,97   | 0,4556        |
| 2,068             | 123,3 | 63,9        | 58,27          | 10,051   | 0,5804        | 580   | 87,72   | 0,5795        |
| 2,638             | 139,4 | 64          | 73,78          | 10,052   | 0,7351        | 734,3 | 87,44   | 0,7336        |
| 3,358             | 161   | 64          | 93,07          | 10,028   | 0,9298        | 928,7 | 87,14   | 0,9275        |
| 4,28              | 179,7 | 64          | 117,6          | 10,022   | 1,176         | 1174  | 86,81   | 1,173         |
| 5,463             | 200,2 | 64          | 148,2          | 10,007   | 1,485         | 1482  | 86,47   | 1,48          |
| 6,947             | 217,8 | 64          | 185,8          | 9,9845   | 1,867         | 1863  | 86,12   | 1,858         |
| 8,877             | 235,8 | 64          | 233,9          | 9,9632   | 2,357         | 2351  | 85,74   | 2,344         |
| 11,28             | 253,7 | 64          | 294,1          | 9,9647   | 2,967         | 2957  | 85,35   | 2,947         |
| 14,42             | 272,5 | 64          | 369,9          | 9,9534   | 3,739         | 3725  | 84,96   | 3,711         |
| 18,26             | 291,7 | 64          | 463,2          | 9,957    | 4,687         | 4666  | 84,58   | 4,645         |
| 23,38             | 310,3 | 64          | 585            | 9,9173   | 5,952         | 5921  | 84,16   | 5,89          |
| 29,73             | 327,1 | 64          | 735,8          | 9,9492   | 7,476         | 7432  | 83,76   | 7,388         |
| 37,97             | 344,1 | 64          | 932,4          | 10,053   | 9,396         | 9333  | 83,35   | 9,27          |
| 48,54             | 361   | 64          | 1157           | 10,028   | 11,72         | 11630 | 82,87   | 11,54         |
| 61,36             | 377   | 64          | 1441           | 10,03    | 14,62         | 14500 | 82,5    | 14,38         |
| 78,26             | 393,1 | 64          | 1791           | 10,036   | 18,19         | 18020 | 82,04   | 17,84         |
| 100,3             | 415   | 64          | 2229           | 9,9581   | 22,82         | 22580 | 81,69   | 22,34         |



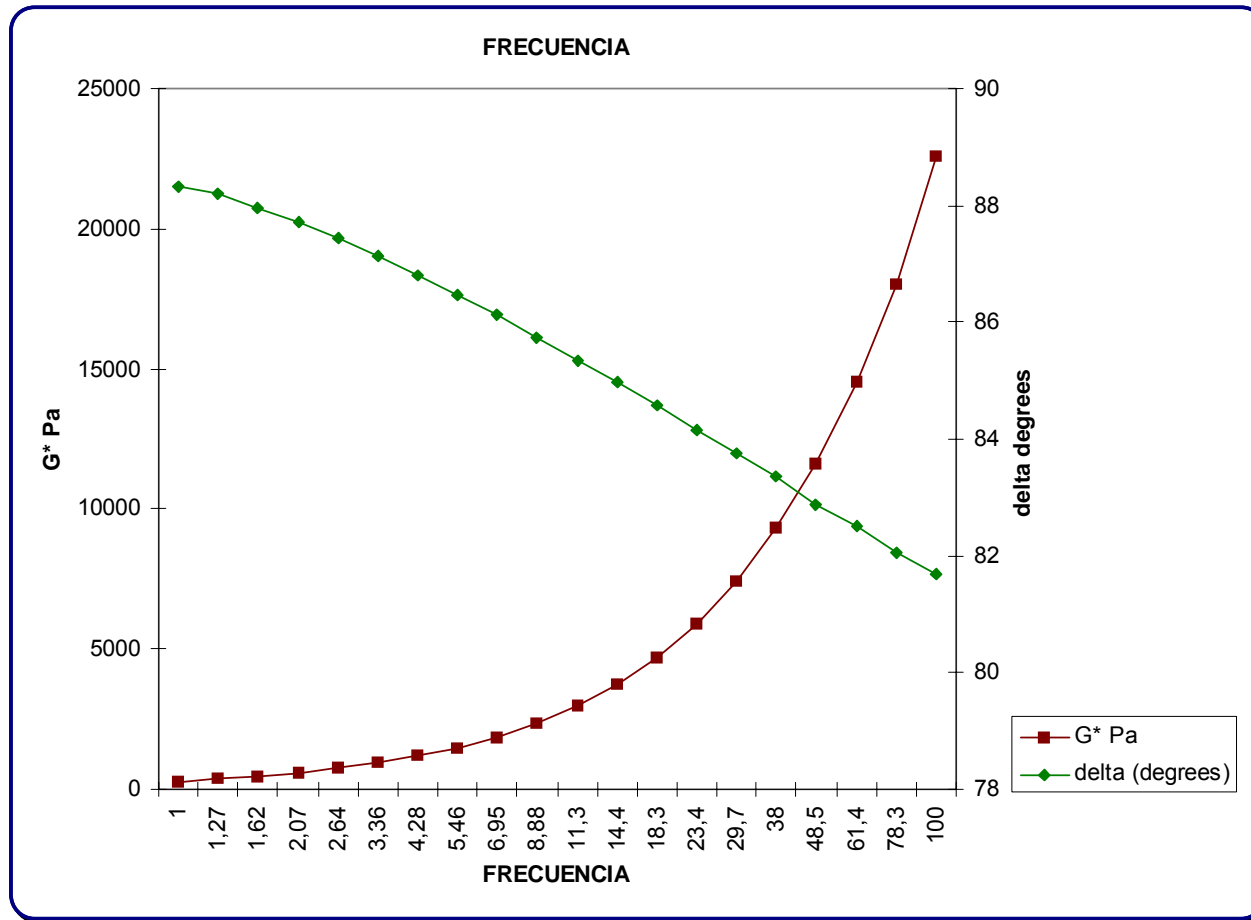
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.11 : BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR  
CON ASFALTO ORIGINAL DE RTFO

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.19: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE RTFO

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*    | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|-------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa    | degrees | kPa           |
| 1                 | 44,22 | 70,1        | 36,28          | 10,056   | 0,3619        | 360,9 | 85,77   | 0,36          |
| 1,274             | 70,58 | 70          | 45,39          | 9,9148   | 0,4595        | 458   | 85,31   | 0,4564        |
| 1,624             | 102,3 | 70          | 58,17          | 10,009   | 0,5839        | 581,5 | 84,8    | 0,5791        |
| 2,068             | 121,2 | 70          | 72,75          | 9,9253   | 0,7371        | 733,4 | 84,27   | 0,7297        |
| 2,638             | 137,3 | 70          | 92,11          | 9,9353   | 0,9333        | 927,7 | 83,74   | 0,9222        |
| 3,358             | 159   | 70          | 116,4          | 9,997    | 1,173         | 1165  | 83,19   | 1,157         |
| 4,28              | 177,3 | 70          | 145,9          | 10,011   | 1,471         | 1459  | 82,63   | 1,446         |
| 5,463             | 197,8 | 69,9        | 182,6          | 10,01    | 1,844         | 1826  | 82,04   | 1,809         |
| 6,947             | 215,3 | 69,9        | 227            | 10,019   | 2,295         | 2269  | 81,48   | 2,244         |
| 8,877             | 233,4 | 70          | 282,1          | 10,009   | 2,861         | 2825  | 80,89   | 2,789         |
| 11,28             | 251,4 | 70          | 347,8          | 9,9968   | 3,541         | 3490  | 80,31   | 3,44          |
| 14,42             | 270,2 | 70          | 429,7          | 9,9969   | 4,387         | 4316  | 79,74   | 4,247         |
| 18,26             | 289,2 | 70          | 528,8          | 10,047   | 5,389         | 5293  | 79,18   | 5,199         |
| 23,38             | 307,7 | 70          | 653,8          | 9,9745   | 6,736         | 6603  | 78,58   | 6,472         |
| 29,73             | 324,4 | 70          | 805,1          | 9,9763   | 8,33          | 8150  | 78,04   | 7,973         |
| 37,97             | 341,3 | 70          | 994,7          | 10,016   | 10,3          | 10060 | 77,5    | 9,822         |
| 48,54             | 358,2 | 70          | 1212           | 9,9943   | 12,66         | 12330 | 76,96   | 12,02         |
| 61,36             | 374,2 | 70          | 1469           | 10,002   | 15,43         | 15010 | 76,48   | 14,59         |
| 78,26             | 390,1 | 70          | 1793           | 10,021   | 18,94         | 18380 | 76,03   | 17,84         |
| 100,3             | 406,1 | 70          | 2186           | 10,053   | 23,18         | 22450 | 75,53   | 21,73         |



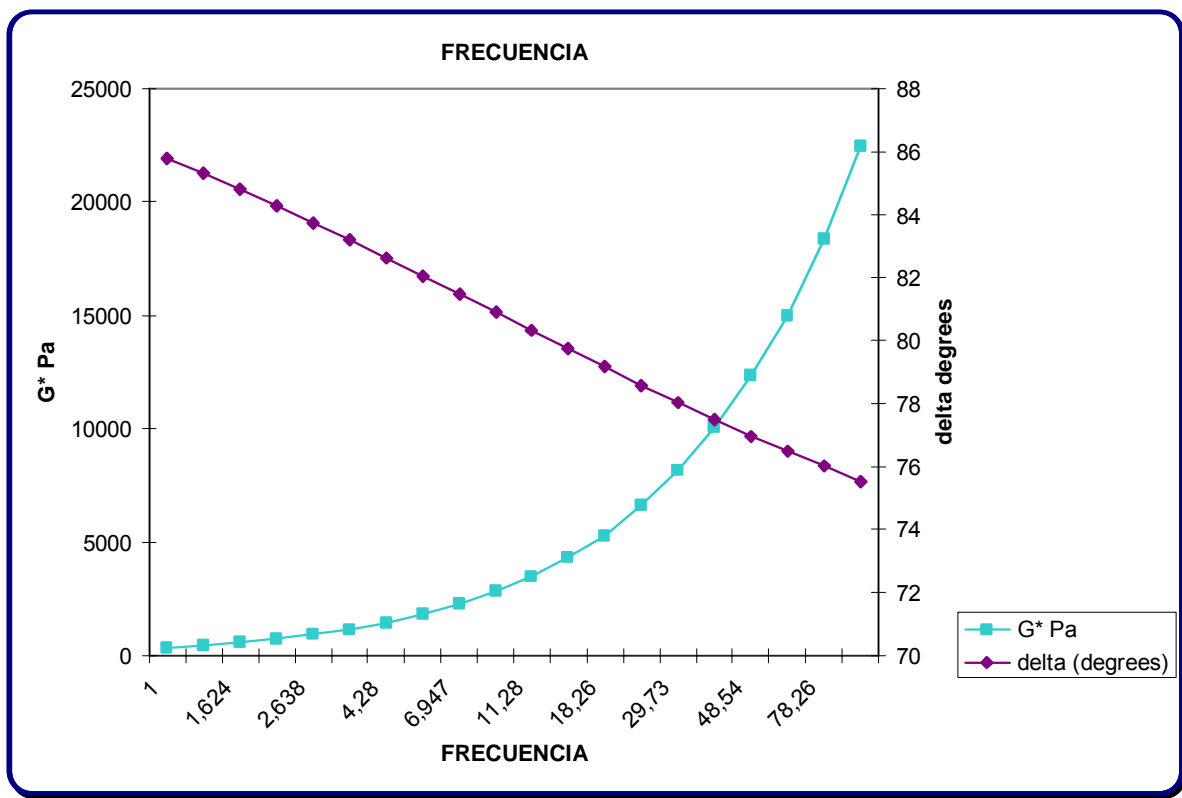
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.12: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.20: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

