



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:
“VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN LAS
MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL INCREMENTO EN EL MÓDULO
RESILIENTE (POR ENVEJECIMIENTO)”**

**AUTOR (A):
DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
Ingeniero Civil**

**TUTOR:
ING. GUSTAVO GARCÍA CAPUTI**

Guayaquil, Ecuador
2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO** como requerimiento parcial para la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**

TUTOR

Ing. Gustavo García Caputi

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcívar

Guayaquil, a los 11 del mes de febrero del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL INCREMENTO EN EL MODULO RESILIENTE (POR ENVEJECIMIENTO)**” previa a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 11 del mes de febrero del año 2015

EL AUTOR

DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL INCREMENTO EN EL MODULO RESILIENTE (POR ENVEJECIMIENTO)”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 11 del mes de febrero del año 2015

EL AUTOR:

DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que formaron parte de este proceso investigativo, al personal técnico del laboratorio de asfalto de la cantera de Duran, permitiéndome realizar sin obstáculos el procedimiento establecido para el desarrollo de la investigación.

Por su incondicional apoyo, a mis padres que fueron los pilares fundamentales en mi proceso de formación académica y moral.

Al Dr. Rolando Vila, por brindarme su apoyo en la elaboración correcta de los ensayos, de los cuales se obtuvo la información para la formulación de las conclusiones.

A mi tutor Ing. Gustavo García, por su guía en todo el proceso de investigación, análisis de los resultados y el establecimiento de la estructura de la tesis.

DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO

DEDICATORIA

A mi padre, quien con su ejemplo de superación, trabajo y empeño, direcciono mi vida a ser una persona honesta y responsable en todo lo que hago.

A mi madre, que me enseñó a tener calma en los momentos de angustia, que me motivaba y extendía su mano cuando las cosas se ponían difíciles.

A mis hermanos quienes con su cariño me fortalecían en este duro camino.

DANIEL ALEJANDRO CEDEÑO GUERRERO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE INGENIERÍA
(CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL

CALIFICACIÓN

ING. GUSTAVO GARCÍA CAPUTI

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCION	1
1.1	Antecedentes:	1
1.2	Descripción del problema	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo General	2
1.3.2	Objetivo Especifico	2
2	CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS	3
2.1	Generalidades	3
2.2	Cemento asfáltico	3
2.3	Agregados minerales	4
2.4	Propiedades de las mezclas asfálticas	5
2.4.1	Estabilidad	6
2.4.2	Durabilidad	6
2.4.3	Resistencia a la fatiga	7
2.5	Parámetros volumétricos	7
3	CAPÍTULO 3: FATIGA EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	12
3.1	Ensayos	13
3.1.1	Ensayos diametrales	14
4	CAPITULO 4: FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A FATIGA	16
4.1	Métodos de compactación de la muestra	16
4.2	Carga	19
4.3	Rigidez de la mezcla	20
4.4	Contenido de asfalto y vacíos de aire	20
4.5	Envejecimiento	21
4.5.1	Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento	22

5	CAPITULO 5: MODULO RESILIENTE	30
5.1	Concepto	30
5.2	Factores que influyen en el comportamiento resiliente	31
6	CAPITULO 6: DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	35
6.1	Introducción	35
6.2	Desarrollo	36
6.3	Caracterización de los materiales	37
6.4	Elaboración de las briquetas a ensayar	37
6.4.1	Granulometría primeros dos lotes de briquetas	43
6.4.2	Granulometría modificada para el tercer lote de briquetas	44
6.5	Envejecimiento en el horno	45
7	CAPITULO 7: PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANALISIS DE RESULTADOS	46
7.1	Ensayos de modulo y fatiga para la recolección de información	46
7.2	Análisis incremento del módulo con respecto al envejecimiento en el horno	49
7.3	Análisis ensayos de fatiga	54
7.3.1	Lote de briquetas a 40 golpes de compactación	54
7.3.2	Lote de briquetas a 75 golpes de compactación	55
7.3.3	Lote de briquetas a 75 golpes de compactación (granulometría modificada)	56
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFIA	63
	ANEXOS	65

INDICE DE TABLAS

Tabla A.....	6-4	Propiedades	briquetas	muestra	39
Tabla B.....	6-2	Propiedades	briquetas	muestra	40
Tabla C.....	6-3	Propiedades	briquetas	muestra	41
Tabla B.....	6-4	Granulometría	lotes	A y	42
Tabla C.....	6-5	Granulometría	modificada	lote	43
Tabla 7-1 A).....	Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada			(muestra)	45
Tabla 7-2 B).....	Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada			(muestra)	46
Tabla 7-3 C).....	Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada			(muestra)	47

INDICE DE GRAFICOS

Grafico 2-1	Tanque de almacenamiento asfalto AC-20 en la cantera Duran....	4
Grafico 2-2	Tolvas que contienen agregados en una planta de mezcla asfáltica (Cantera Duran).....	5
Grafico 2-3	Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada.....	7

Grafico 2-4 Volumen de aire, volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido.....	11
Grafico 3-1 Agrietamiento severo por fatiga.....	12
Grafico 3-2 Equipo NAT de la UCSG.....	14
Grafico 4-1 Martillo Marshall electrónico de la UCSG.....	17
Grafico 4-2 Compactador giratorio de la UCSG.....	18
Grafico 4-3 Ensayo de fatiga a esfuerzo constante y a deformación constante.....	19
Grafico 4-4 Separación en fracciones SARA para algunos asfaltos.....	23
Grafico 4-5 Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas.....	25
Grafico 4-6 Etapas en el proceso de envejecimiento.....	28
Grafico 5-1 Deformaciones unitarias bajo cargas repetidas.....	31
Grafico 5-2 Influencia de la saturación sobre el Mr.....	32
Grafico 5-3 Efecto del contenido de finos sobre el módulo.....	34
Grafico 6-1 Cantera de Duran, Concreto y Prefabricados C. Ltda.....	37
Grafico 6-2 Mezcla asfáltica utilizada para la elaboración de las briquetas (2 primeros lotes).....	38
Grafico 6-3 Martillo Marshall utilizado para la compactación de las briquetas.....	38
Grafico 6-4 Colocación de las briquetas en el horno.....	44
Grafica 7-2 Variación del módulo con respecto al envejecimiento (curva logarítmica).....	48

Grafico 7-3 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra A).....	50
Grafico 7-4 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra B).....	52
Grafico 7-5 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra C).....	54
Grafica 7-6 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (conjunto de todas las muestras).....	56

RESUMEN (ABSTRACT)

El presente trabajo investigativo presenta el análisis de una mezcla asfáltica de granulometría densa proveniente de la planta de Duran. La mezcla asfáltica se compactó a dos niveles, realizándose 3 lotes de briquetas. Los dos primeros lotes con la misma granulometría con 40 y 75 golpes de compactación y el tercer lote con una granulometría modificada a 75 golpes de compactación buscando un mejor comportamiento a la fatiga.

A las muestras se las envejecieron en un horno a 85°C buscando incrementar sus módulos de rigidez para así realizar ensayos de módulos y fatiga, y así establecer qué relación existe entre estos ensayos mencionados. Estos ensayos se hicieron con una deformación unitaria inicial de 135 micro-strain, en base al criterio presentado en la tesis del estudiante William Macero.

Se obtuvo al final tablas relacionando la resistencia a la fatiga y el incremento del módulo resiliente con respecto al envejecimiento en el horno.

Palabras Claves: mezclas asfálticas, fatiga, módulo resiliente, deformación unitaria, envejecimiento, compactación

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCION

1.1 Antecedentes:

Uno de los elementos más importantes que influyen en el desarrollo de un país es la construcción de vías. La mezcla asfáltica en caliente es quizás el principal material empleado en la construcción de pavimentos flexibles en nuestro país. Es necesario destacar la importancia que tienen las mezclas asfálticas en la estructura del pavimento, pues se espera obtener de ellas estabilidad, durabilidad y economía. A pesar del valor y uso que se le da a las mezclas asfálticas, la caracterización de la fatiga para asegurar un adecuado comportamiento en el campo aún no está bien establecida, los modelos predictivos de fatiga no han sido desarrollados del todo.

Bajo cargas de tráfico y cambios climáticos, las mezclas asfálticas presentan un comportamiento no lineal, visco-elástico y anisotrópico. Sus propiedades mecánicas y comportamiento dependen de la carga, temperatura, y dirección de la carga. Con el tiempo, las mezclas asfálticas se envejecen y además tienen el potencial de sanarse durante los periodos de descanso de las cargas de tráfico. Evidentemente, este complejo comportamiento de las mezclas asfálticas como respuesta a cargas de tráfico y cambios ambientales hace difícil modelar adecuadamente las propiedades de las mezclas asfálticas, particularmente con respecto a la falla por fatiga.

Es bien sabido que módulos de rigidez elevados aseguran mezclas estables. Pero ese incremento de modulo no debe ser excesivo puesto que también se ha documentado que módulos muy elevados generan problemas de rigidizacion a la mezclas y más aún cuando ese incremento es causado por el envejecimiento. Las mezclas asfálticas incrementan sus módulos con el paso del tiempo y el nivel de envejecimiento, esta rigidización produce también deterioro en la resistencia a la fatiga de estas mezclas.

1.2 Descripción del problema

Una mezcla asfáltica que presenta módulos de rigidez altos, es considerada como una buena mezcla, pero se debe tener cuidado al momento de pensar que exclusivamente un elevado modulo significa que la mezcla asfáltica presentara un comportamiento optimo ante la fatiga. Evidentemente existen valores mínimos de módulos que se deben alcanzar para evitar deformaciones, pero no hay limitaciones con respecto a valores máximos de módulos. Además no hemos encontrado en la bibliografía una relación entre la variación del incremento del módulo y la resistencia a la fatiga.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Mediante información presentada en tesis similares, establecer si hay relación para las mezclas asfálticas de uso común en el Ecuador entre el módulo resiliente medido a tracción indirecta y la resistencia a la fatiga probada por el mismo método de ensayo.

1.3.2 Objetivo Especifico

- Comprobar si el criterio presentado en la tesis de William Macero es válido, y aplicable a la generalidad de mezclas asfálticas densas que se utilizan en el Ecuador; el cual dice que una mezcla asfáltica que supere las 10000 repeticiones con una deformación unitaria inicial de 135 micro – strain se considera que tiene un buen comportamiento a la fatiga.

2 CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Generalidades

Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados y cemento asfáltico en proporciones exactas que forman parte de un sistema multicapas llamado pavimento. Las mismas que sirven para proteger las capas granulares de base subyacente de las inclemencias climáticas y de la circulación de los vehículos ya que están destinadas a ser la capa de rodamiento o capas inferiores.

Por otro lado son las que reciben las cargas debiendo absorber la mayor parte de esa energía, por tal motivo su función es proporcionar confort y resistencia al tránsito, y a las condiciones climáticas.

2.2 Cemento asfáltico

En general llamado simplemente asfalto, es considerado un material bituminoso de color marrón oscuro a negro. Se origina de manera natural o como producto de la destilación del crudo del petróleo mediante técnicas de refinación.

Se usa en grandes cantidades para la producción de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA), especialmente usado para la construcción de pavimentos flexibles. El cemento asfáltico utilizado en el Ecuador es el tipo AC – 20 indicado por el MTOP, producido en la refinería de Esmeraldas.



Grafico 2-1 Tanque de almacenamiento asfalto AC-20 en la cantera Duran

Fuente: autor

2.3 Agregados minerales

Es el material mineral que forma parte del pavimento. Éste puede clasificarse en diferentes tipos de acuerdo a la fuente de su extracción.

Agregado natural, si es extraído de ríos y otras fuentes naturales; agregado triturado, si es triturado mecánicamente en canteras hasta obtener el tamaño requerido; y agregado sintético, el que es proveniente de subproductos industriales.