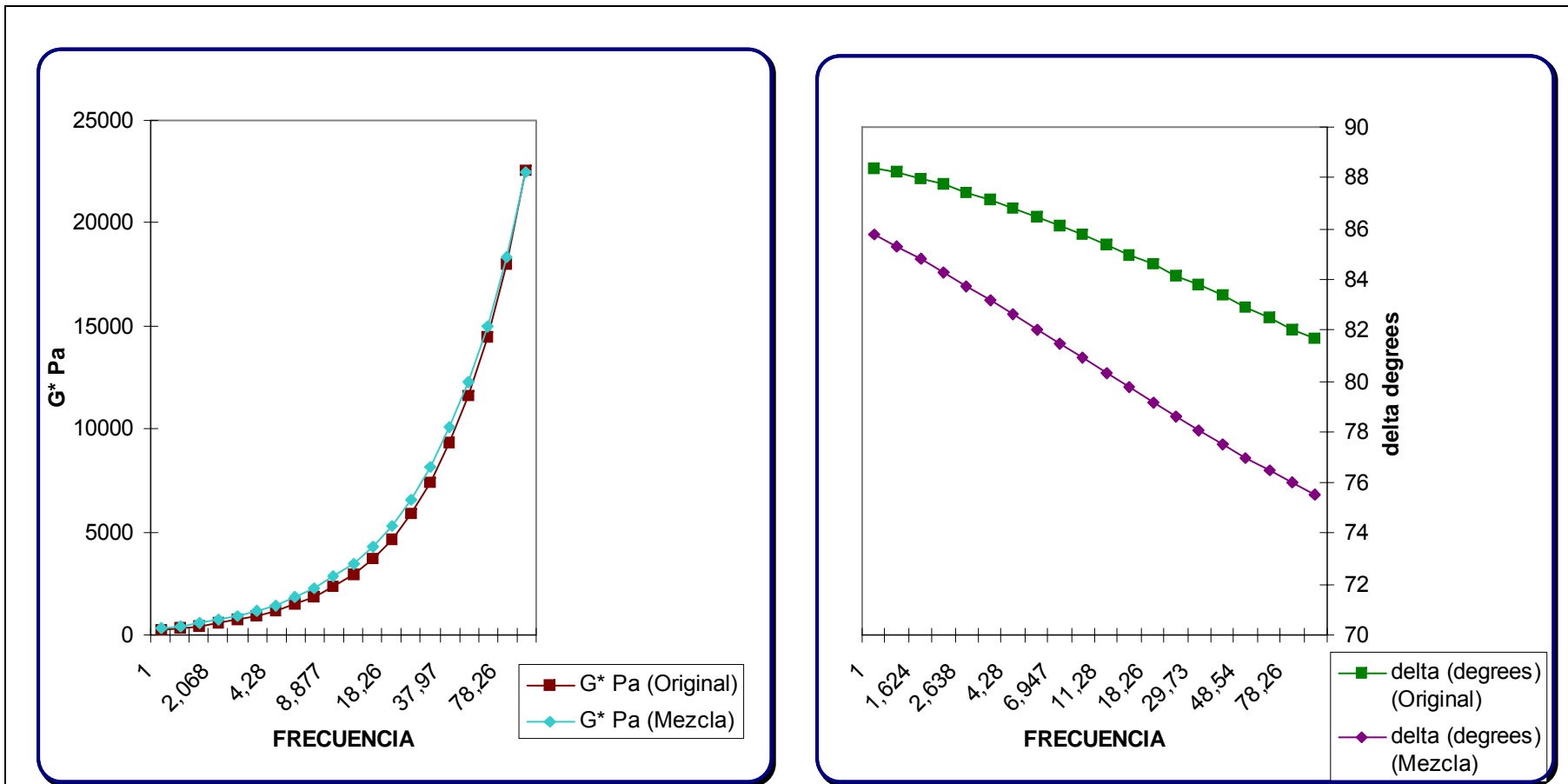


FIGURA 7.21: COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE FRECUENCIAS OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE RTFO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*.sin(delta) | G*   | delta   | G*/sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa   | degrees | kPa           |
| 9,987             | 25,25 | 64          | 52,36          | 1,9984   | 2,631         | 2624 | 85,68   | 2,616         |
| 9,987             | 44,48 | 64          | 187            | 7,1509   | 2,627         | 2619 | 85,56   | 2,611         |
| 9,987             | 63,76 | 64          | 321,1          | 12,364   | 2,609         | 2601 | 85,74   | 2,594         |
| 9,987             | 83,04 | 64          | 454,5          | 17,471   | 2,613         | 2605 | 85,63   | 2,598         |
| 9,987             | 102,2 | 64          | 591,5          | 22,622   | 2,626         | 2619 | 85,64   | 2,611         |
| 9,987             | 121,4 | 63,9        | 728,2          | 27,779   | 2,633         | 2625 | 85,66   | 2,618         |
| 9,987             | 140,7 | 63,9        | 862,4          | 32,975   | 2,627         | 2619 | 85,68   | 2,612         |
| 9,987             | 159,9 | 63,9        | 995,3          | 38,122   | 2,622         | 2615 | 85,72   | 2,608         |
| 9,987             | 179,3 | 63,9        | 1127           | 43,224   | 2,618         | 2611 | 85,76   | 2,604         |
| 9,987             | 198,4 | 63,9        | 1263           | 48,548   | 2,612         | 2605 | 85,79   | 2,598         |
| 9,987             | 218,2 | 64          | 1394           | 53,805   | 2,602         | 2595 | 85,83   | 2,588         |
| 9,987             | 237,8 | 64          | 1518           | 58,765   | 2,593         | 2587 | 85,88   | 2,58          |
| 9,987             | 257,1 | 64          | 1644           | 64,104   | 2,574         | 2568 | 85,92   | 2,561         |
| 9,987             | 276,6 | 64          | 1768           | 69,306   | 2,561         | 2555 | 85,97   | 2,549         |
| 9,987             | 296,2 | 64          | 1892           | 74,333   | 2,555         | 2548 | 86,03   | 2,542         |
| 9,987             | 315,6 | 64,1        | 2024           | 79,633   | 2,551         | 2545 | 86,07   | 2,539         |
| 9,987             | 335   | 64,1        | 2147           | 84,678   | 2,544         | 2539 | 86,12   | 2,533         |
| 9,987             | 354,7 | 64,1        | 2277           | 90,002   | 2,539         | 2533 | 86,16   | 2,527         |
| 9,987             | 374,8 | 64,1        | 2401           | 94,897   | 2,54          | 2534 | 86,21   | 2,529         |
| 9,987             | 395,2 | 64          | 2537           | 100      | 2,546         | 2541 | 86,25   | 2,535         |



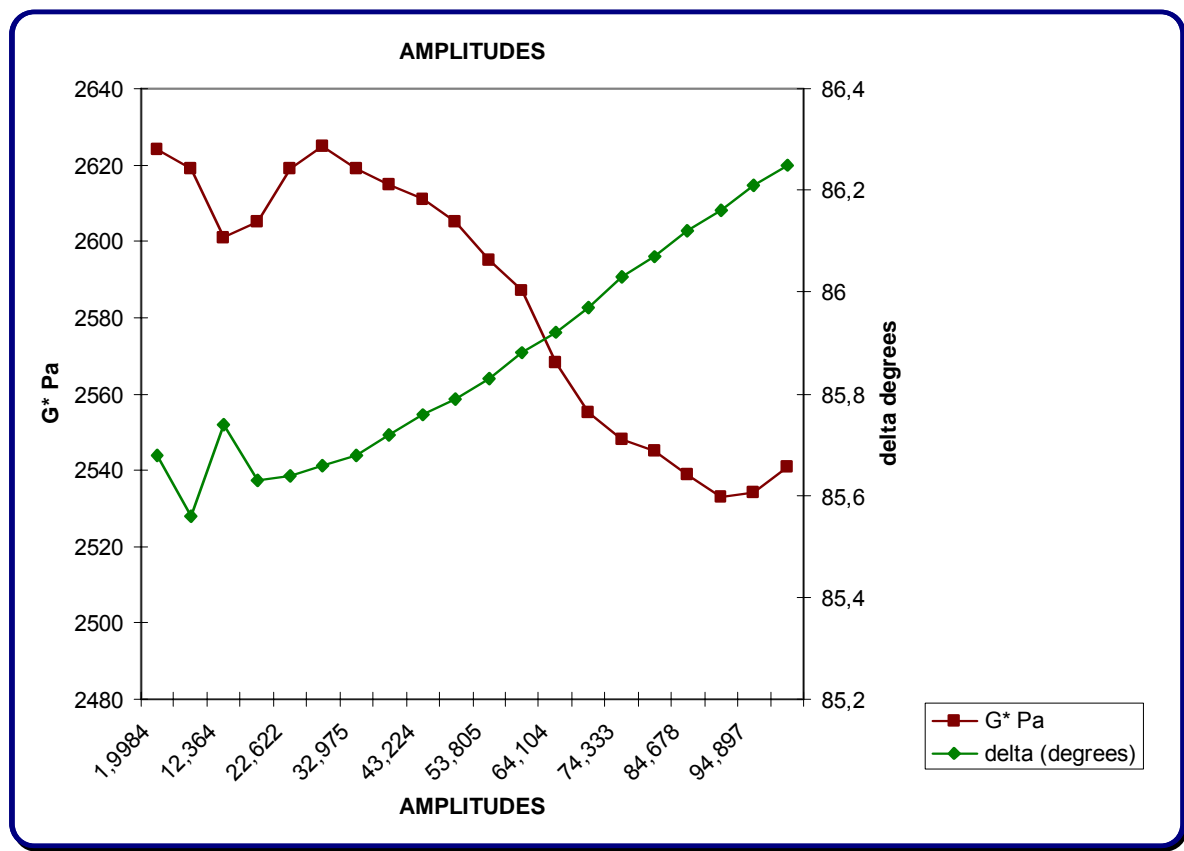
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS


DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.13: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO ORIGINAL DE RTFO

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



|   |   |  |                                |
|---|---|--|--------------------------------|
|  | TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS | FIGURA 7.22: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE RTFO |                                |
|   | DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL  | MIC 2004 -1 -3   | JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO |

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*   | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa   | degrees | kPa           |
| 9,987             | 25,38 | 70          | 63,01          | 1,9958   | 3,206         | 3165 | 80,83   | 3,125         |
| 9,987             | 44,43 | 70          | 226            | 7,185    | 3,195         | 3154 | 80,84   | 3,114         |
| 9,987             | 63,45 | 70          | 386,4          | 12,367   | 3,173         | 3133 | 80,88   | 3,093         |
| 9,987             | 82,55 | 70          | 545            | 17,499   | 3,162         | 3122 | 80,92   | 3,083         |
| 9,987             | 101,6 | 70          | 703,9          | 22,658   | 3,154         | 3115 | 80,96   | 3,076         |
| 9,987             | 121   | 70          | 863,7          | 27,848   | 3,148         | 3109 | 81,02   | 3,071         |
| 9,987             | 140,3 | 70          | 1022           | 33,005   | 3,144         | 3106 | 81,1    | 3,069         |
| 9,987             | 159,6 | 70          | 1184           | 38,172   | 3,147         | 3109 | 81,18   | 3,073         |
| 9,987             | 178,8 | 70          | 1343           | 43,329   | 3,144         | 3108 | 81,27   | 3,072         |
| 9,987             | 198,1 | 70          | 1504           | 48,602   | 3,137         | 3101 | 81,35   | 3,066         |
| 9,987             | 217,6 | 70          | 1661           | 53,794   | 3,13          | 3095 | 81,44   | 3,061         |
| 9,987             | 237,1 | 69,9        | 1817           | 59,052   | 3,118         | 3085 | 81,54   | 3,051         |
| 9,987             | 256,4 | 69,9        | 1969           | 64,237   | 3,105         | 3072 | 81,66   | 3,04          |
| 9,987             | 275,6 | 69,9        | 2118           | 69,495   | 3,086         | 3055 | 81,78   | 3,023         |
| 9,987             | 295   | 70          | 2270           | 74,737   | 3,075         | 3045 | 81,89   | 3,014         |
| 9,987             | 314,4 | 69,9        | 2416           | 79,955   | 3,058         | 3028 | 81,99   | 2,999         |
| 9,987             | 333,9 | 70          | 2556           | 85,146   | 3,038         | 3009 | 82,09   | 2,981         |
| 9,987             | 353,2 | 70          | 2697           | 90,42    | 3,018         | 2990 | 82,19   | 2,962         |
| 9,987             | 372,5 | 70          | 2833           | 95,677   | 2,995         | 2968 | 82,32   | 2,941         |
| 9,987             | 392   | 70          | 2978           | 100,91   | 2,984         | 2958 | 82,43   | 2,932         |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

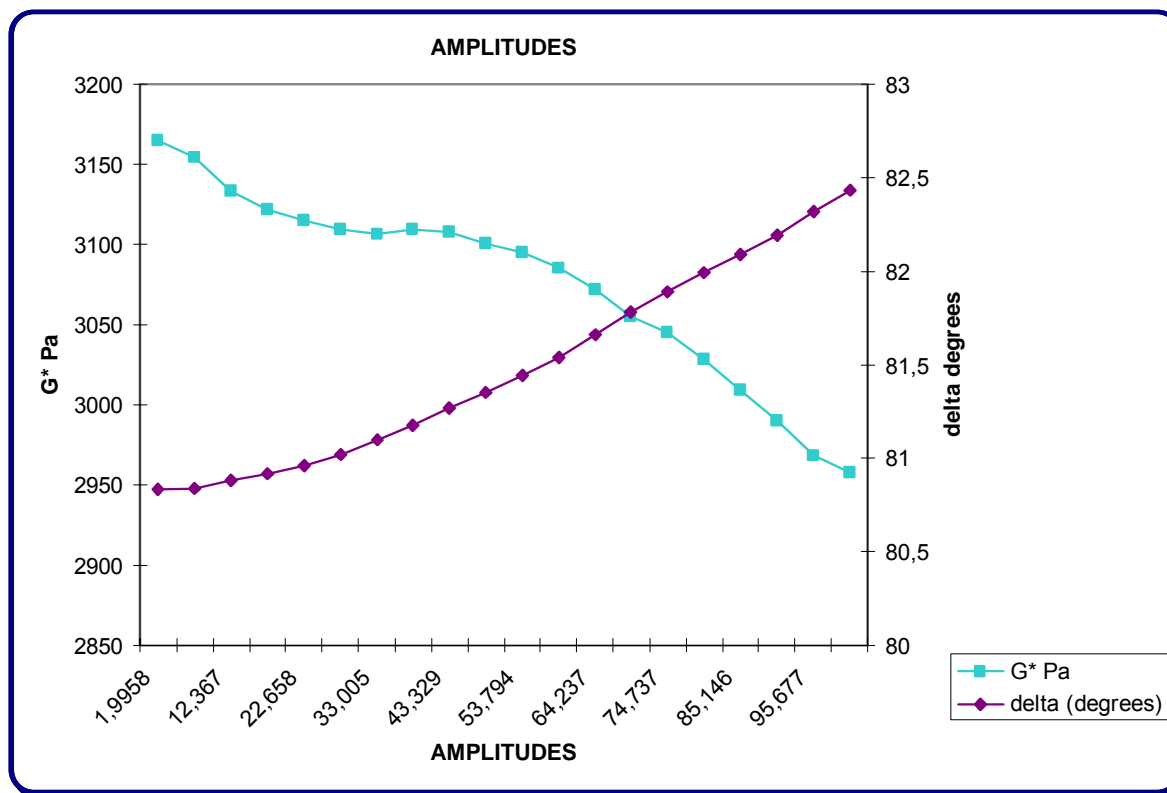
DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.14: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO





TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.23 : BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

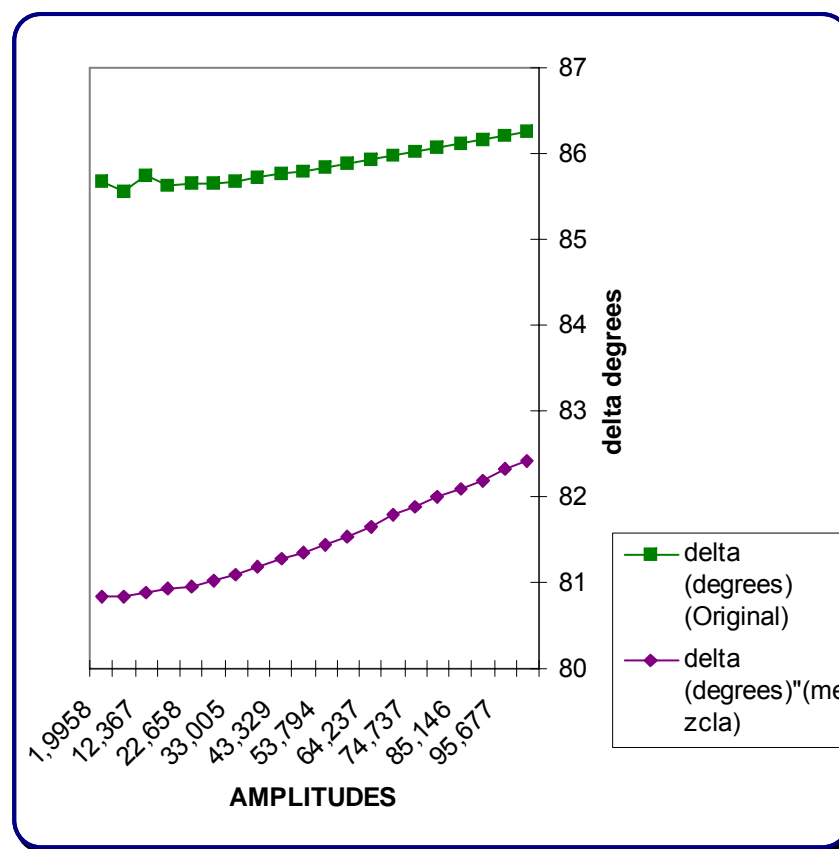
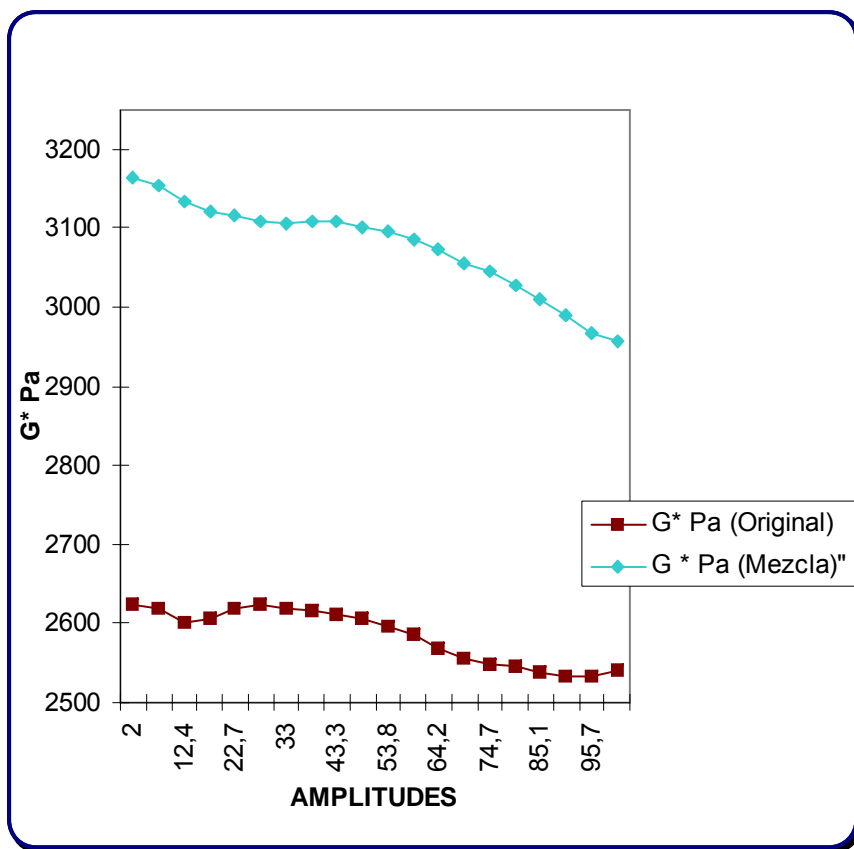


FIGURA 24: COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE AMPLITUDES OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE RTFO