Grafico 2-2 Tolvas que contienen agregados en una planta de mezcla asfáltica (Cantera Duran)

Fuente: autor

2.4 Propiedades de las mezclas asfálticas

Existen varias propiedades de las mezclas asfálticas, en general se debe optimizar las siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la fatiga.

Cuando la mezcla se utiliza como capa de rodadura se debe tener en cuenta las siguientes propiedades:

- Resistencia al deslizamiento.
- Regularidad.
- Permeabilidad.
- Color, entre otras.

2.4.1 Estabilidad

Se denomina estabilidad a la capacidad que tiene un cemento asfáltico de resistir el desplazamiento y la deformación, producidos por las cargas vehiculares. Se dice que un pavimento es estable cuando es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas; un pavimento es inestable cuando se producen ahuellamientos, ondulaciones y otros defectos.

Esta propiedad depende principalmente, de la cohesión y la fricción interna. La cohesión está relacionada con el contenido de asfalto, mientras que la fricción interna tiene relación con las características del agregado y tipo de asfalto. Es así que, un grado óptimo de fricción y cohesión en la mezcla, no permitirá que las partículas del agregado se desplacen unas respecto de las otras por consecuencia de las cargas del tránsito. En términos generales, mientras más angularidad se presente en las partículas del agregado y más áspera sea su textura, más alta será la estabilidad.

2.4.2 Durabilidad

La durabilidad de las mezclas asfálticas es la capacidad de soportar los efectos perjudiciales del agua, aire, temperatura y tránsito. A consecuencia de estos efectos adversos se presenta el fenómeno llamado "envejecimiento" que puede llegar a ser muy complejo, debido a que sus causas son variadas y pueden ser irreversibles. No se debe presentar envejecimiento excesivo durante la vida en servicio cuando se ha realizado una buena mezcla asfáltica. De acuerdo a estudios mencionados en el instituto mexicano de asfalto se determinó que el espesor de la película de asfalto y los vacíos de aire influyen en la durabilidad.

2.4.3 Resistencia a la fatiga

Esta propiedad se refiere a la resistencia que ofrece la mezcla asfáltica ante las repeticiones de cargas producto del tránsito vehicular. La rigidez y contenido de asfalto influyen en gran medida al agrietamiento por fatiga. Cabe recalcar que el espesor del asfalto y la carga son factores que afectan a la mezcla asfáltica en cuanto a la resistencia a la fatiga.

2.5 Parámetros volumétricos

Los parámetros volumétricos son factores que deben ser tomados muy en cuenta al momento de realizar diseños de las mezclas asfálticas, puesto que son indicadores del comportamiento probable de las mismas.

Diagrama de fases

Se presentan tres fases; la sólida (agregado mineral); la líquida (asfalto); y la gaseosa (aire). En la siguiente figura se muestra un esquema representativo del diagrama de fases.

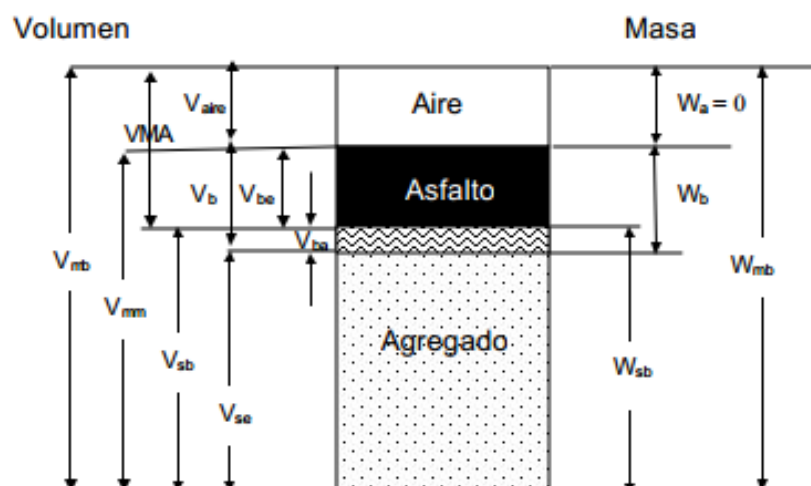


Grafico 2-3
Diagrama de fases de una mezcla asfáltica compactada
Fuente: Instituto Mexicano del Transporte

Donde:

VMA = volumen de vacíos en el agregado mineral

V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica

V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos de aire

V_{aire} = volumen de aire

V_{be} = volumen efectivo de asfalto

V_{ba} = volumen de asfalto absorbido

V_{sb} = volumen de agregado mineral neto o bulk

V_{se} = volumen de agregado mineral específico

W_{mb} = masa total de la mezcla

W_a = masa del aire

W_b = masa del asfalto

W_{sb} = masa total del agregado

A partir del diagrama se obtienen las siguientes relaciones de los parámetros volumétricos:

- **VMA (Vacíos en el agregado mineral):** volumen de vacío intergranular entre las partículas del agregado, que incluye el volumen de aire (V_{aire}) y el volumen del asfalto efectivo (V_{be}), se expresa como un porcentaje del volumen total de la muestra.

$$VMA = \frac{V_{be} + V_{aire}}{V_{mb}} \times 100$$

- **V_{aire} (Vacíos de aire):** volumen total de aire, se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada.

$$V_a = \frac{V_{aire}}{V_{mb}} \times 100$$

- **VFA (Vacíos llenados con asfalto – Voids Filled with Asphalt):** este parámetro no se encuentra ilustrado en el diagrama pero es importante definirlo. Es el porcentaje de los VMA que es ocupado por el asfalto efectivo.

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_{aire}} = \frac{V_{be}}{VMA} = \frac{VMA - V_a}{VMA} \times 100$$

- **P_b (Contenido de asfalto):** relación entre la masa de asfalto y la masa total de la mezcla; se expresa como porcentaje del peso total de la mezcla o como porcentaje del peso del agregado.

$$P_b = \frac{W_b}{W_{mb}} \times 100$$

- **P_{be} (Contenido de asfalto efectivo):** relación entre el peso de asfalto efectivo y la masa total de la mezcla; se expresa como porcentaje del peso total de la mezcla.

$$P_{be} = \frac{W_{be}}{W_{mb}} \times 100$$

- **P_{ba} (Contenido de asfalto absorbido):** relación entre la masa de asfalto absorbido y la masa total del agregado de la mezcla; generalmente se expresa como porcentaje del peso total del agregado.

$$P_{ba} = \frac{W_{ba}}{W_{sb}} \times 100$$

Debido a la porosidad del agregado mineral se produce absorción de agua y asfalto en grados variables. Es decir, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto cambia con cada agregado. Estas variaciones son tomadas en cuenta para la medición de la gravedad específica del agregado. La gravedad específica puede expresarse en tres formas: gravedad específica bulk, la gravedad específica aparente y la gravedad específica efectiva.

- **G_{sb} (Gravedad específica bulk):** relación entre el peso seco de un volumen unitario de agregado (incluyendo volumen de los poros permeables al agua) y el peso de igual volumen de agua, los dos a la misma temperatura.
- **G_{se} (Gravedad específica efectiva):** relación entre el peso seco de un volumen efectivo unitario de agregado (considerando solo el volumen de poros permeables al agua no llenos con asfalto) y el peso de igual volumen de agua, los dos a la misma temperatura.

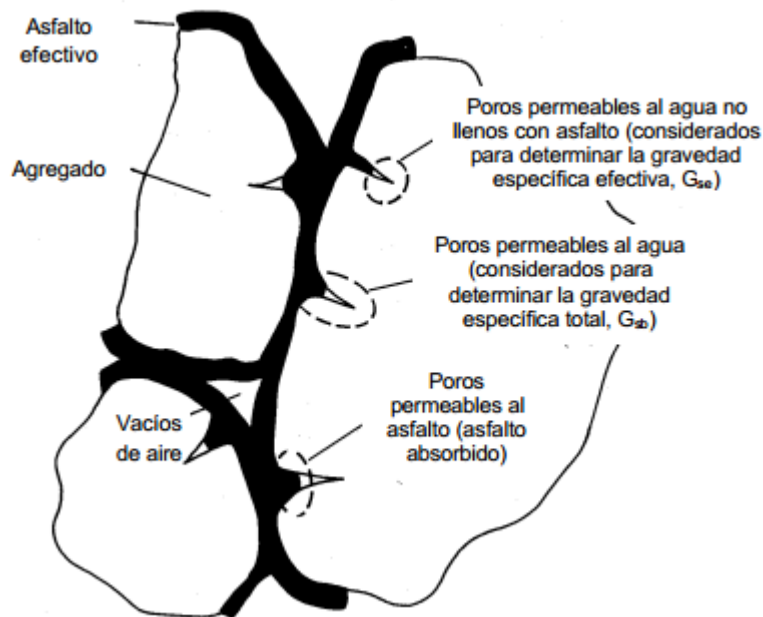


Grafico 2-4

Volumen de aire, volumen de asfalto efectivo y volumen de asfalto absorbido

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996

- **G_{sa} (Gravedad específica aparente del agregado):** relación entre el peso seco de un volumen unitario de agregado (se considera solo el volumen del sólido del agregado) y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.
- **G_b (Gravedad específica de asfalto):** relación entre el peso de volumen unitario de asfalto y el peso de igual volumen de agua, los dos a la misma temperatura.
- **G_{mm} (Gravedad específica teórica máxima de la mezcla):** relación entre el peso de un volumen dado de mezcla asfáltica sin vacíos de aire y peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura.

3 CAPÍTULO 3: FATIGA EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En los pavimentos flexibles se presentan múltiples fallas o mecanismos de degradación. Las principales fallas que se intentan controlar son la fatiga y el ahuellamiento (deformación permanente en la dirección vertical).

El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio (Hsu y Tseng, 1996; Martono et ál., 2007; Masad et ál., 2008; Tarefder et ál., 2008), ocurre cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica producto del paso continuo de vehículos (cargas repetidas). Esta repetición de cargas provoca una disminución de la rigidez en las mezclas, originándose la aparición de deformaciones plásticas a tracción lo que a su vez induce a la formación de fisuras en la rasante. Con la aparición de fisuras longitudinales a lo largo de la capa de rodadura y las continuas repeticiones de carga, estas fisuras siguen progresando hasta que las mismas empiezan a interconectarse, formando piezas angulares desarrollando un aspecto de escamas, comúnmente llamado “piel de cocodrilo”.

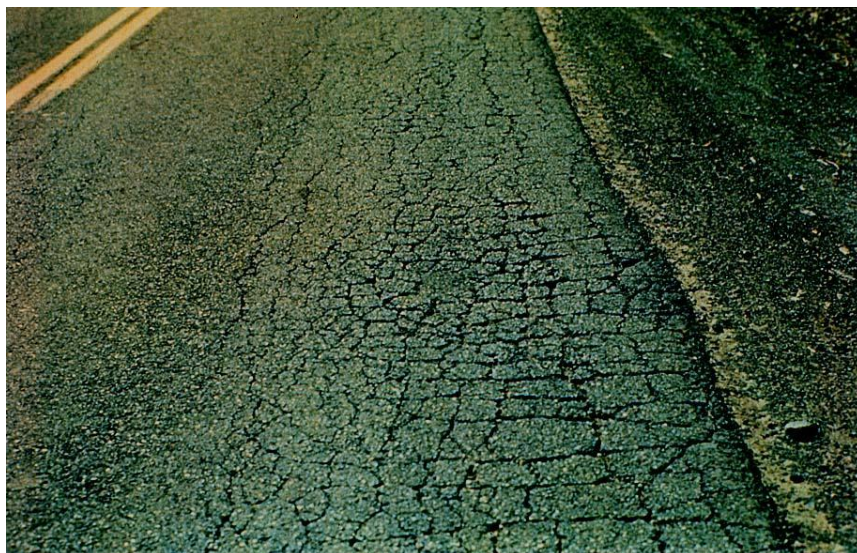


Grafico 3-1 Agrietamiento severo por fatiga (tomado de pavementinteractive.org)

La presencia de fisuras de piel de cocodrilo por lo general señala que se ha excedido el número de repeticiones de carga de diseño, siendo ese el caso solo se requiere un mantenimiento en el pavimento. Por otro lado, cuando la fatiga se produce mucho antes del periodo establecido, esto nos indica que las cargas vehiculares fueron más altas de lo esperado.