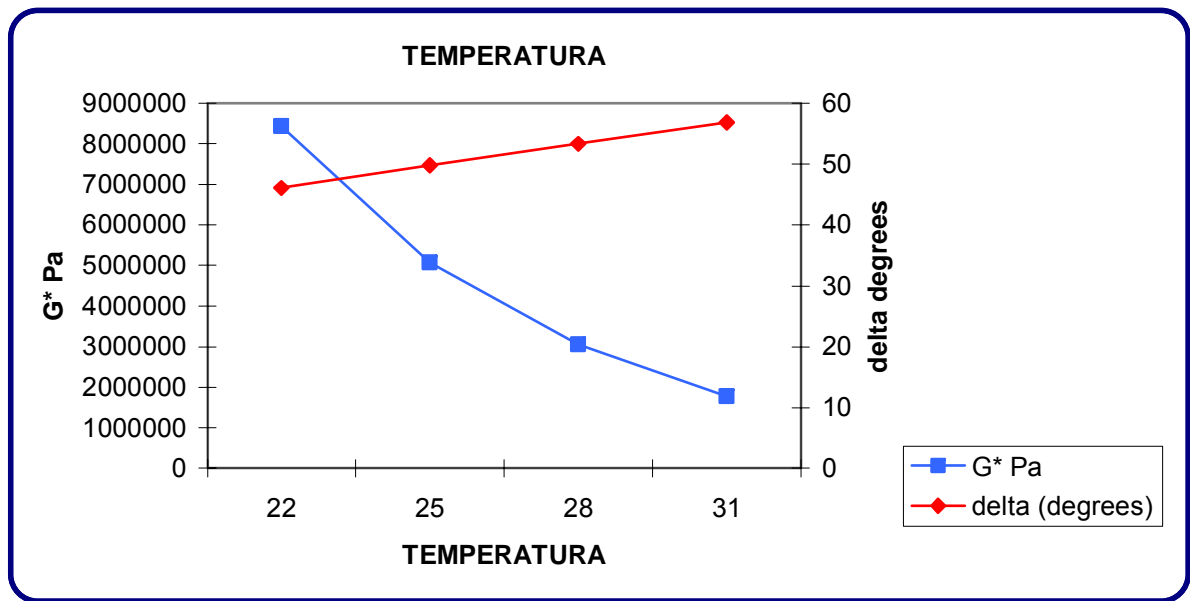
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang. frequency<br>rad/sec | time<br>s | temperature<br>Deg C | osc. stress<br>Pa | % strain | G*/sin(delta)<br>kPa | G*<br>Pa | delta<br>degrees | G*.sin(delta)<br>kPa |
|---------------------------|-----------|----------------------|-------------------|----------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| 9,987                     | 78,91     | 22                   | 85130             | 1,0101   | 6076                 | 8435000  | 46,08            | 11710                |
| 9,987                     | 79,04     | 25                   | 51230             | 1,0105   | 3876                 | 5075000  | 49,8             | 6645                 |
| 9,987                     | 63,48     | 28                   | 30710             | 1,0094   | 2445                 | 3048000  | 53,34            | 3800                 |
| 9,987                     | 63,53     | 31                   | 17850             | 1,0096   | 1485                 | 1773000  | 56,85            | 2118                 |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

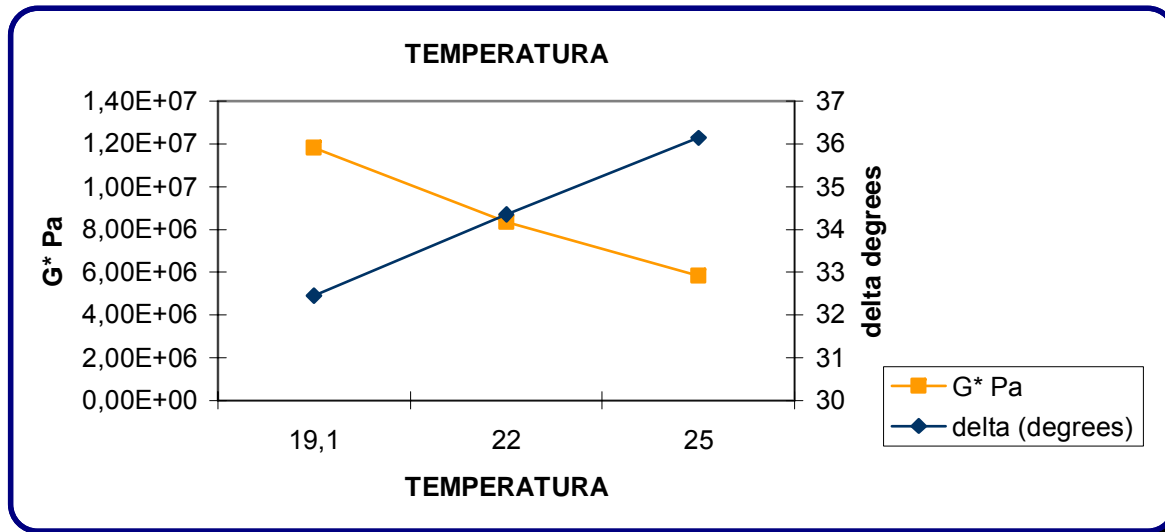
DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.15 Y FIGURA 7.25 : BARRIDO DE TEMPERATURAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang. frequency<br>rad/sec | time<br>s | temperature<br>Deg C | osc. stress<br>Pa | % strain | G*/sin(delta)<br>kPa | G*<br>Pa | delta<br>degrees | G*.sin(delta)<br>kPa |
|---------------------------|-----------|----------------------|-------------------|----------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| 9,987                     | 63,46     | 19,1                 | 99470             | 0,84299  | 22010                | 1,18E+07 | 32,45            | 6336                 |
| 9,987                     | 79,05     | 22                   | 84830             | 1,0173   | 14790                | 8347000  | 34,35            | 4710                 |
| 9,987                     | 79,3      | 25                   | 59320             | 1,0185   | 9888                 | 5832000  | 36,14            | 3439                 |



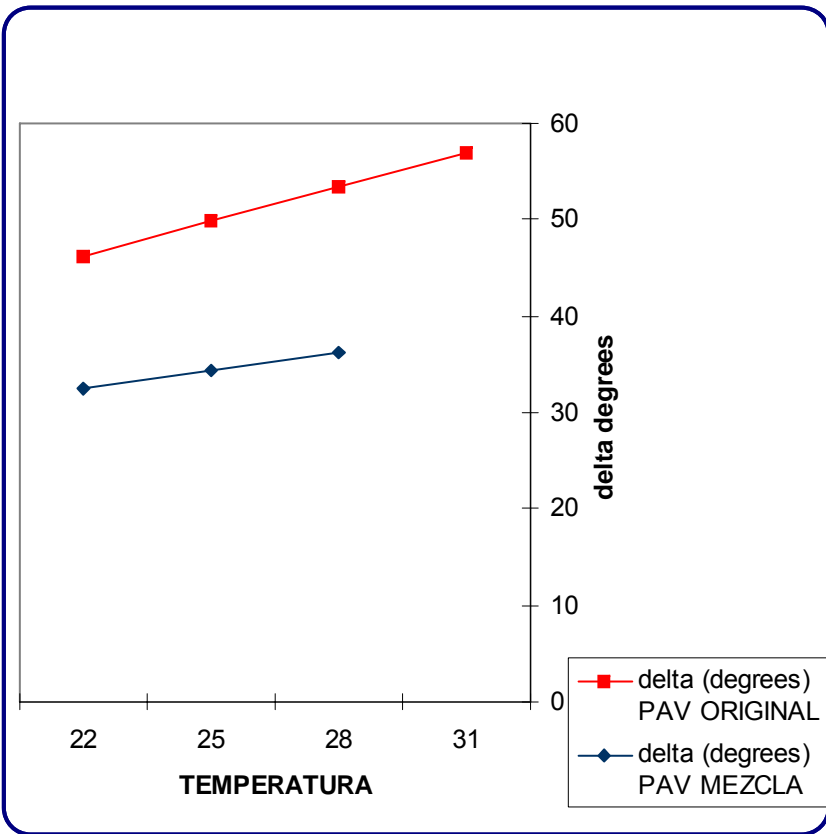
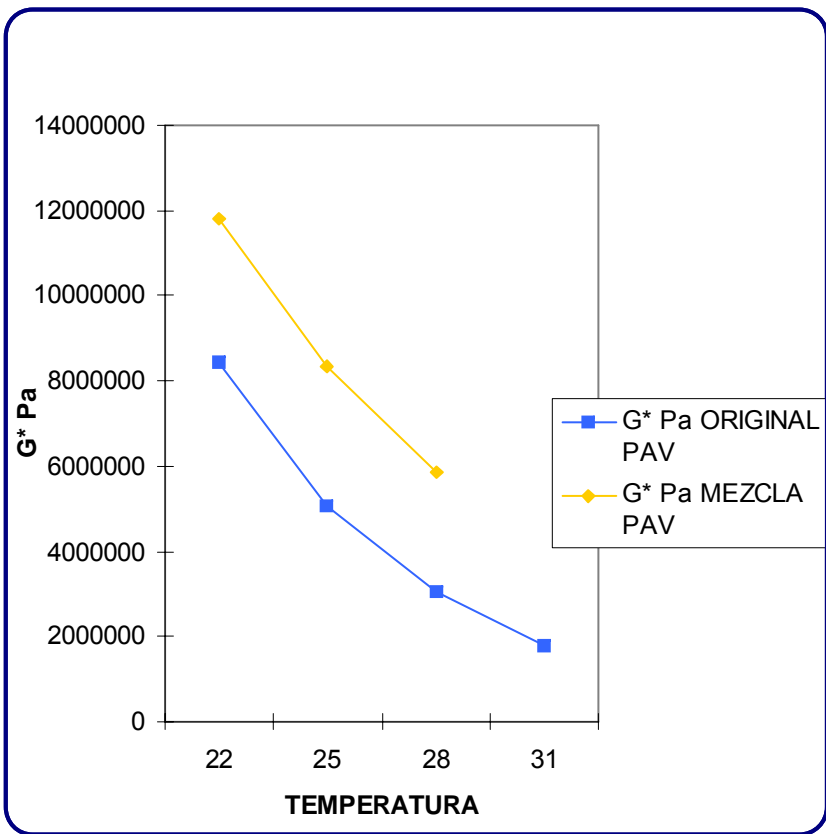
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