La fatiga se produce por múltiples causas, se ha establecido que un soporte estructural inadecuado es una de las principales razones de la presencia prematura de la fatiga. Ese inadecuado soporte estructural es causado por diferentes circunstancias como un mal drenaje, problemas de construcción, mala compactación y un diseño insuficiente.

3.1 Ensayos

Los métodos empleados para medir la fatiga de pavimentos asfálticos pueden agruparse de la siguiente manera:

- Ensayos de flexión simple
- Ensayos de flexión con apoyos
- Ensayos axiales directos
- Ensayos diametrales
- Ensayos triaxiales
- Ensayos de pistas

Se describe a continuación los ensayos diametrales puesto que el desarrollo de este proyecto está basado en ensayos en el NAT

3.1.1 Ensayos diametrales

El ensayo diametral de fatiga o ensayo de tracción indirecta representa un estado de esfuerzos biaxial. Este ensayo se puede realizar en el NAT (Nottingham Asphalt Tester).

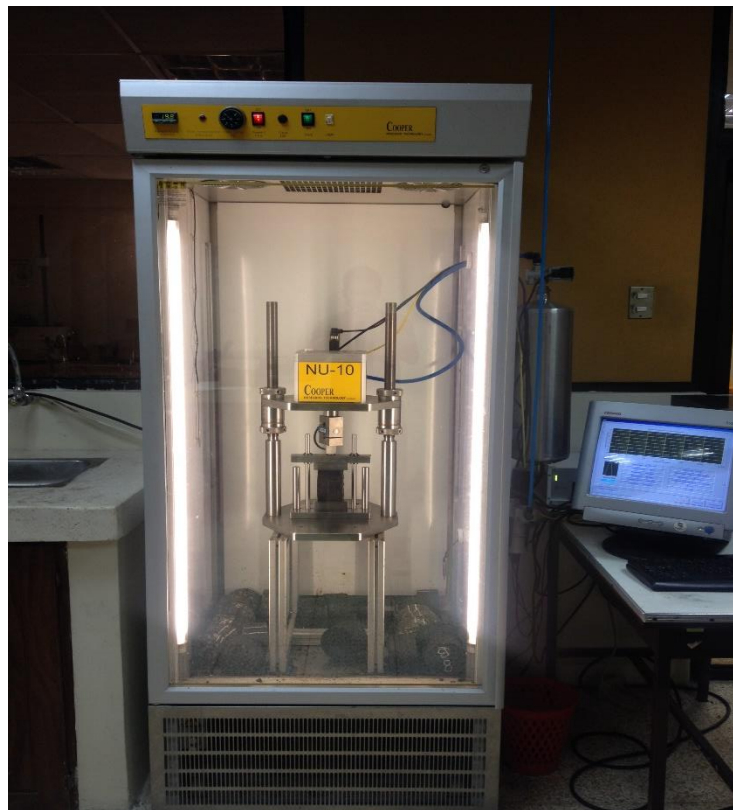


Grafico 3-2 Equipo NAT de la UCSG

Fuente: autor

La briqueta es cargada repetidamente con una carga compresiva en dirección vertical y de forma paralela a la sección transversal. Esta carga produce la aparición de esfuerzos de tracción que actúan de forma perpendicular a la carga aplicada (Hartman et ál., 2001).

Se han identificado tres formas principales de falla en la muestra que pueden ocurrir en un ensayo de tracción indirecta, (Sousa et ál. 1991):

- Inicio de la falla en centro o cercano del centro de la muestra, resultando una completa división de la briqueta.
- Inicio de la falla en la parte superior de la muestra, propagándose en forma descendente a manera de una V.
- No se produce una falla real, pero la muestra termina deformada plásticamente.

4 CAPITULO 4: FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A FATIGA

Según Rondón y Reyes (2011,2011a, 2012) la respuesta a la fatiga de mezclas asfálticas se ve afectada especialmente por:

- Los métodos de compactación de la muestra
- La carga
- Parámetros de diseño de la mezcla (rigidez, consistencia del asfalto, características de los agregados, contenido de asfalto)
- Envejecimiento

4.1 Métodos de compactación de la muestra

Existen varios métodos de compactación, de los cuales los principales son: compactación por impacto (martillo Marshall), compactación por amasado, compactación giratoria.

Compactación por impacto o compactación Marshall

En este método se usa muestras cilíndricas, normalizadas, llamadas briquetas de 2 1/2 " de espesor y 4" de diámetro (64 x 102mm). Estos valores son los recomendados, pero en la práctica se dan variaciones que se ajustan empleando coeficientes de corrección. La mezcla es puesta en un molde, se compacta con repetitivos impactos de carga usando un martillo de acero de 10 libras que cae desde una distancia establecida. Se realiza un número determinado de golpes, intentando reproducir la densidad de la mezcla asfáltica in situ.

Una de las desventajas principales de este método es la posible fractura de los agregados o la ruptura de la película de asfalto debido a la gran cantidad de energía que se transfiere en el impacto del martillo, dando como resultado diferencias en las propiedades estructurales entre las mezclas de laboratorio y las mezclas compactadas in situ.



Grafico 4-1 Martillo Marshall electrónico de la UCSG

Fuente: autor

Compactación por amasado

La compactación por amasado se logra mediante la aplicación de carga repetitiva de un pisón que es más pequeño que la muestra compactada. Se aplica una carga determinada con el pisón en un solo punto durante un tiempo establecido, en el que la carga va aumentando gradualmente y luego hay un proceso de descarga.

Luego se cambia el punto de ubicación de carga y se procede nuevamente con la compactación, es decir que el pisón se coloca solo una vez sobre la misma área. Este método permite que la orientación de las partículas y las deformaciones de la mezclas de laboratorio sean parecidas a las de las mezclas compactadas in situ.

Compactación giratoria

En este método la mezcla se coloca en un molde cilíndrico, la cual es sometida a movimientos giratorios, mientras que dos émbolos paralelos hacen presión sobre cada uno de los extremos de la muestra. En este método se logra aplicar compresión estática y una fuerza de corte simultáneamente. Según Von Quintus et ál. (1998), el método de compactación más preciso de acuerdo con su capacidad para representar las propiedades de los núcleos extraídos en campo es el método de compactación giratoria.



Grafico 4-2 Compactador giratorio de la UCSG

Fuente: autor

4.2 Carga

Para obtener el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas existen dos modos de carga: esfuerzo controlado y deformación controlada (Grafico 4.1). En el primer caso, el esfuerzo se mantiene constante y la deformación aumenta. Mientras que en el caso de deformación controlada, se mantiene una deformación constante y el esfuerzo disminuye.

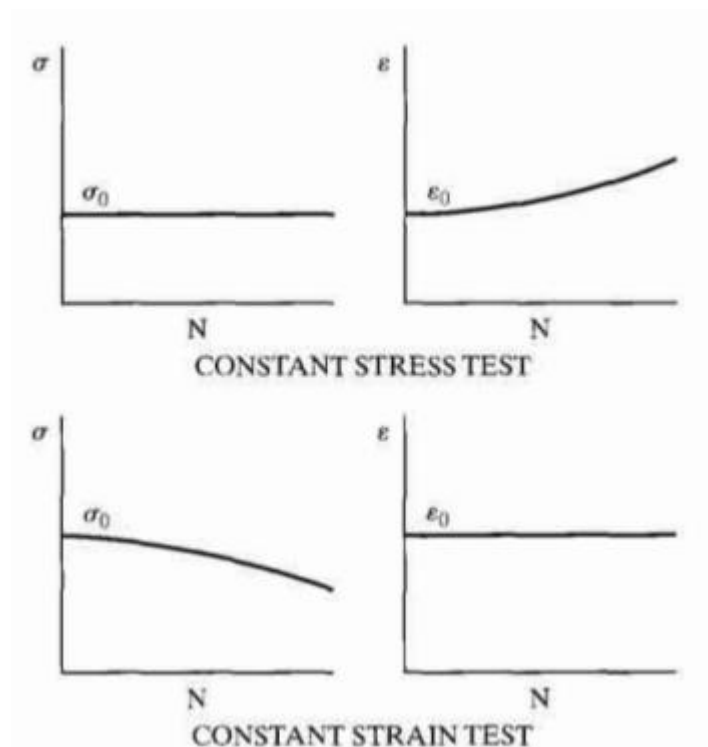


Grafico 4-3 Ensayo de fatiga a esfuerzo constante y a deformación constante. (Huang 2002)

Para que los ensayos de laboratorio simulen de forma correcta lo que pasa en campo, es necesario conocer bajo qué modo de carga está sometida una mezcla asfáltica en servicio. Huang al., 2002; sostiene que para pavimentos con espesores mayores a 6 pulgadas, se realiza ensayos a esfuerzo constante.

Es recomendable realizar ensayos a deformación constante cuando el pavimento en análisis tiene espesor menor a 2 pulgadas, debido a que la deformación en el pavimento es regida por las capas inferiores y no se ve afectada por la reducción de rigidez de la mezcla.

4.3 Rigidez de la mezcla

La rigidez de la mezcla asfáltica influye en el comportamiento a fatiga. Cuando una mezcla asfáltica presenta módulos muy bajos, se puede decir que tiene un comportamiento muy flexible, es decir susceptible al ahuellamiento, pero con buen comportamiento a la fatiga. Mientras que una mezcla asfáltica con modulo alto presenta se comporta bien al ahuellamiento pero tendrá un desempeño negativo en cuanto a la resistencia a la fatiga.

Varios ensayos de investigadores (Epps 1969, Epps y Monismith 1969 y Elseif et ál., 2003) demostraron que bajo esfuerzo controlado, si la rigidez de la mezcla aumenta, el número de repeticiones a la falla aumenta. Por otro lado, (Schmidt y Santucci 1969) demostraron que en ensayos bajo deformación controlada, si el modulo aumenta, el número de repeticiones disminuye.

4.4 Contenido de asfalto y vacíos de aire

El contenido de asfalto y el contenido de vacíos de aire son dos de los factores que más afectan el desempeño de una mezcla asfáltica. Se debe establecer cantidades óptimas de contenido de asfalto puesto que mientras más elevado sea este contenido mayor será la resistencia a la fatiga, pero al mismo tiempo mientras menor sea el contenido se produce mayor resistencia al ahuellamiento, exudación e inestabilidad estructural.

Por otro lado el contenido de vacíos de aire debe ser lo suficientemente pequeño para evitar la degradación de la mezcla. Investigadores determinaron que en ensayo a esfuerzo controlado, a mayor contenido de vacío, menor era la resistencia a la fatiga. Ocurre lo mismo en ensayos bajo deformación controlada puesto que demostraron que mientras menor era el contenido de vacíos de aire, mayor era la vida a fatiga.

4.5 Envejecimiento

El envejecimiento de las mezclas asfálticas es considerado una causa del deterioro del pavimento, se presenta como desprendimiento del agregado pétreo y pérdida de la capa de rodadura. Este fenómeno es atribuible a diferentes causas en las que intervienen diferentes variables. Estas variables pueden ser intrínsecas (características propias de la mezcla asfáltica) o extrínsecas (temperatura, humedad, radiación ultra violeta). Los mecanismos involucrados en el fenómeno del envejecimiento están relacionados a procesos físicos, químico y mecánico.

Generalmente la volatilización, oxidación y polimerización producen un reacomodo en las moléculas del asfalto, a consecuencia de esto se produce un endurecimiento de las mezclas convirtiéndolas en un material frágil, consecuentemente con tendencia a agrietarse.

Para el año 1961, Traxler concluyó que las causas del envejecimiento del asfalto eran: oxidación, volatilización, tiempo, polimerización inducida por luz solar y polimerización por condensación.

Años más tarde expandió la lista a 15 causas de las cuales Petersen en el año 1984 las redujo a tres causas principales del envejecimiento del asfalto:

- Pérdida de componentes resinosos por volatilización o adsorción.
- Cambios en la composición química por reacción con el oxígeno atmosférico.
- Estructuración molecular que produce efectos tixotrópicos (endurecimiento estérico).

El envejecimiento es un fenómeno que se da en dos fases: envejecimiento a corto plazo y envejecimiento a largo plazo. El envejecimiento que ocurre durante la producción en la planta y la construcción de la carpeta asfáltica se denomina a corto plazo y se debe principalmente a la oxidación y a la pérdida de componentes volátiles. El envejecimiento a largo plazo es producido por la oxidación progresiva de la mezcla asfáltica en servicio. En este caso la temperatura del pavimento se reduce considerablemente.

4.5.1 Variables que intervienen en el proceso de envejecimiento

4.5.1.1 Variables intrínsecas

Como se había mencionado anteriormente el fenómeno del envejecimiento se produce por varias variables, intrínsecas y extrínsecas. Las variables intrínsecas son debidas a características propias de la mezcla asfáltica como el asfalto, agregados, y el contenido de vacíos.

Asfalto

La composición química del asfalto es muy compleja. El carbono es el elemento químico que se presenta en mayor proporción (80-88%), en menor proporción se encuentra el oxígeno (0-2%), azufre (0-9%), nitrógeno (0-2%), y trazas de metales como níquel, vanadio y manganeso entre otros (Speight, 2007). Cabe recalcar que esta composición es particular de cada asfalto y que esta composición es diferente en asfaltos provenientes de diferentes sitios. Debido a la complejidad química del asfalto, se usa un modelo en el cual las partículas sólidas (asfaltenos) están disgregadas en una matriz líquida (maltenos).

En 1908, Corbett propuso el fraccionamiento a través de diferentes etapas. En la primera etapa se realiza la separación del bitumen en asfaltenos y maltenos por precipitación. Luego se procede a fraccionar los maltenos mediante una columna de cromatografía líquida con solventes de polaridad creciente. De esta manera se separa el asfalto en: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Estas fracciones se las denomina SARA.

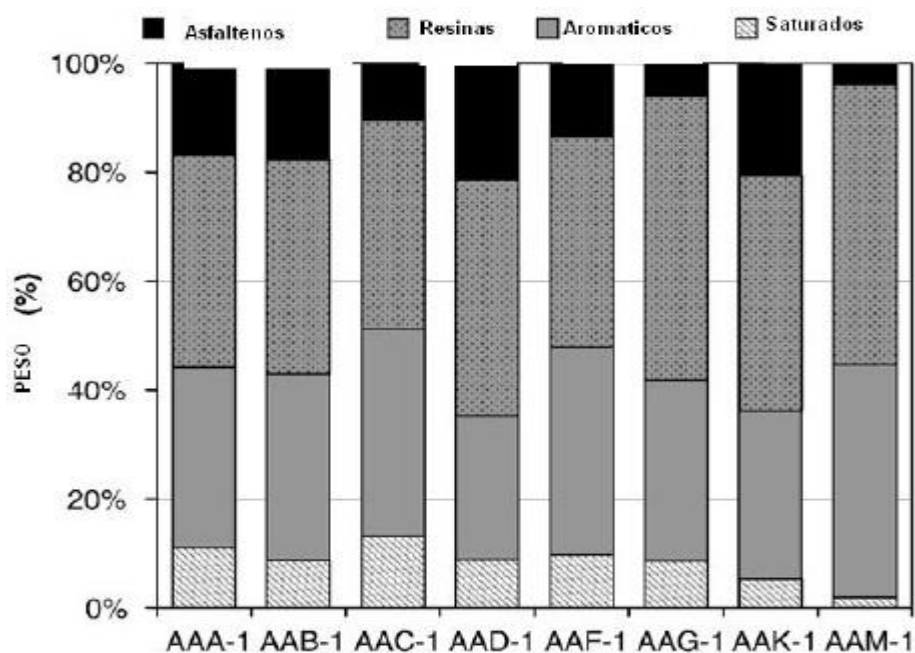


Gráfico 4-4 Separación en fracciones SARA para algunos asfaltos (Mortazavi & Moulthrop, 1993)

Corbett (1970) sostiene que cada fracción influye en las propiedades físicas del asfalto, los asfaltenos como espesantes, los saturados y aromáticos tienen relación con la fluidez y las resinas ofrecen ductilidad a los asfaltos. La combinación de asfaltenos, saturados y aromáticos producen condiciones de flujo en el asfalto.

Mediante este procedimiento se evidencian las alteraciones químicas que se producen, esto se observa en los cambios que ocurren en estas fracciones. El fenómeno del envejecimiento produce un aumento en el contenido de resinas y una reducción en los aromáticos, provocando a su vez un incremento de los asfaltenos (Petersen, 2009; Siddiqui & Ali, 1999a, 1999b; Farcas, 1996).

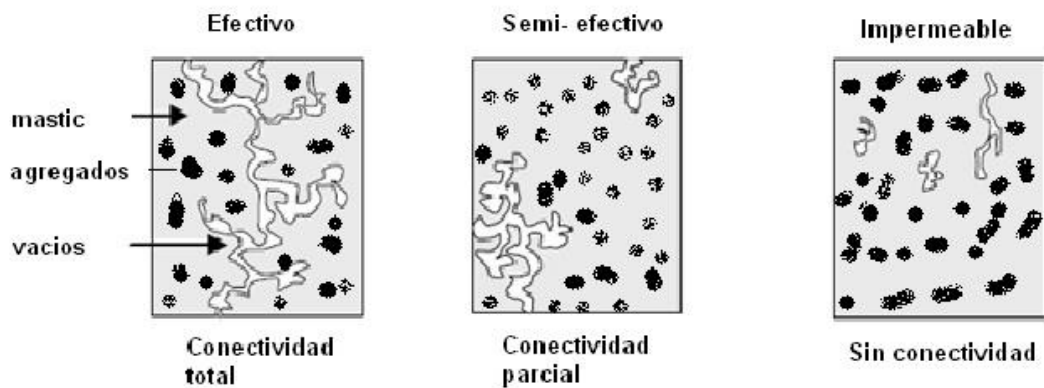
La película de asfalto

En los agregados se encuentra recubriendo una película de asfalto en el orden de los 15 a 20 micrones (Petersen, 1989), es recomendable un espesor mínimo de 6 a 8 micrones. Evidentemente uno de los factores influyentes en la durabilidad de las mezclas asfálticas es un adecuado espesor de la película de asfalto. La película de asfalto es la que se ve afectada por el envejecimiento y por consiguiente por el endurecimiento.

Contenido de vacíos de aire

Varios factores tienen influencia en la distribución y tamaño de vacíos con aire en las mezclas asfálticas, estos son principalmente el diseño de la mezcla, las propiedades de los agregados y la compactación.

En un estudio se clasifico el contenido de aire en tres categorías: contenido de vacíos efectivo, semi efectivo y contenido de vacíos impermeable. El término “efectivo” se interpreta como la conectividad de los vacíos dentro de la mezcla, lo que genera la circulación del aire y agua dentro de la misma.



**Grafico 4-5 Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas
(adaptado de Chen et al. 2004)**

La importancia de los vacíos en la mezcla radica en generar espacios de estabilización en la mezcla. Debe existir un equilibrio en el contenido de los vacíos pues el exceso provoca incremento en la permeabilidad del pavimento, el mismo que será más susceptible al paso del agua y vapor, resultando mayor oxidación y por consiguiente problemas de envejecimiento.

Por otro lado una mezcla con contenidos bajos de vacíos produce problemas de exudación y deformaciones plásticas.

4.5.1.2 Variables extrínsecas

Temperatura

Este agente externo es uno de los primeros factores que afectan a la mezcla asfáltica. En el momento de la elaboración de la mezcla asfáltica, el asfalto es elevado a temperaturas que varían entre 150 a 170° C, temperaturas en las que se produce volatilización del asfalto, adicionalmente ocurren reacciones de oxidación lo que provoca incremento de la rigidez.

Dessouky et al., (2011) descubrieron que el asfalto operado a temperaturas cercanas a 143°C presenta menos envejecimiento en comparación con el que ha sido manejado a temperaturas cercanas a 185°C. Por lo tanto, es importante controlar los procesos de transporte, producción y colocación de la mezcla asfáltica ya que al exceder valores de 150°C se reduce la vida en servicio de la mezcla asfáltica debido a un envejecimiento prematuro.

Humedad

La humedad que se presenta en las mezclas asfálticas, ya sea por presencia de agua en forma líquida o como vapor, afecta en gran medida el desempeño de las mismas ya que provoca degradación de las propiedades mecánicas (Caro et al., 2008).

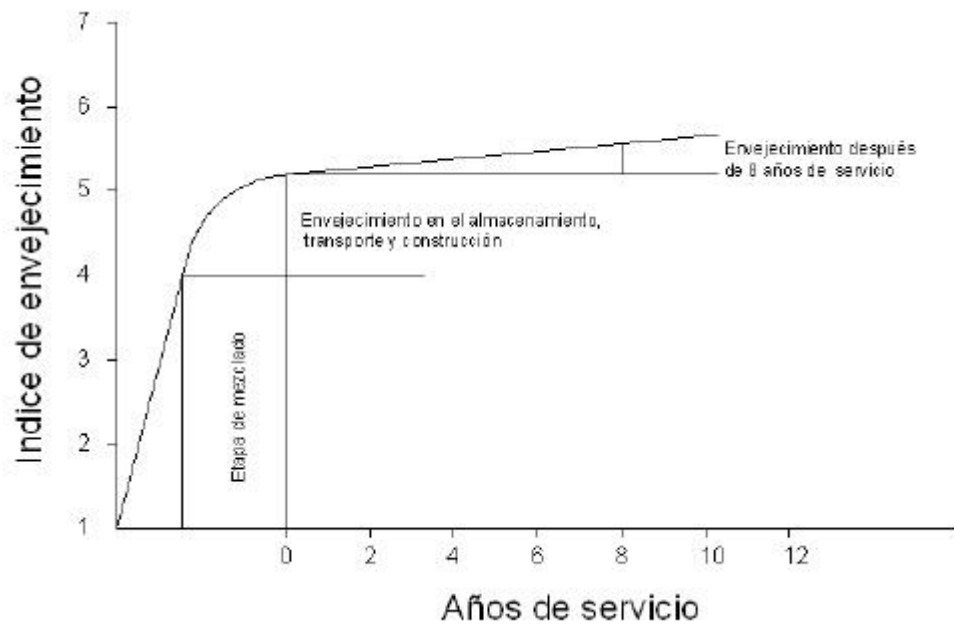
Una deficiente superficie de rodadura acompañada de problemas de drenaje, provoca el ingreso de agua o vapor dentro de la mezcla resultando la degradación de la mezcla antes mencionada. Un problema asociado a la humedad es el “stripping”, está regido por el transporte de agua en medios porosos y la interacción con los materiales de la mezcla asfáltica (Taylor & Khosla, 1983). Como consecuencia del “stripping” se produce una reducción en la cohesión de la carpeta asfáltica y la pérdida de adhesión entre la carpeta de asfalto y la superficie de agregado.

Radiación UV

La radiación ultra violeta que forma parte de la luz solar, es producida por ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Estas repercuten en la aceleración del proceso de envejecimiento de las mezclas asfálticas, alteran la susceptibilidad al agua y pueden cambiar la estructura molecular del asfalto. Esto puede ocurrir debido a la acción simultánea de tres mecanismos de envejecimiento como la oxidación, volatilización y polimerización. La oxidación se produce cuando la radiación llega al material, resultando en algunos casos la degradación molecular por consiguiente la separación de cadenas de carbono que pueden combinarse con el aire. La volatilización ocurre cuando la degradación molecular lleva a la pérdida de materiales livianos. Adicionalmente se presenta la formación de radicales libres, lo que puede estimular la combinación y formación de nuevas moléculas (polimerización). El resultado de estos mecanismos corresponde al endurecimiento de la superficie de rodadura, y la fragilidad y aparición de grietas en la misma.