TABLA 7.16 Y FIGURA 7.26: BARRIDO DE TEMPERATURAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.27: COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE TEMPERATURAS OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency<br>rad/sec | time<br>s | temperature<br>Deg C | osc.<br>stress<br>Pa | % strain | G*/sin(delta)<br>kPa | G*<br>Pa | delta<br>degrees | G*.sin(delta)<br>kPa |
|------------------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------|------------------|----------------------|
| 1                            | 58,46     | 25                   | 7440                 | 1,0027   | 848,1                | 742100   | 61,06            | 649,4                |
| 1,274                        | 96,45     | 25                   | 8727                 | 0,99933  | 1005                 | 873400   | 60,38            | 759,3                |
| 1,624                        | 128,3     | 25                   | 10280                | 0,99948  | 1192                 | 1029000  | 59,66            | 888,1                |
| 2,068                        | 155       | 25                   | 12060                | 1,0003   | 1408                 | 1206000  | 58,94            | 1033                 |
| 2,638                        | 177,6     | 25                   | 14050                | 1,003    | 1649                 | 1401000  | 58,17            | 1191                 |
| 3,358                        | 208,6     | 25                   | 16280                | 1,001    | 1931                 | 1627000  | 57,42            | 1371                 |
| 4,28                         | 227,2     | 25                   | 19100                | 1,0053   | 2275                 | 1900000  | 56,65            | 1588                 |
| 5,463                        | 247,6     | 25                   | 22260                | 1,0081   | 2668                 | 2210000  | 55,9             | 1830                 |
| 6,947                        | 265,3     | 25                   | 25740                | 1,0095   | 3110                 | 2552000  | 55,15            | 2095                 |
| 8,877                        | 290,7     | 25                   | 29390                | 1,0026   | 3608                 | 2935000  | 54,43            | 2388                 |
| 11,28                        | 315,8     | 25                   | 33470                | 1,0025   | 4150                 | 3346000  | 53,72            | 2697                 |
| 14,42                        | 342,3     | 25                   | 37930                | 1,0088   | 4723                 | 3771000  | 53               | 3012                 |
| 18,26                        | 369,4     | 25                   | 41510                | 1,012    | 5205                 | 4120000  | 52,34            | 3261                 |
| 23,38                        | 395,6     | 25                   | 45270                | 1,0127   | 5738                 | 4500000  | 51,66            | 3530                 |
| 29,73                        | 419,2     | 25                   | 49390                | 1,009    | 6356                 | 4944000  | 51,06            | 3845                 |
| 37,97                        | 443       | 25                   | 54560                | 1,0094   | 7114                 | 5484000  | 50,43            | 4228                 |
| 48,54                        | 466,6     | 25                   | 59870                | 1,0129   | 7904                 | 6041000  | 49,85            | 4618                 |
| 61,36                        | 489,1     | 25                   | 64400                | 1,012    | 8659                 | 6573000  | 49,38            | 4989                 |
| 78,26                        | 524,2     | 25                   | 64420                | 1,0399   | 8604                 | 6530000  | 49,38            | 4957                 |
| 100,3                        | 533,6     | 25                   | 64420                | 0,99855  | 9295                 | 6996000  | 48,82            | 5265                 |



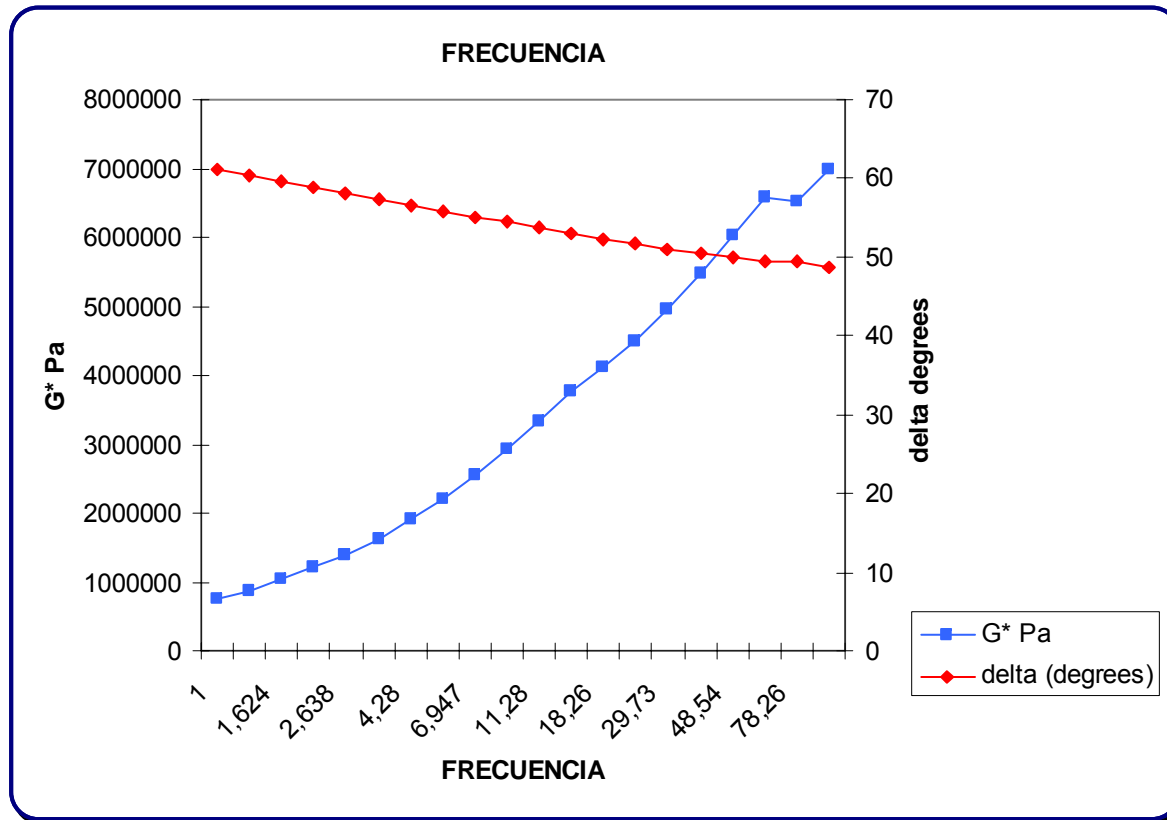
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.17: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR  
CON ASFALTO ORIGINAL DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.28: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*       | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|----------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa       | degrees | kPa           |
| 1                 | 58,39 | 22          | 36490          | 0,99213  | 6128          | 3678000  | 36,89   | 2208          |
| 1,274             | 96,26 | 22          | 40280          | 0,99849  | 6747          | 4034000  | 36,72   | 2412          |
| 1,624             | 127,9 | 22          | 44250          | 0,99885  | 7455          | 4431000  | 36,46   | 2633          |
| 2,068             | 154,6 | 22          | 48570          | 0,99832  | 8242          | 4866000  | 36,18   | 2873          |
| 2,638             | 177,3 | 22          | 53340          | 0,9994   | 9099          | 5338000  | 35,92   | 3132          |
| 3,358             | 208,3 | 22          | 58860          | 1,0007   | 10260         | 5883000  | 34,99   | 3374          |
| 4,28              | 234,4 | 22          | 64430          | 0,99985  | 11310         | 6446000  | 34,74   | 3673          |
| 5,463             | 263,5 | 22          | 70580          | 1,0009   | 12470         | 7055000  | 34,46   | 3991          |
| 6,947             | 288   | 22          | 77100          | 1,0006   | 13710         | 7710000  | 34,22   | 4336          |
| 8,877             | 313,4 | 22          | 84460          | 1,0002   | 15120         | 8451000  | 33,98   | 4723          |
| 11,28             | 338,6 | 22          | 92030          | 1        | 16580         | 9213000  | 33,77   | 5121          |
| 14,42             | 357,4 | 22          | 99470          | 0,98807  | 18260         | 1,01E+07 | 33,53   | 5569          |
| 18,26             | 368,5 | 22          | 99470          | 0,89873  | 20240         | 1,11E+07 | 33,23   | 6080          |
| 23,38             | 379,4 | 22          | 99470          | 0,8295   | 22130         | 1,20E+07 | 32,93   | 6541          |
| 29,73             | 389,5 | 22          | 99470          | 0,77157  | 24020         | 1,30E+07 | 32,65   | 6991          |
| 37,97             | 399,5 | 22          | 99470          | 0,71568  | 26160         | 1,40E+07 | 32,37   | 7498          |
| 48,54             | 409,5 | 22          | 99470          | 0,6577   | 28780         | 1,53E+07 | 32,11   | 8131          |
| 61,36             | 419,4 | 22          | 99460          | 0,5978   | 32040         | 1,69E+07 | 31,87   | 8933          |
| 78,26             | 428,9 | 22          | 99450          | 0,5484   | 35390         | 1,86E+07 | 31,68   | 9763          |
| 100,3             | 438,6 | 22          | 99420          | 0,50675  | 38900         | 2,04E+07 | 31,56   | 10660         |



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

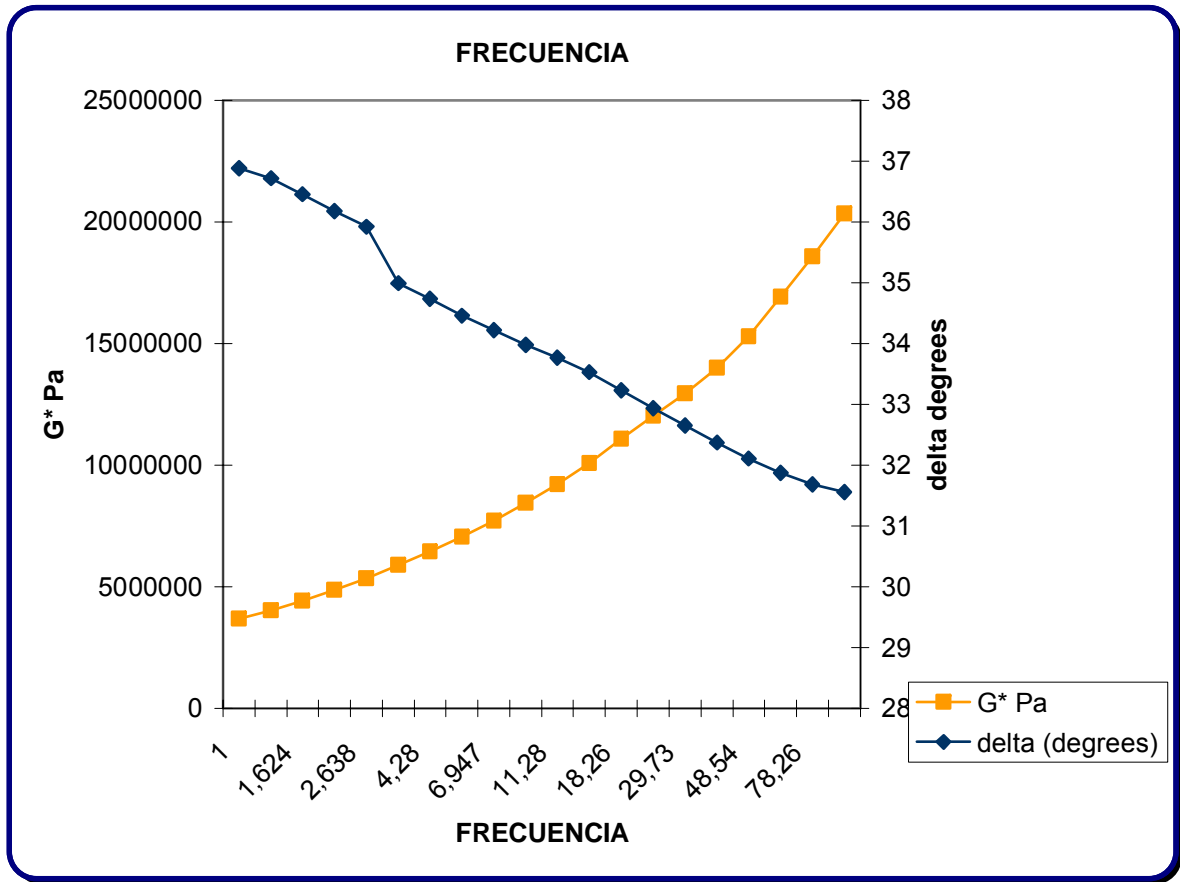
DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.18: BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO





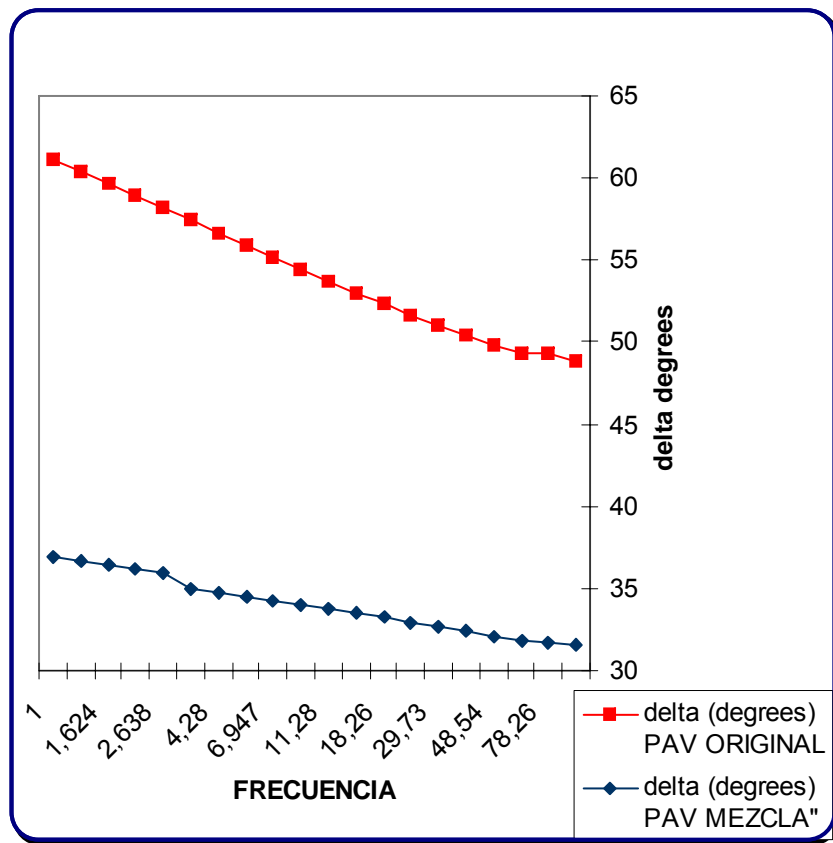
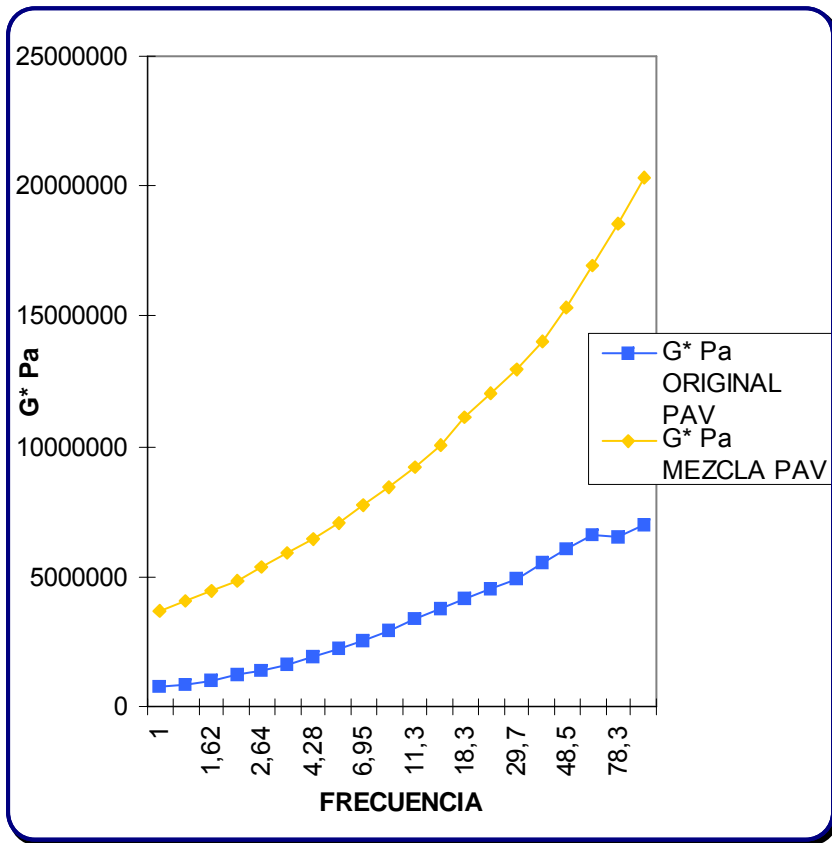
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.29 : BARRIDO DE FRECUENCIAS OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.30: COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE FRECUENCIAS OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*      | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|---------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa      | degrees | kPa           |
| 9,987             | 25,17 | 25          | 148            | 5,24E-03 | 3543          | 2828000 | 52,97   | 2258          |
| 9,987             | 60,29 | 25          | 6769           | 0,26693  | 3156          | 2541000 | 53,64   | 2047          |
| 9,987             | 95,46 | 25          | 13850          | 0,53025  | 3231          | 2618000 | 54,12   | 2121          |
| 9,987             | 130,7 | 25          | 19550          | 0,80402  | 2994          | 2437000 | 54,49   | 1984          |
| 9,987             | 165,9 | 25          | 22690          | 1,0553   | 2630          | 2156000 | 55,05   | 1767          |
| 9,987             | 201,1 | 25          | 26830          | 1,3401   | 2441          | 2007000 | 55,33   | 1651          |
| 9,987             | 236,2 | 25          | 28590          | 1,6086   | 2164          | 1782000 | 55,45   | 1468          |
| 9,987             | 279,5 | 25          | 29780          | 1,904    | 1900          | 1569000 | 55,71   | 1296          |
| 9,987             | 322,9 | 25          | 27460          | 2,166    | 1546          | 1273000 | 55,42   | 1048          |
| 9,987             | 366,1 | 25          | 26070          | 2,4477   | 1313          | 1070000 | 54,61   | 872,3         |
| 9,987             | 409,4 | 25          | 23840          | 2,7481   | 1092          | 872900  | 53,09   | 698           |
| 9,987             | 452,6 | 25          | 20300          | 3,0526   | 885,5         | 670600  | 49,23   | 507,9         |
| 9,987             | 495,9 | 25          | 17500          | 3,2418   | 780,4         | 546200  | 44,42   | 382,3         |
| 9,987             | 531,2 | 25          | 17270          | 3,4784   | 742,1         | 502900  | 42,66   | 340,8         |
| 9,987             | 566,4 | 25          | 17550          | 3,7399   | 720,5         | 475800  | 41,33   | 314,2         |
| 9,987             | 593,8 | 25          | 17990          | 4,0002   | 701,6         | 456200  | 40,56   | 296,7         |
| 9,987             | 613   | 25          | 18820          | 4,2478   | 697,8         | 449600  | 40,12   | 289,7         |
| 9,987             | 640,2 | 25          | 19290          | 4,5273   | 681,8         | 432800  | 39,4    | 274,7         |
| 9,987             | 667,6 | 25          | 19870          | 4,7944   | 675           | 421300  | 38,62   | 262,9         |
| 9,987             | 694,8 | 25          | 20230          | 5,0573   | 663,2         | 406900  | 37,85   | 249,7         |



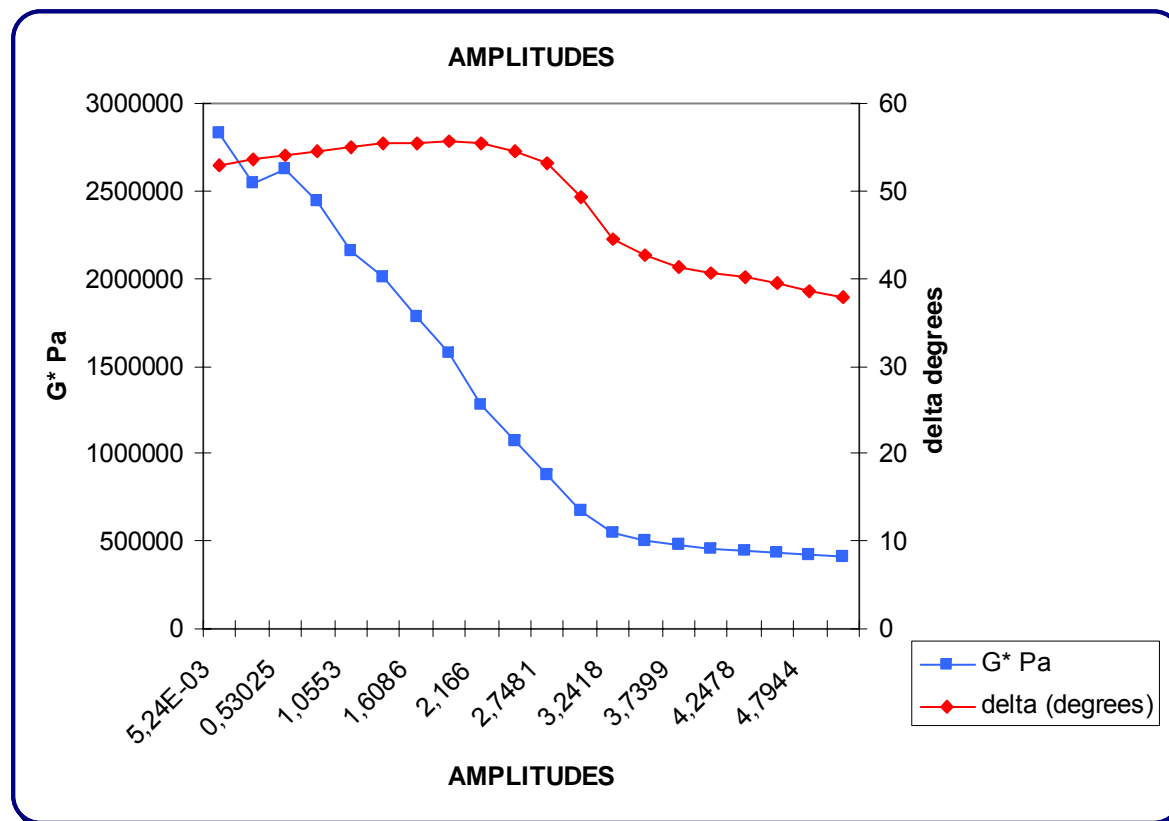
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.19: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR  
CON ASFALTO ORIGINAL DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.31: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