Tiempo de exposición

El fenómeno del envejecimiento sucede en dos etapas: a corto plazo y a largo plazo. Durante la producción y transporte de la mezcla asfáltica se provoca el denominado envejecimiento a corto plazo, mientras que el envejecimiento a largo plazo es el que ocurre durante la vida en servicio del pavimento, los efectos de este envejecimiento a largo plazo son el incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica.



**Gráfico 4-6 Etapas en el proceso de envejecimiento
(Read & Whiteoak, 2003)**

Pocos avances se han realizado en cuanto a las investigaciones con respecto a la predicción del tiempo de envejecimiento, a los tipos de pruebas de laboratorio que sean equivalentes a los procesos de envejecimiento a corto y largo plazo. El proyecto SHRP concluyó que el envejecimiento en el RTFOT de 85 minutos a 163°C representa el envejecimiento a corto plazo y que el material restante del proceso anterior ensayado en el PAV durante 20 horas a 100°C y 2,07 MPa de presión, equivale a 8 años de servicio de la superficie de la capa de rodadura (Bahia & Anderson, 1995; Bahia et al., 1999; Bahia et al, 1998).

En otras investigaciones realizadas por el SHRP-A-390 determinaron:

- 2 días de envejecimiento en un horno convencional a 85°C adicionalmente al envejecimiento STOA (envejecimiento a 135°C por 4 horas) representa de 0 a 3 años en campo.
- 4 a 8 días de envejecimiento al horno a 85°C representa más de 3 años (aproximadamente de 6 a 9 años) en campo.

- En climas húmedos – sin congelación, envejecimiento al horno de 8 días a 85°C representa más de 18 años en campo.
- En climas secos– con congelación, envejecimiento al horno de 8 días a 85°C representa más de 9 años en campo.

Estas conclusiones fueron obtenidas para algunos cementos asfálticos de Estados Unidos, por lo que para otras localizaciones con otros materiales esas equivalencias no son tan correctas.

5 CAPITULO 5: MODULO RESILIENTE

5.1 Concepto

El pavimento es sometido a un gran número de aplicaciones de carga causados por el tráfico. Estas cargas producen deformaciones elásticas (resilientes) de recuperación instantánea y deformaciones permanentes denominadas plásticas. Cuando la carga es pequeña en relación a la resistencia del material y se aplica un número elevado de repeticiones, la deformación bajo cada aplicación de carga es casi en su totalidad recuperable, en ese momento presenta el comportamiento resiliente.

Consecuentemente el concepto de módulo resiliente está definido como la relación entre el esfuerzo desviador cíclico ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) y la deformación axial recuperable (ε_{1r}):

$$Mr = \frac{q}{\varepsilon_{1r}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{1r}}$$

Donde:

σ_1 = esfuerzo principal mayor

σ_3 = esfuerzo principal menor

q = esfuerzo desviador

ε_{1r} = deformación recuperable

El módulo resiliente es la respuesta al ensayo dinámico. Se ha observado que en pruebas de carga repetida luego un determinado número de ciclos de carga, el módulo de rigidez es casi constante por tanto la respuesta del material granular puede tomarse como elástica. A ese modulo que permanece constante se le denomina módulo resiliente.

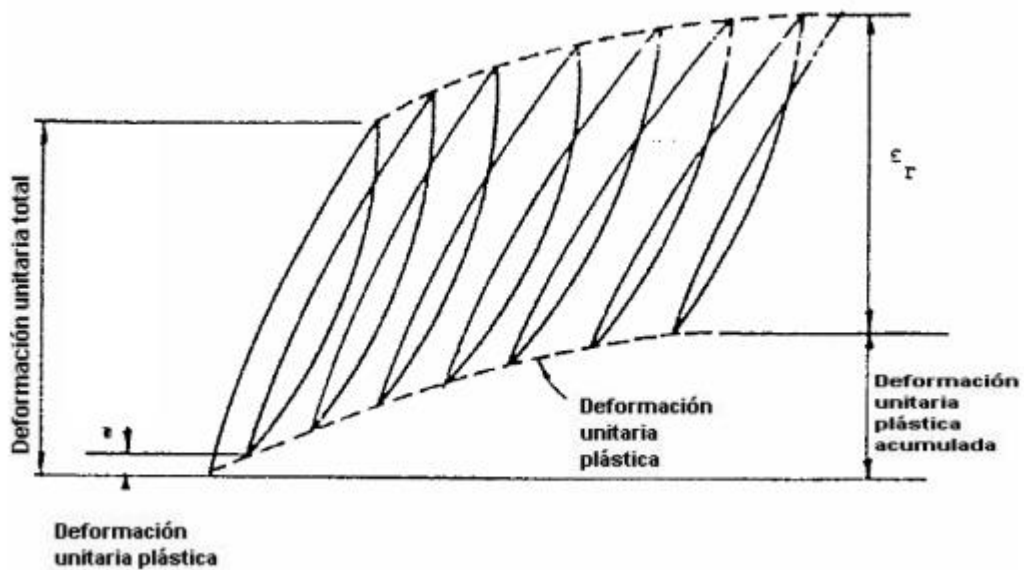


Gráfico 5-1 Deformaciones unitarias bajo cargas repetidas.

(Fuente: Huang, 1993)

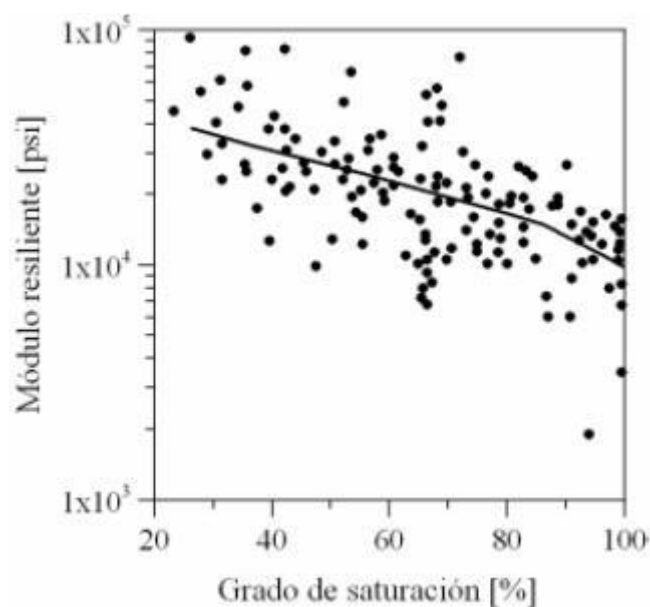
5.2 Factores que influyen en el comportamiento resiliente

Influencia del esfuerzo

Según la SHRP-A-388 en referencia a la determinación del módulo resiliente, realizaron diversos análisis con respecto al nivel de esfuerzos. Utilizaron el método de prueba axial y diametral, a niveles de esfuerzos altos y bajos y tres temperaturas (0°C, 20°C y 40°C). Concluyendo que se presenta escasa influencia del esfuerzo sobre el módulo, presentándose simplemente pequeñas variaciones entre los dos niveles de esfuerzo con relación a la variación de la temperatura.

Influencia del contenido de agua

Ha sido ampliamente demostrado que existe influencia del contenido de agua en el módulo resiliente. El módulo resiliente presenta menores valores cuando la cantidad de agua en el material granular es elevada (Rada & Witczak). Thom y Brown (1987) sostienen que la presencia de agua en el material granular provoca efectos lubricantes entre las partículas, presentándose deformaciones elevadas y una reducción en los valores de la rigidez. Lekarp et al. (2000) concluyen que con altos contenidos de agua existe una pérdida en la succión del material granular, con lo que se genera que se disminuyan las fuerzas de rozamiento de las partículas y consecuentemente de la rigidez. De acuerdo a los estudios de Dawson (1996) concluyen que existe un valor recomendable de contenido de agua en el que la rigidez es máxima. Por otro lado si el contenido de agua aumenta con respecto al óptimo, se pierde la succión entre partículas y, por lo tanto un incremento en la presión de poros seguida de disminución de la rigidez.



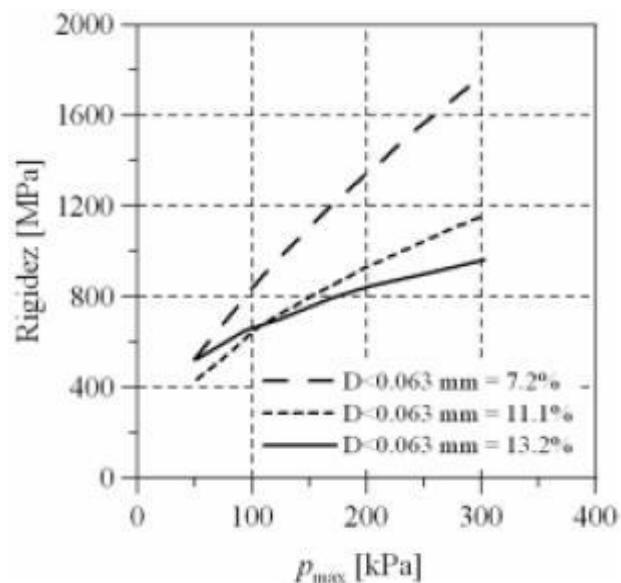
**Gráfico 5-2 Influencia de la saturación sobre el Mr
(Rada & Witczak, 1981)**

Influencia de la densidad

Según diversas investigaciones se evidencia un aumento en la rigidez cuando el material es más denso. Existe un incremento en el módulo cuando se incrementa la densidad, aunque este incremento es pequeño comparado con el aumento efectuado por la influencia del contenido de agua. Barksdale & Itani (1989) y Allen & Thompson (1974) sostienen que el efecto de la densidad sobre la variación de los módulos es más evidente para valores de carga bajos. A niveles de esfuerzo altos, el efecto de incrementar la densidad ya no es tan importante.

Influencia de la forma de la partícula y granulometría

Ha sido ampliamente reportado que cuando las partículas son más angulares se presenta un incremento en el módulo resiliente. Mientras más finos se presentan en un material granular la rigidez es menor sostienen Barksdale & Itani (1989), Tutumluer et al. (2003). Magnusdottir & Erlingsson (2002) observaron que materiales granulares bien gradados con un porcentaje menor al 9% de finos generalmente ofrecen una elevada resistencia mecánica.



**Grafico 5-3 Efecto del contenido de finos sobre el módulo
Magnusdottir & Erlingsson, 2002.**

Existen muchos estudios respecto a la influencia de la densidad y granulometría, algunos coinciden y otros presentan conclusiones contradictorias. Pero generalmente coinciden que materiales con tamaño de partículas mayores y granulometrías densas presentan mayor modulo. En general, se exhiben mayores módulos de rigidez mientras la presión de confinamiento, la magnitud de esfuerzos y la densidad se incrementan.

Estas investigaciones presentadas han sido en base a materiales granulares para base y sub base. Para mezclas asfálticas estos factores influyen de una manera similar pero no existe una influencia del contenido de agua. Los factores que más afectan al módulo de rigidez en una mezcla asfáltica son la temperatura y la frecuencia de carga.

6 CAPITULO 6: DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO

6.1 Introducción

Las principales características que se desean alcanzar en las mezclas asfálticas son que sean estables y durables. Cuando las mezclas asfálticas tienen suficiente cantidad de asfalto y son maleables, el módulo dinámico está en sus valores bajos y la resistencia al ahuellamiento es intermedia. Cuando hay buenas estructuras de minerales, las mezclas son aceptables aunque no son óptimas, pero cuando los ligantes asfálticos se van envejeciendo el modulo crece y la resistencia a la deformación aumenta.

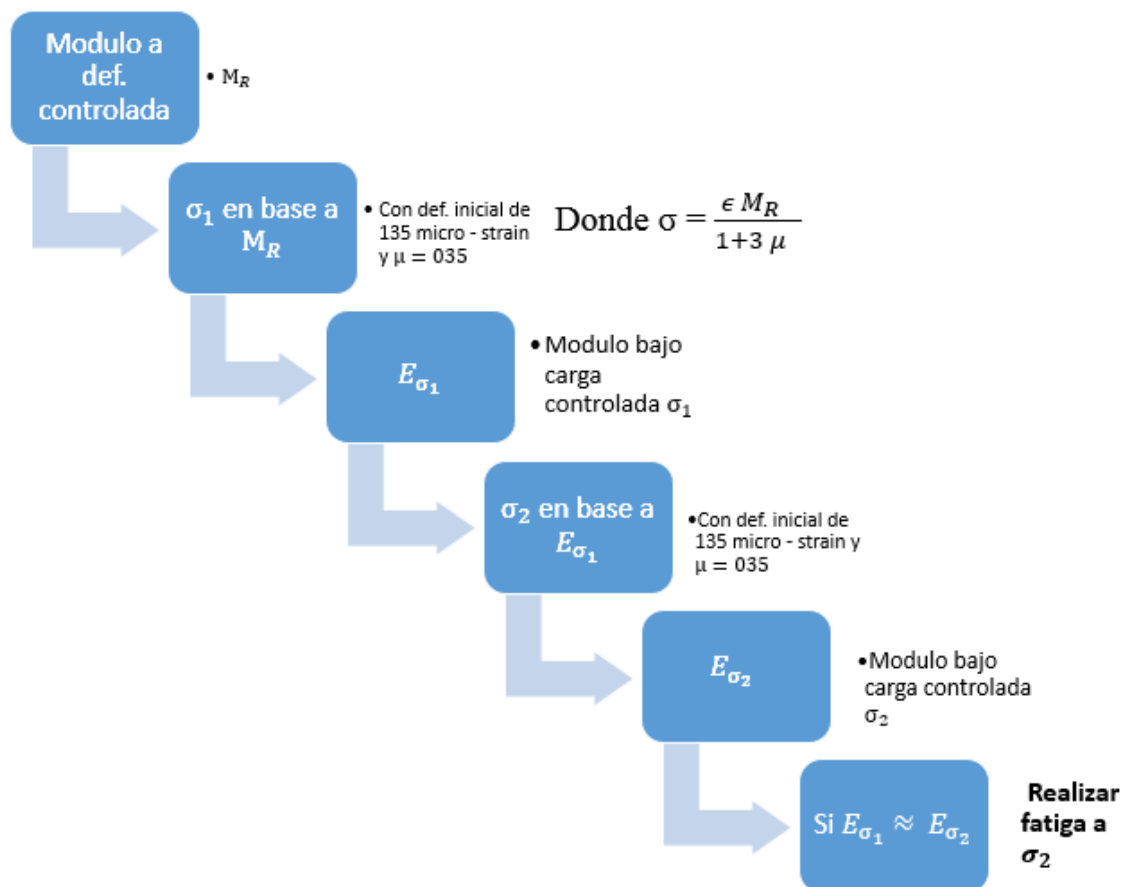
Sin embargo al aumentar la rigidez por aumento de las cargas en las capas inferiores del pavimento, la carpeta asfáltica se rompe muy temprano además de que se presentan problemas de adherencia con la piedra y cohesión del asfalto y se empiezan a desmembrar en la parte superior. Esto es lo que se quiere evitar, se quiere ver si es que un ensayo como el del módulo nos permite identificar los sitios de problema. Se ha visto en trabajos anteriores, tesis anteriores que cuando los módulos son demasiado bajos las mezclas son malas y generalmente las mezclas son malas por una inadecuada compactación.

Lo que se busca es obtener módulos superiores a 3000 MPa o 4500 MPa sin embargo también hemos visto que el calentamiento exagerado del asfalto rigidiza la mezcla tanto que los módulos se incrementan y con el paso del tiempo siguen incrementándose y se van volviendo quebradizas las mezclas. Se ha presentado como posible elemento de control para las mezclas quebradizas una deformación unitaria inicial de 135 micro - strain y observar que obtenga más de 10000 repeticiones a la fatiga (argumento presentado en la tesis de William Macero “Evaluación de resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas y determinación de puntos óptimos para su control”).

6.2 Desarrollo

Se procederá a tomar mezclas de uso común, compactarlas a dos niveles y envejecerlas artificialmente en un horno a 85°C, tomando el protocolo de envejecimiento de la SHRP la cual puede tener una equivalencia con el envejecimiento real en campo aunque esa equivalencia es diferente para los distintos climas.

Está claro que parece haber una relación entre el valor absoluto del módulo y las repeticiones a la fatiga. Por tal razón planteamos este proceso de ensayos que consiste en realizar ensayos de módulos y fatiga como lo demuestra el siguiente esquema.



Este proceso se realiza con el objetivo de realizar el ensayo de fatiga con una carga que represente una deformación unitaria inicial de 135 micro – strain.

6.3 Caracterización de los materiales

El agregado que se ha utilizado para la elaboración de la mezcla asfáltica en estudio es resultante de la trituración, obtenida a partir de la explotación a cielo abierto en la cantera de Duran, a cargo de Concretos y Prefabricados C. Ltda. Este material es utilizado para pavimentar en algunas zonas de la provincia del Guayas y del país. El asfalto utilizado es el AC-20 de la refinería Esmeraldas.



Grafico 6-1 Cantera de Duran.

Fuente: autor

6.4 Elaboración de las briquetas a ensayar

Con el objetivo de obtener resultados óptimos se elaboró 3 lotes de briquetas, todas elaboradas con el mismo material extraído de la cantera de Duran. Los dos primeros lotes con la misma granulometría y el tercer lote con una granulometría modificada buscando mejorar su desempeño en cuanto a la resistencia a la fatiga.

El primer lote consiste de 18 briquetas a 40 golpes de compactación las que se denominan con la letra A, el segundo lote 18 briquetas a 75 golpes de compactación denominadas con la letra B y el tercero fue de 18 briquetas a 75 golpes de compactación con granulometría modificada denominadas con la letra C. La compactación de las briquetas se realizó con un martillo manual.



Grafico 6-2 Mezcla asfáltica utilizada para la elaboración de las briquetas (2 primeros lotes)



**Grafico 6-3 Martillo Marshall utilizado para la compactación de las
briquetas**

A continuación se presenta las propiedades de cada lote de briquetas:

		Numero de golpes por lado	40		Gravedad Específica BULK de agregados		2,296						
		Gravedad Específica del C.A.	1,016		Ps		93						
MUESTRA	MATERIAL	DOSIFIC %	PESO MUESTRA			VOLUMEN c.c	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			V.A.M. %	V.F.A.%
			AIRE SECO	AGUA	AIRE S.S.S		BULK (Gmb)	RICE (Gmm)	AGREG.	VACIOS	Vbe		
1A			1134	577	1138	561	2,021						
2A			1114	566	1118	552	2,018						
3A			1098	559	1102	543	2,022						
4A			1108	565	1112	547	2,026						
5A			1115	566	1118	552	2,020						
6A			1130	575	1134	559	2,021						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,021	2,174	81,88	7,01	11,11	18,12	61,29
7A			1120	567	1124	557	2,011						
8A			1108	559	1111	552	2,007						
9A			1077	547	1081	534	2,017						
10A			1090	552	1094	542	2,011						
11A			1118	565	1121	556	2,011						
12A			1093	554	1097	543	2,013						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,012	2,155	81,48	6,65	11,87	18,52	64,07
13A			1123	569	1126	557	2,016						
14A			1070	543	1074	531	2,015						
15A			1160	587	1164	577	2,010						
16A			1114	567	1118	551	2,022						
17A			1116	567	1120	553	2,018						
18A			1114	567	1119	552	2,018						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,017	2,165	81,68	6,85	11,46	18,32	62,58

Tabla 6-1 Propiedades briquetas muestra A

Numero de golpes por lado	75	Gravedad Especifica BULK de agregados	2,296
Gravedad Especifica del C.A.	1,016		

MUESTRA	MATERIAL	DOSIFIC %	PESO MUESTRA			VOLUMEN c.c	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			V.A.M. %	V.F.A.%
			AIRE SECO	AGUA	AIRE S.S.S		BULK (Gmb)	RICE (Gmm)	AGREG.	VACIOS	C.A.		
1B			1125	589	1128	539	2,087						
2B			1121	586	1125	539	2,080						
3B			1119	583	1122	539	2,076						
4B			1118	586	1121	535	2,090						
5B			1076	561	1080	519	2,073						
6B			1062	552	1065	513	2,070						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,079	2,164	84,22	3,91	11,86	15,78	75,21
7B			1126	593	1130	537	2,097						
8B			1129	593	1133	540	2,091						
9B			1107	582	1110	528	2,097						
10B			1099	577	1102	525	2,093						
11B			1082	566	1085	519	2,085						
12B			1090	568	1094	526	2,072						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,089	2,174	84,62	3,91	11,48	15,38	74,61
13B			1103	577	1109	532	2,073						
14B			1135	590	1138	548	2,071						
15B			1097	571	1099	528	2,078						
16B			1100	571	1104	533	2,064						
17B			1094	563	1096	533	2,053						
18B			1120	578	1123	545	2,055						
	% C.A.	7											
	Promedio						2,066	2,16	83,67	4,37	11,96	16,33	73,24

Tabla 6-2 Propiedades briquetas muestra B

Numero de golpes por lado	75	Gravedad Especifica BULK de agregados	2,293
Gravedad Especifica del C.A.	1,016		

MUESTRA	MATERIAL	DOSIFIC %	PESO MUESTRA			VOLUMEN c.c	DENSIDAD		% EN VOLUMEN			V.A.M. %	V.F.A.%
			AIRE SECO	AGUA	AIRE S.S.S		BULK (Gmb)	RICE (Gmm)	AGREG.	VACIOS	C.A.		
1B			1175	617	1178	561	2,094						
2B			1176	620	1179	559	2,104						
3B			1182	617	1186	569	2,077						
4B			1171	616	1175	559	2,095						
5B			1062	553	1066	513	2,070						
6B			1059	547	1062	515	2,056						
	% C.A.	8											
	Promedio						2,083	2,179	84,36	4,41	11,22	15,64	71,77
7B			1070	555	1074	519	2,062						
8B			1066	559	1070	511	2,086						
9B			1064	553	1067	514	2,070						
10B			1060	558	1064	506	2,095						
11B			1085	576	1089	513	2,115						
12B			1086	577	1088	511	2,125						
	% C.A.	8											
	Promedio						2,092	2,179	84,74	3,99	11,27	15,26	73,88
13B			1066	559	1070	511	2,086						
14B			1064	553	1067	514	2,070						
15B			1060	558	1064	506	2,095						
16B			1085	576	1089	513	2,115						
17B			1086	577	1088	511	2,125						
18B			1070	555	1074	519	2,062						
	% C.A.	8											
	Promedio						2,092	2,176	84,74	3,85	11,40	15,26	74,74