| ang.<br>frequency | time  | temperature | osc.<br>stress | % strain | G*/sin(delta) | G*      | delta   | G*.sin(delta) |
|-------------------|-------|-------------|----------------|----------|---------------|---------|---------|---------------|
| rad/sec           | s     | Deg C       | Pa             |          | kPa           | Pa      | degrees | kPa           |
| 9,987             | 25,23 | 22          | 444,2          | 5,18E-03 | 15750         | 8582000 | 33,02   | 4677          |
| 9,987             | 52,38 | 22          | 22680          | 0,26841  | 15440         | 8457000 | 33,22   | 4633          |
| 9,987             | 79,58 | 22          | 47300          | 0,5332   | 16110         | 8879000 | 33,45   | 4894          |
| 9,987             | 106,8 | 22,1        | 69130          | 0,79746  | 15670         | 8677000 | 33,61   | 4804          |
| 9,987             | 126,1 | 22,1        | 91600          | 1,055    | 15590         | 8691000 | 33,87   | 4843          |
| 9,987             | 145,4 | 22,1        | 99470          | 1,1644   | 15290         | 8551000 | 34,01   | 4782          |
| 9,987             | 164,6 | 22,1        | 99470          | 1,1676   | 15220         | 8527000 | 34,07   | 4776          |
| 9,987             | 183,9 | 22,1        | 99470          | 1,1692   | 15190         | 8516000 | 34,1    | 4775          |
| 9,987             | 195,3 | 22,1        | 99470          | 1,168    | 15210         | 8524000 | 34,09   | 4778          |
| 9,987             | 206,5 | 22,1        | 99470          | 1,1676   | 15210         | 8527000 | 34,09   | 4780          |
| 9,987             | 217,7 | 22,1        | 99470          | 1,1653   | 15240         | 8544000 | 34,09   | 4789          |
| 9,987             | 236,9 | 22          | 99470          | 1,1647   | 15240         | 8548000 | 34,13   | 4796          |
| 9,987             | 248   | 22          | 99470          | 1,1614   | 15290         | 8573000 | 34,1    | 4807          |
| 9,987             | 259,3 | 22          | 99470          | 1,1606   | 15300         | 8579000 | 34,11   | 4810          |
| 9,987             | 278,4 | 22          | 99470          | 1,1614   | 15270         | 8572000 | 34,14   | 4811          |
| 9,987             | 297,7 | 22          | 99470          | 1,1607   | 15280         | 8578000 | 34,15   | 4815          |
| 9,987             | 309   | 22          | 99470          | 1,1588   | 15310         | 8592000 | 34,13   | 4821          |
| 9,987             | 328,1 | 21,9        | 99470          | 1,1596   | 15290         | 8586000 | 34,16   | 4821          |
| 9,987             | 339,2 | 21,9        | 99470          | 1,1587   | 15310         | 8593000 | 34,14   | 4822          |
| 9,987             | 350,3 | 21,9        | 99470          | 1,1579   | 15320         | 8598000 | 34,14   | 4825          |



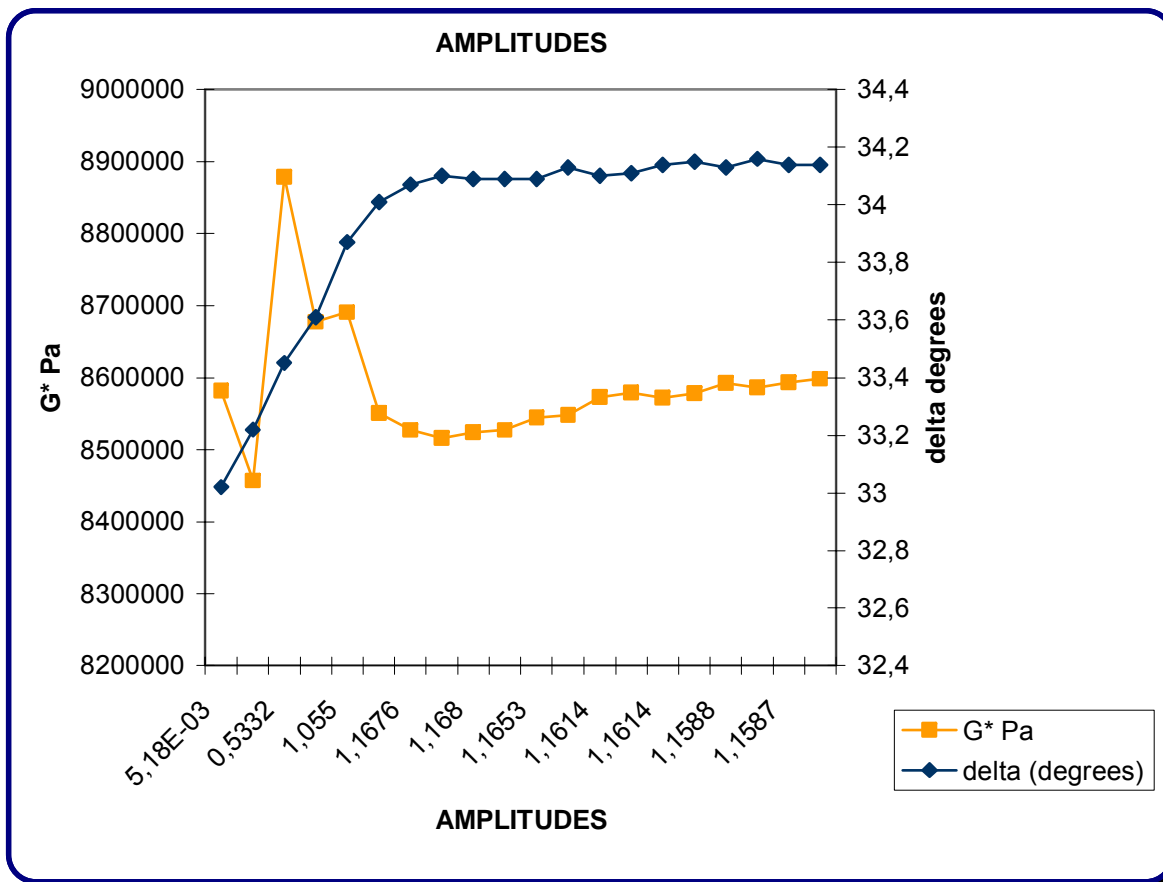
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL  
ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE  
MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y  
AMBIENTAL

TABLA 7.20: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON  
ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



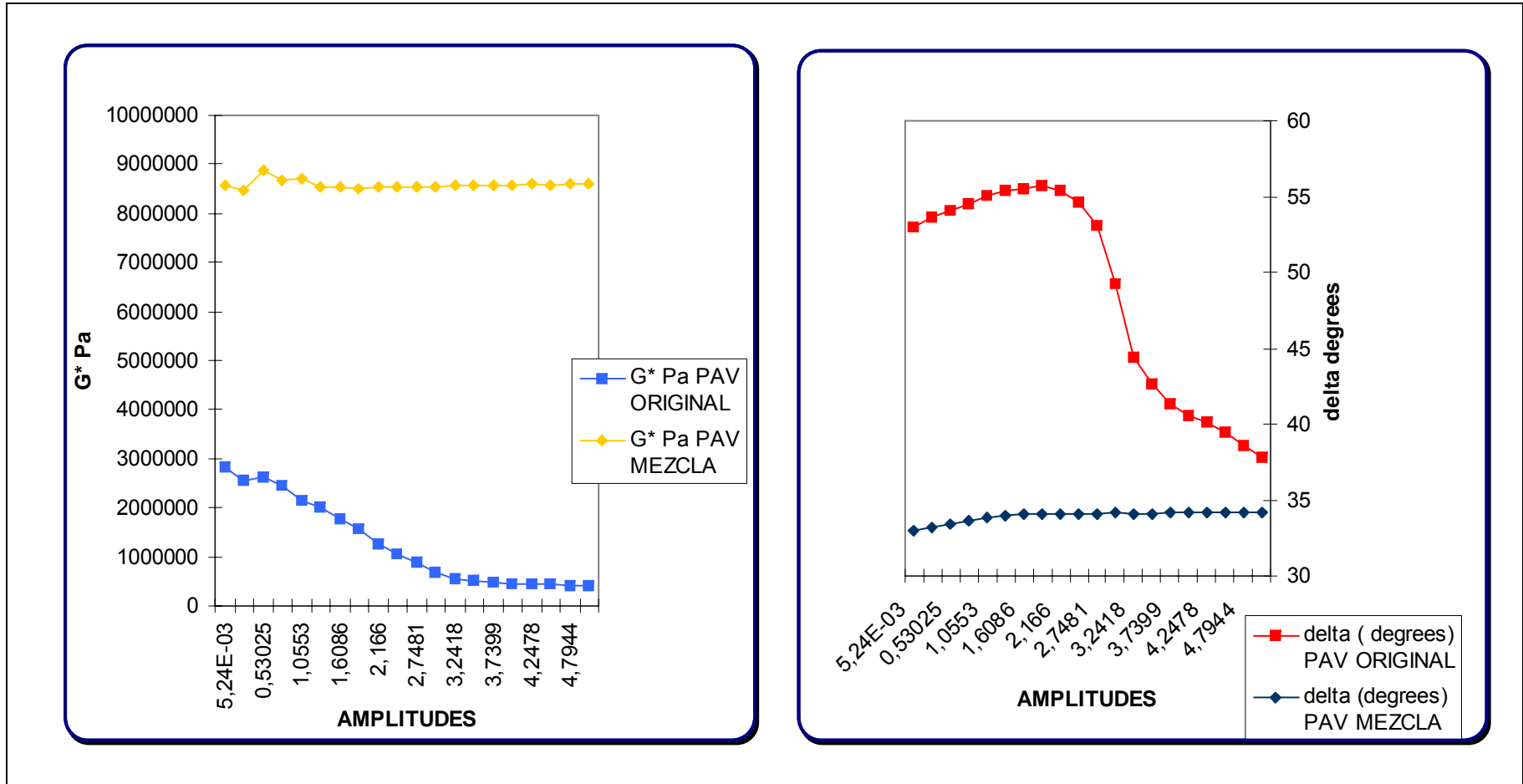
TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.32: BARRIDO DE AMPLITUDES OBTENIDO EN EL DSR CON ASFALTO EXTRAÍDO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO



TESIS DE GRADO: INFLUENCIA DEL ENVEJECIMIENTO EN LA FATIGA DE MATERIALES ASFÁLTICOS

DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL Y AMBIENTAL

FIGURA 7.33: COMPARACIÓN DE BARRIDOS DE AMPLITUDES OBTENIDOS EN EL DSR CON ASFALTO ORIGINAL Y CON ASFALTO DE MEZCLA DE PAV

MIC 2004 -1 -3

JAVIER LEONARDO ALVAREZ CASTRO

## 7.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al incrementar la temperatura observamos un aumento en el ángulo de fase reflejado en la respuesta del asfalto disminuyendo la rigidez del mismo en el modulo complejo

Observando el comportamiento del asfalto original se observa que a medida que incrementa la frecuencia aplicada hay un aumento del modulo complejo y una disminución en el ángulo de fase.

Cuando analizamos el incremento de temperatura en el ensayo original RTFO y el extraído de mezcla los valores tendrían que ser similares, pero no es así puesto que la rigidez en el asfalto de mezcla se incrementa en la misma temperatura del original el doble, aumentando su rigidez a mayores temperaturas y disminuyendo la respuesta que el resultado observado en el asfalto original.

En el caso de barrido de frecuencias de original RTFO y mezcla el resultado en cuanto a rigidez es muy similar mostrando un modulo complejo con valores muy cercanos en ambos ensayos, lo que no podemos decir en el ángulo de fase puesto que la respuesta es mas inmediata en el original que en el extraído de mezcla.