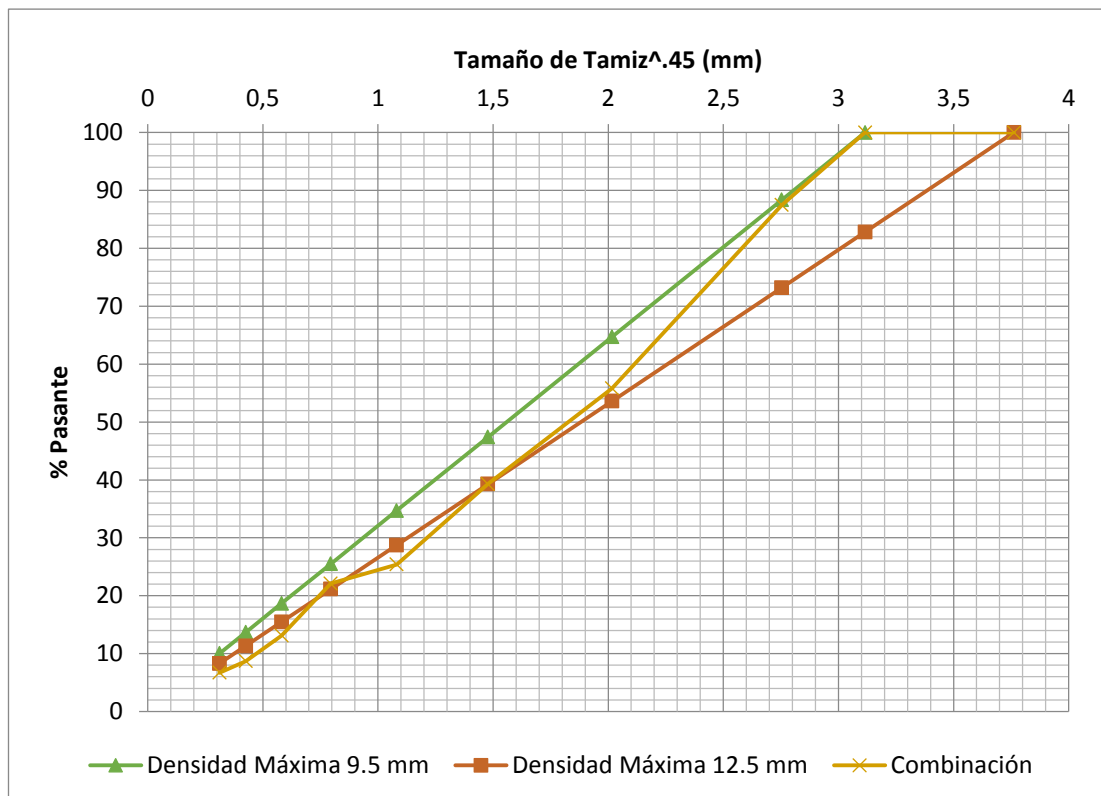
Tabla 6-3 Propiedades briquetas muestra C

6.4.1 Granulometría primeros dos lotes de briquetas

En la siguiente tabla podemos observar la granulometría de las muestras de los primeros dos lotes de briquetas.

Tabla 6-4 Granulometría lotes A y B

Tamices	%Pasante	Especificaciones
1/2"	100	90-100
3/8"	87,5	
No. 4	55,8	44-74
No. 8	39,3	28-58
No. 16	25,4	
No. 30	22,1	
No. 50	13,1	5-21
No. 100	8,7	
No. 200	6,7	2-10

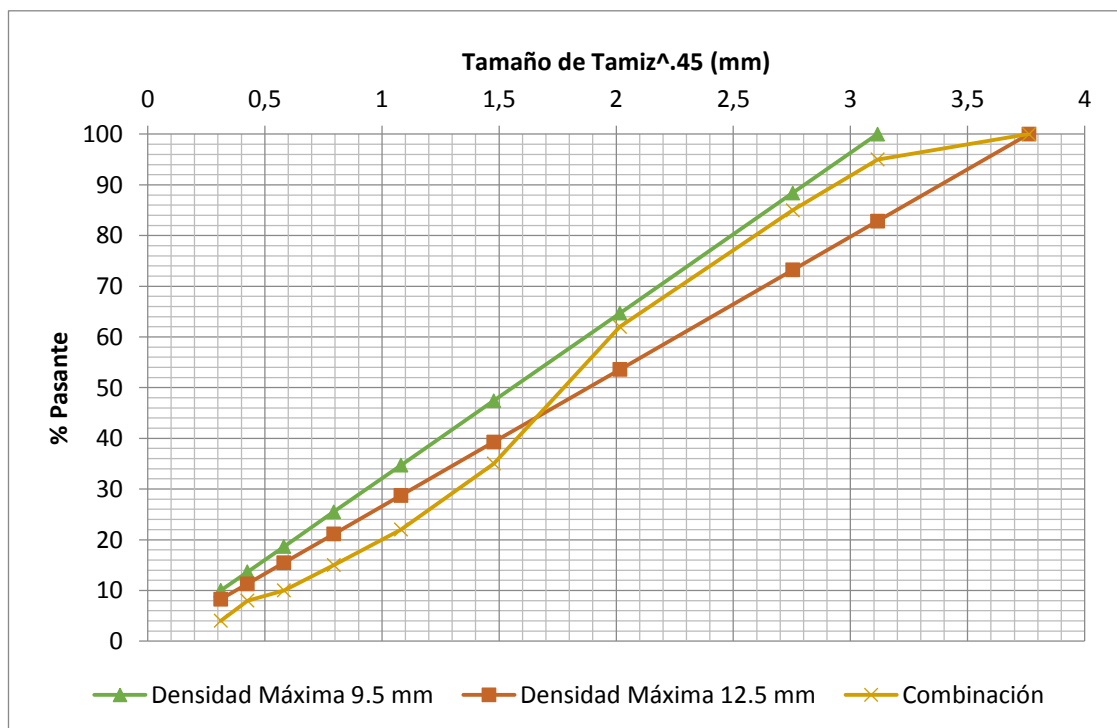


6.4.2 Granulometría modificada para el tercer lote de briquetas

Como ya se había mencionado, para el tercer lote de briquetas se realizó una modificación en la granulometría y se elevó el porcentaje de asfalto esperando resulte con mejor desempeño en cuanto a la resistencia a la fatiga. Para el efecto necesitamos una curva que se separe de la línea de densidad máxima, o que intersecte esta varias veces.

Tabla 6-5 Granulometría modificada lote C

Tamices	%Pasante	Especificaciones
3/4"	100	100
1/2"	95	90-100
3/8"	85,0	
No. 4	62,0	44-74
No. 8	35,0	28-58
No. 16	22,0	
No. 30	15,0	
No. 50	10,0	5-21
No. 100	8,0	
No. 200	4,0	2-10



6.5 Envejecimiento en el horno

Investigaciones realizadas por el SHRP-A-390 determinaron:

- 2 días de envejecimiento en un horno convencional a 85°C adicionalmente al envejecimiento STOA (envejecimiento a 135°C por 4 horas) representa de 0 a 3 años en campo.
- 4 a 8 días de envejecimiento al horno a 85°C representa más de 3 años (aproximadamente de 6 a 9 años) en campo.
- En climas húmedos – sin congelación, envejecimiento al horno de 8 días a 85°C representa más de 18 años en campo.
- En climas secos– con congelación, envejecimiento al horno de 8 días a 85°C representa más de 9 años en campo.

Estas conclusiones fueron obtenidas para algunos cementos asfálticos de Estados Unidos, por lo que para otras localizaciones con otros materiales esas equivalencias no son tan correctas. De acuerdo a esta investigación se procedió a envejecer las briquetas en un horno convencional a 85°C para determinar el incremento del módulo con respecto al envejecimiento.



Grafico 6-4 Colocación de las briquetas en el horno (Fuente: autor)

7 CAPITULO 7: PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 Ensayos de modulo y fatiga para la recolección de información

Fecha ensayo	Muestra	Deformación Inicial (10 ⁻⁶)	Sm (Mpa) a Def. Controlada	σ (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ calculada	σ_2 (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ_2 calculada	σ_3 (kPa) calculada	Repeticiones Nf hasta fatiga, a σ_3 constante
10-nov	1A	135	1936	127	1764	116	1860	122	12803
11-nov	2A	135	2301	152	2064	136	2030	134	15235
12-nov	3A	135	2340	154	2069	136	2032	134	17205
13-nov	4A	135	5132	338	4851	319	4876	321	6261
14-nov	5A	135	5400	356	5109	336	5025	331	6941
14-nov	6A	135	6117	403	5718	377	5305	349	8969
18-nov	7A	135	6421	423	6148	405	6277	413	5802
18-nov	8A	135	6975	459	6296	415	6544	431	5039
19-nov	9A	135	7375	486	6865	452	7010	462	3060
21-nov	10A	135	7929	522	7969	525	7776	512	2976
21-nov	11A	135	8514	561	8019	528	7796	513	2767
21-nov	12A	135	9022	594	8272	545	8255	544	2854
21-nov	13A	135	8717	574	8277	545	8427	555	920
21-nov	14A	135	9000	593	8162	537	8446	556	1723
24-nov	15A	135	8302	547	7720	508	7514	495	1533
24-nov	16A	135	9534	628	8240	543	8106	534	2820
27-nov	17A	135	9316	613	8446	556	8462	557	1530
27-nov	18A	135	9316	613	8987	592	8829	581	1773

Tabla 7-1 Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada (muestra A)

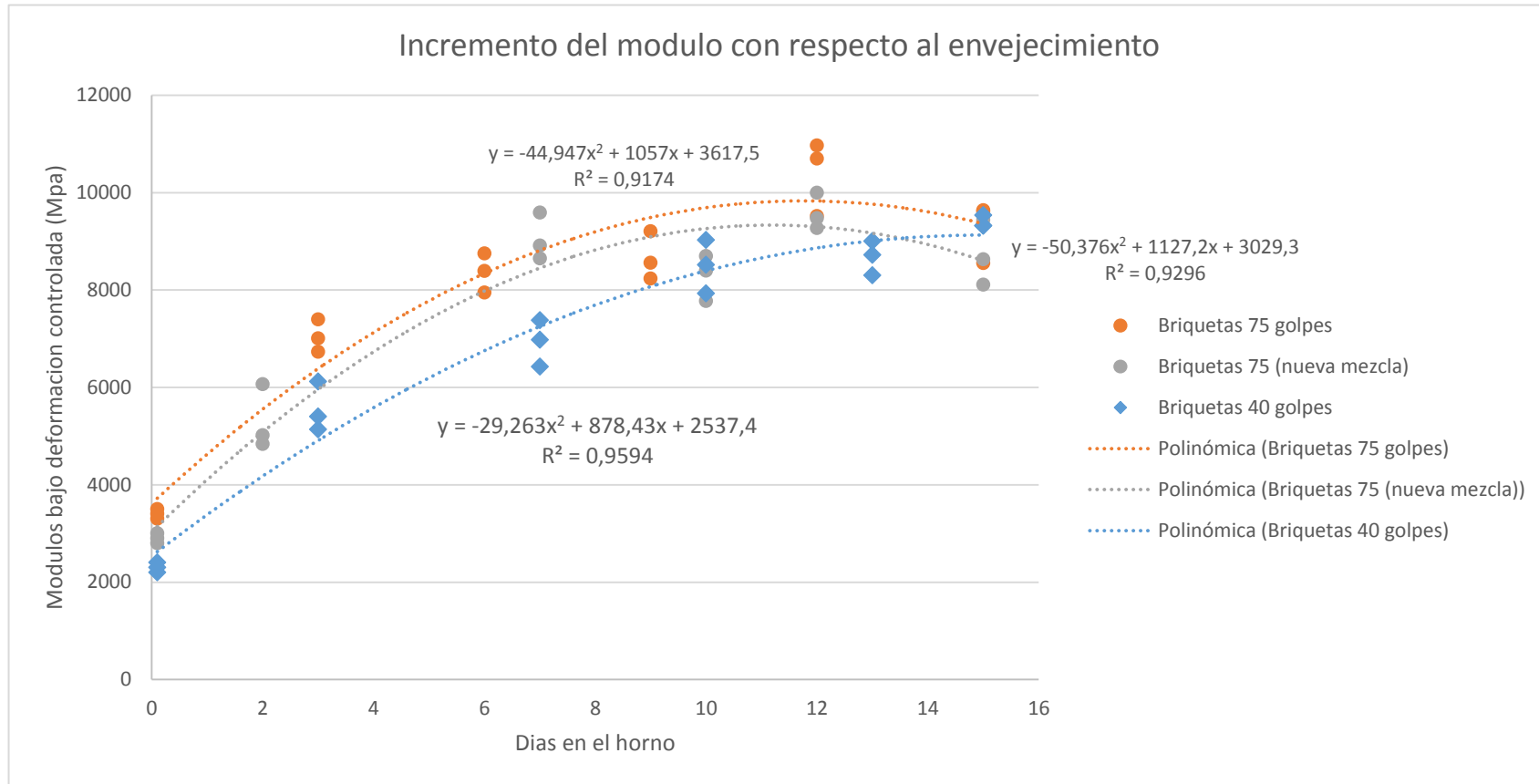
Fecha ensayo	Muestra	Deformación Inicial (10 ⁻⁶)	Sm (Mpa) a Def. Controlada	σ (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ calculada	σ_2 (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ_2 calculada	σ_3 (kPa) calculada	Repeticiones Nf hasta fatiga, a σ_3 constante
24-nov	1B	135	3239	213	3064	202	2927	193	8144
27-nov	2B	135	2980	196	2805	185	2702	178	10759
27-nov	3B	135	3405	224	2995	197	2891	190	12930
01-dic	4B	135	6727	443	6387	421	6569	433	4157
01-dic	5B	135	7007	461	6933	457	6767	446	4895
01-dic	6B	135	7392	487	6935	457	6920	456	5437
03-dic	7B	135	8389	552	7651	504	7474	492	5325
01-dic	8B	135	8746	576	8218	541	8284	546	N.E.
03-dic	9B	135	7948	523	7680	506	7390	487	4353
03-dic	10B	135	9204	606	8650	570	8443	556	2603
03-dic	11B	135	8233	542	7679	506	7723	509	N.E.
10-dic	12B	135	8555	563	8269	545	8100	533	4207
10-dic	13B	135	9519	627	9177	604	9013	594	5160
10-dic	14B	135	10968	722	9555	629	9760	643	N.E.
10-dic	15B	135	10699	705	10007	659	10203	672	3140
10-dic	16B	135	9610	633	8955	590	8740	576	2698
11-dic	17B	135	9634	634	8917	587	8578	565	2382
11-dic	18B	135	8554	563	8232	542	8148	537	2473