Observando el asfalto RTFO y el de mezcla en cuanto a amplitud podemos decir que es más rígido el asfalto extraído de mezcla pero su respuesta es menor.

El asfalto después de haber envejecido en PAV muestra que es más susceptible a temperaturas con respecto a los originales sin envejecer disminuyendo la temperatura en la cual perderá resistencia con valores de rigidez muy por encima de los originales demostrando que este asfalto esta ya fatigado.



Desde el punto de vista comparativo de los dos asfaltos (el original envejecido en PAV y el extraído de mezcla fatigado y envejecido en PAV) es más notable la rigidez en el extraído de mezcla puesto que este asfalto no solo fue envejecido sino que al extraerlo de la mezcla se elevó a grandes temperaturas para recuperarlo lo que hizo que el asfalto perdiera aún más sus propiedades, disminuyendo la respuesta por su condición de envejecimiento.

Este comportamiento anterior con las temperaturas se ve reflejado en los barridos de frecuencias y amplitudes alcanzando valores muy altos de rigidez y menores respuestas en el asfalto extraído de mezcla y envejecido.

Cuando se analizan temperaturas bajas los valores de rigidez y respuesta tienden a tener unas variaciones mayores que cuando trabajamos con temperaturas ordinarias o altas.

## 8. CONCLUSIONES

Para analizar el comportamiento a la fatiga de la mezcla es importante tener en cuenta las características del asfalto utilizado y su desempeño cuando está en funcionamiento. Según análisis realizados en universidades como la Universidad Industrial de Santander, el asfalto de Barrancabermeja es un asfalto con pocos contenidos de aceites, la parte saturada de los asfaltos, (esta composición química puede ser corroborada con un análisis SARA) lo cual lo hace muy susceptible a altas temperaturas ocasionando en el asfalto que las propiedades químicas cambien, convirtiendo los aceites en resinas, las resinas en asfáltenos, rigidizando la mezcla y suprimiéndole las propiedades necesarias para hacerlo trabajable.

Este asfalto por su poco contenido de saturados es un asfalto susceptible a altas temperaturas, pero a temperaturas ordinarias tiene gran respuesta por su alto contenido de aromáticos y resinas lo cual le permitirá tener menor ahuellamiento y menor fisuración por fatiga por sus propiedades cementantes o aglutinantes.

La mezcla fatigada-envejecida sufrió una serie de cambios que conllevaron al comportamiento observado en la figura 7.8 el cual mantiene la pendiente de la fatiga original reduciendo su resistencia a la deformación por su condición de envejecimiento en la que se encontraba, el oxígeno acompañado con altas temperaturas ocasiono la evaporación de los compuestos livianos por la presencia del oxígeno dentro de los vacíos de la mezcla, esto hizo que el material se endureciera al aumentar las fuerzas de interacción entre moléculas reduciendo la

movilidad molecular y ocasionado tal rigidez que la mezcla no permitió mayor deformación que la presentada en los ensayos.

El comportamiento de la mezcla envejecida y fatigada se presenta como un tipo de comportamiento ideal puesto que la mezcla tiene características de envejecimiento a una temperatura constante pero muy alta, en la cual no se tiene en cuenta los cambios abruptos de temperatura que sufren las mezclas durante servicio la cual podría presentar respuestas ante rigidez diferentes a las obtenidas en el ensayo.

Teniendo en cuenta que la deformación al millón de ciclos de carga es el parámetro definitivo para diseño de estructuras de pavimentos flexibles y capas asfálticas gruesas es importante entender que la fatiga con mezcla original tiene unos resultados óptimos para este diseño, lo que no podemos decir de la fatigada envejecida la cual presentaría una deformación al millón de ciclos muy pequeña, lo anterior significaría que el ancho de la carpeta sería muy grande y por consiguiente de elevados costos, mientras que la original presenta condiciones óptimas; es conveniente establecer un parámetro de diseño en el cual se tuviera en cuenta los dos tipos de comportamiento para lo cual entraría a jugar la probabilidad de falla de la estructura a diseñar teniendo en cuenta que este tipo de mezcla después de años de servicio se comportaría ineficientemente ante la aplicación de cargas.

Cuando realizamos el ensayo de fatiga el asfalto al estar en contacto con el agregado sufre en igual magnitud y se fatiga perdiendo inevitablemente sus características iniciales, y si a esto le sumamos el proceso de calentamiento que sufrió al compactarse y el calentamiento que se realiza para extraerlo de la mezcla concluimos que inevitablemente sufre alteraciones. En el momento de caracterizarlo en Superpave ese cambio que sufrió lo observamos representado en el ángulo de fase o respuesta ante la aplicación de cargas, mientras que su rigidez se mantuvo con respecto al original sin extraer lo cual nos lleva a concluir que el asfalto al

extraerlo de mezcla perderá respuesta pero mantendrá rigidez, este mismo comportamiento no lo observamos en el asfalto extraído de mezcla envejecido en PAV, puesto que este asfalto ya había perdido sus características iniciales en el proceso de envejecimiento y sufrió una alteración adicional por el ensayo de fatiga y el calentamiento al extraerlo, cuando lo caracterizamos en Superpave los análisis comparativos arrojaron resultados diferentes, demostrando que cuando el asfalto está envejecido los procesos de fatiga afectan en mayor medida al asfalto que cuando sufren el calentamiento en planta representado en el ensayo PAV y la mezcla original, con resultados de deterioro muy grandes.

Al obtener los resultados de la caracterización de los asfaltos originales y extraídos de mezcla se puede concluir que la rigidez del asfalto aumenta a medida que los asfaltos sufren alteraciones producidas por el calentamiento, envejecimiento y oxidación, mostrando casos críticos como el asfalto extraído de fatiga envejecida, el cual sufrió envejecimiento, oxidación y un calentamiento adicional que era necesario para la extracción del asfalto rigidizándolo aun más que el asfalto envejecido original disminuyendo la respuesta reflejada en el ángulo de fase.

Cuando realizamos el ensayo de fatiga la temperatura es ambiente más o menos 20° C porque en esta se presentara la fatiga en las mezclas, desde el punto de vista reológico cuando utilizamos un asfalto original, se calienta y se envejece encontramos temperaturas de servicio para las cuales el asfalto puede comportarse de una manera óptima. El asfalto extraído de la mezcla fatigada y envejecida presenta las propiedades más críticas en las cuales el asfalto se encontrará después de haber entrado en servicio, en este análisis encontramos temperatura de servicio de 22°C, cuando analizamos  $G^* \times \text{sen } \delta$  que es el parámetro que controla la rigidez del material, lo anterior corrobora desde el punto de vista reológico los ensayos de diseño racional (ensayo de Fatiga), puesto que la temperatura óptima

del asfalto cuando entra en servicio es similar a la temperatura a la que se realizó la fatiga, demostrando que los datos arrojados por el ensayo son verídicos en cuanto a condiciones de temperatura.

El asfalto envejecido y fatigado extraído de mezcla muestra una deformación representada en la amplitud cercana al 5%, esto se debe a que la baja temperatura y la rigidez tan alta no permiten mayores deformaciones, contrario a lo que observamos en los asfaltos originales y los de RTFO con amplitudes del 100%.

El material envejecido en PAV tanto en mezcla como en original es un material de comportamiento elástico representado en valores bajos de ángulos de fase  $\delta$ .

## 9. RECOMENDACIONES

Es definitivo que el comportamiento de las mezclas fatigas y envejecidas se debe a las características del asfalto de Barrancabermeja, sabiendo que el comportamiento de este asfalto es optimo en temperaturas ordinarias y no tanto en temperaturas altas podríamos recomendar si se utiliza en lugares que alcancen temperaturas elevadas modificar las propiedades químicas del asfalto para alcanzar mayor tolerancia cuando se expone a elevadas temperaturas aumentando el contenido de saturados disminuyendo inevitablemente las resinas y los aromáticos que le dan propiedades cementantes pero que en temperaturas altas no juegan un papel determinante como los antes mencionados, esta alteración permitiría un asfalto mucho mas resistente a las altas temperaturas por su contenido de saturados y las cargas aplicadas afectarían en menor proporción a la mezcla dándole mayor resistencia y durabilidad. En cuanto a la oxidación de la mezcla mejoraría su comportamiento porque disminuiría el contenido de partículas livianas que son las que se evaporan cuando entran en contacto con el oxigeno, la circulación de aire que implica el paso del oxigeno no afectaría la mezcla en gran medida y la mezcla seria mas flexible.

Al observar el comportamiento de la mezcla fatigada y envejecida podemos analizar que el material esta muy deteriorado y de comportamiento muy rígido el cual presenta grandes deformaciones con pocos ciclos de carga; por esta razón este tipo de mezcla podría utilizarse en lugares con tráficos de bajo volumen como ciclo rutas, utilizarse en procesos de reciclaje con nuevas mezclas o utilizarlo en vías de segundo orden, en las cuales el volumen de trafico es mínimo y las cargas aplicadas muy inferiores.

Aunque en la actualidad se utilizan diferentes modificadores para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas, uno de los mejores en cuanto a evitar el deterioro progresivo de la mezcla por envejecimiento y oxidación presente en la vida útil del pavimento son los polímeros, pero también se podrían utilizar antioxidantes o aminas. Los polímeros son compuestos químicos y los encontramos en materiales plásticos y gomas que se adicionan al asfalto. Las razones por las cuales se modifica principalmente es por que se amplía el rango de temperatura de desempeño del material y se mejora la resistencia al envejecimiento del material; hay que tener en cuenta que existen inconvenientes a la hora de utilizar polímeros como lo son la manufactura del material, el proceso de acoplamiento con el asfalto, las pruebas realizadas para determinar si realmente funciona y los costos que se aumentan en la mezcla al utilizar el polímero.

En el momento de realizar ensayos con asfaltos fuera de la tecnología Superpave, es conveniente utilizar el equipo RTFO, puesto que los asfaltos cuando entran en servicio nunca están totalmente originales sino que han sufrido el proceso de calentamiento en el momento de mezcla y compactación y mediante este equipo los ensayos se realizarán bajo condiciones reales.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Norma INVE-708 "Perdidas por calentamiento de aceites y compuestos asfálticos ( RTFO)".
- ASTHO TP1- 98 "Método estándar de ensayo para envejecimiento acelerado de cementos asfálticos usando una cámara presurizada de envejecimiento".
- KENNEDY ,T.W y ANDERSON R.M. "The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-407, 1994,
- AFANASIEVA Natalia, ALVAREZ Mario y AREYAN Javier. "Envejecimiento natural de los asfaltos colombianos", XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, 1994.
- COMINSKY R.J., LEAHY R.B. y HARRIGAN E.T. "Level one mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", Strategic Highway Research Program, SHRP-A-408, 1994.
- ARENAS LOZANO, Hugo León. "Tecnología del cemento asfáltico".
- The Asphalt Institute, "Mix Design Methods for Asphalts Concrete and other Hot-Mix Types", Manual series No 2 (MS-2), sixth edition, 1993.



- Instituto Chileno del asfalto. "Especificaciones para asfalto", boletín técnico No 4, Miraflores 113, Septiembre de 2001.