Tabla 7-2 Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada (muestra B)

Fecha ensayo	Muestra	Deformación Inicial (10 ⁻⁶)	Sm (Mpa) a Def. Controlada	σ (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ calculada	σ_2 (kPa) calculada	Sm (Mpa) a σ_2 calculada	σ_3 (kPa) calculada	Repeticiones Nf hasta fatiga, a σ_3 constante
19-dic	1C	135	2457	162	2649	174	2567	169	10720
19-dic	2C	135	2952	194	2327	153	2310	152	14522
19-dic	3C	135	2402	158	2104	139	1967	130	14642
05-ene	4C	135	4834	318	4568	301	4472	294	12750
05-ene	5C	135	6061	399	5701	375	5389	355	8300
06-ene	6C	135	5014	330	4992	329	4987	328	9351
06-ene	7C	135	8647	569	8117	535	8301	547	5204
06-ene	8C	135	9586	631	9316	613	8928	588	1983
08-ene	9C	135	8912	587	8842	582	8678	571	7105
08-ene	10C	135	8693	572	7939	523	7655	504	6094
09-ene	11C	135	7771	512	7505	494	7386	486	4290
09-ene	12C	135	8397	553	8089	533	8007	527	6703
13-ene	13C	135	9268	610	8430	555	8512	561	3105
15-ene	14C	135	9475	624	8932	588	8794	579	2813
16-ene	15C	135	9995	658	9264	610	9229	608	2919
16-ene	16C	135	8109	534	7815	515	7664	505	3786
19-ene	17C	135	9437	621	9075	598	8878	585	1771
19-ene	18C	135	8628	568	8106	534	8054	530	2103

Tabla 7-3 Tabla de trabajo para ensayos de modulo y fatiga a deformación inicial controlada (muestra C)

7.2 Análisis incremento del módulo con respecto al envejecimiento en el horno



Grafica 7-1 Variación del módulo con respecto al envejecimiento (curva polinómica)

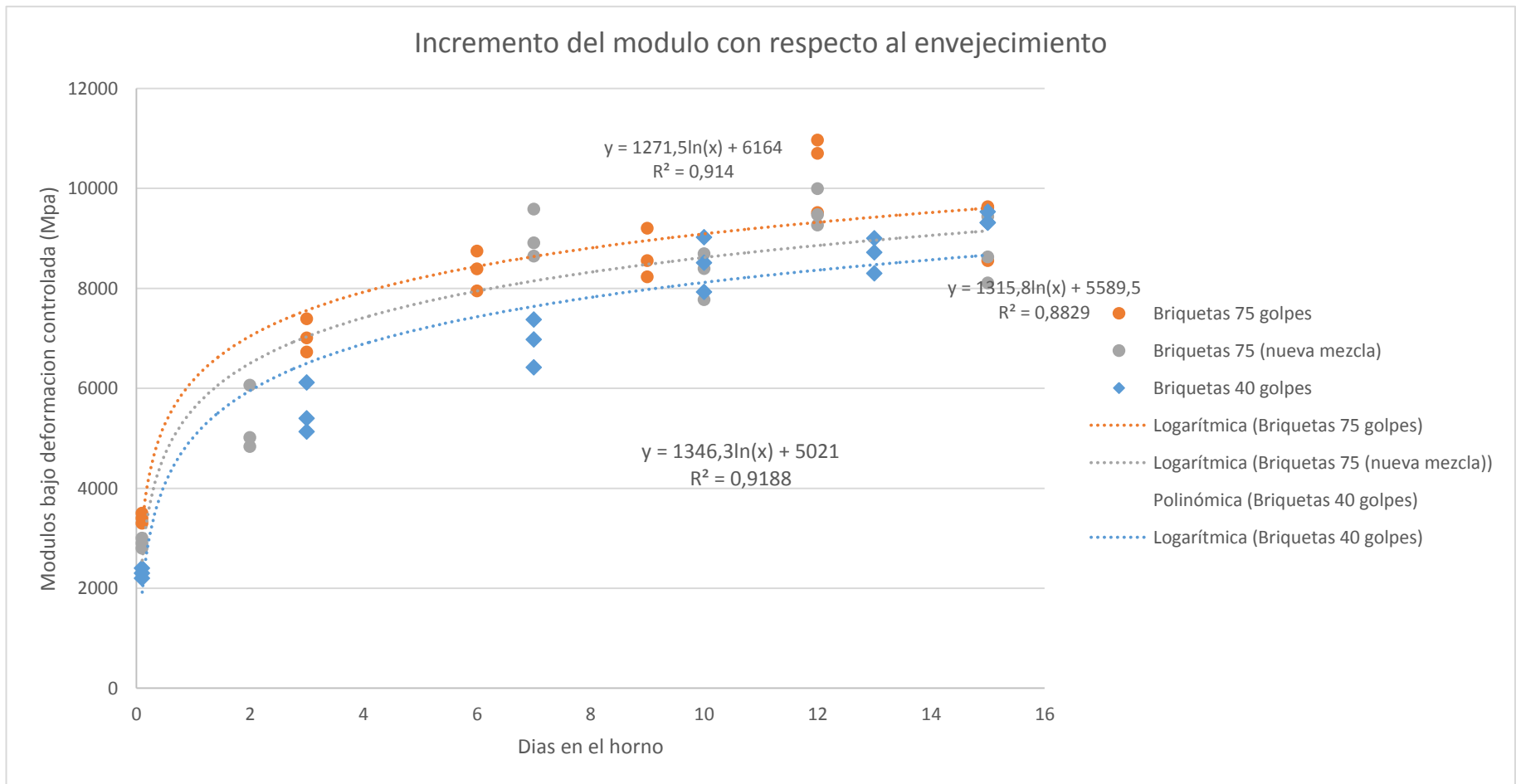
De los resultados obtenidos de ensayos de módulos bajo deformación controlada de las briquetas con diferente compactación y con diferentes días de envejecimiento al horno, se observa que evidentemente existe un aumento importante en los módulos a medida que el envejecimiento se incrementa. Este aumento de rigidez se ve más pronunciado dentro de los primeros 6 días de envejecimiento al horno (aprox. 8 años en campo). Tiempo a partir del cual el aumento mencionado comienza a ser menos evidente.

Es decir, está claro que el envejecimiento produce un incremento en el módulo, pero parece ser que a partir de cierto tiempo ese aumento de rigidez comienza a desaparecer hasta incluso se podría pensar que el módulo empieza a decrecer. Llega a un punto en que pareciera que empieza a perder sus características de cohesión y adherencia el asfalto con la piedra.

El asfalto pega las partículas de piedra y arena entre sí, para que esto suceda el asfalto debe tener la característica de adherirse (adhesión) a la piedra y de no romperse cuando se lo estira (cohesión). Un asfalto que se deje estirar puede permanecer sin romperse, se va a deformar pero no se va a romper. Se sabe que cuando el asfalto se endurece, es más resistente a la deformación pero llega a romperse.

El exceso del fenómeno es lo que se pudiera estar presentando en este procedimiento de ensayos de módulos de briquetas puestas al horno. Estas observaciones se han realizado en base a la curva polinómica (segundo grado) de los ensayos que muestra la característica de llegar a un máximo y luego caer.

A continuación se presenta el resultado de los ensayos pero ajustados a una curva logarítmica.



Grafica 7-2 Variación del módulo con respecto al envejecimiento (curva logarítmica)

Cuando se realiza el ajuste de los ensayos con una curva logarítmica también tenemos una muy buena correlación. En este caso la curva logarítmica pareciera demostrar que llegamos a una asíntota y nunca decrece el modulo.

La data de lo que hemos observado pareciera confirmar la hipótesis de que tenemos un comportamiento de curva polinómica, sin embargo se deja planteado los dos tipos de curva ya que la data correlaciona muy bien para ambos casos.

A continuación se presenta una investigación del año 2004, presentada en la tesis de los estudiantes Zambrano y Giller en la que realizaron ensayos de módulos de rigidez a núcleos obtenidos en diversas calles de la ciudad de Guayaquil.

	Módulo de Rigidez	Año	Planta	
Calle Portete 17/23	9507.80	1995	Avecan	Material Vía Daule
Calle Portete Una Vía	8253.50	1995	Avecan	Material Vía Daule
Alejo Lascano	9510.50	1994	Heran	Material Vía a la Costa
Vía a Daule	6857.63	2001	Equitesa	Material Vía Daule
Av. C.J. Arosemena	4919.13	2002	Colisa	Material Vía Daule

Los resultados presentados son promedios de 8 briquetas para cada mezcla con diferentes tipos de fuentes o agregados. En general los valores obtenidos para los pavimentos de alrededor de 10 años en campo, presentan módulos en un rango de 8000 a 9500 MPa. Para el caso de los pavimentos de entre 2 a 3 años en campo se reportaron módulos en un rango de 5000 a 7000 MPa.

Al comparar estos resultados con los ensayos de módulos realizados a nuestros lotes de briquetas realizadas con los mismos materiales y provenientes de la misma cantera, se puede decir que los resultados son parecidos. Es decir, se ha envejecido al horno briquetas de acuerdo al protocolo de la SHRP, en el que menciona que dos días de envejecimiento al horno a 85°C representa aproximadamente de 0 a 3 años en campo. Las briquetas con ese envejecimiento reportaron módulos con un rango entre 5000 a 7000 MPa.

Para el caso 4 a 8 días de envejecimiento al horno a 85°C representa aproximadamente de 6 a 9 años en campo, las briquetas con ese envejecimiento resultaron con módulos entre 7000 a 10000 MPa. Con lo que se puede concluir que establecer una comparación entre estas investigaciones es válido.

7.3 Análisis ensayos de fatiga

7.3.1 Lote de briquetas a 40 golpes de compactación

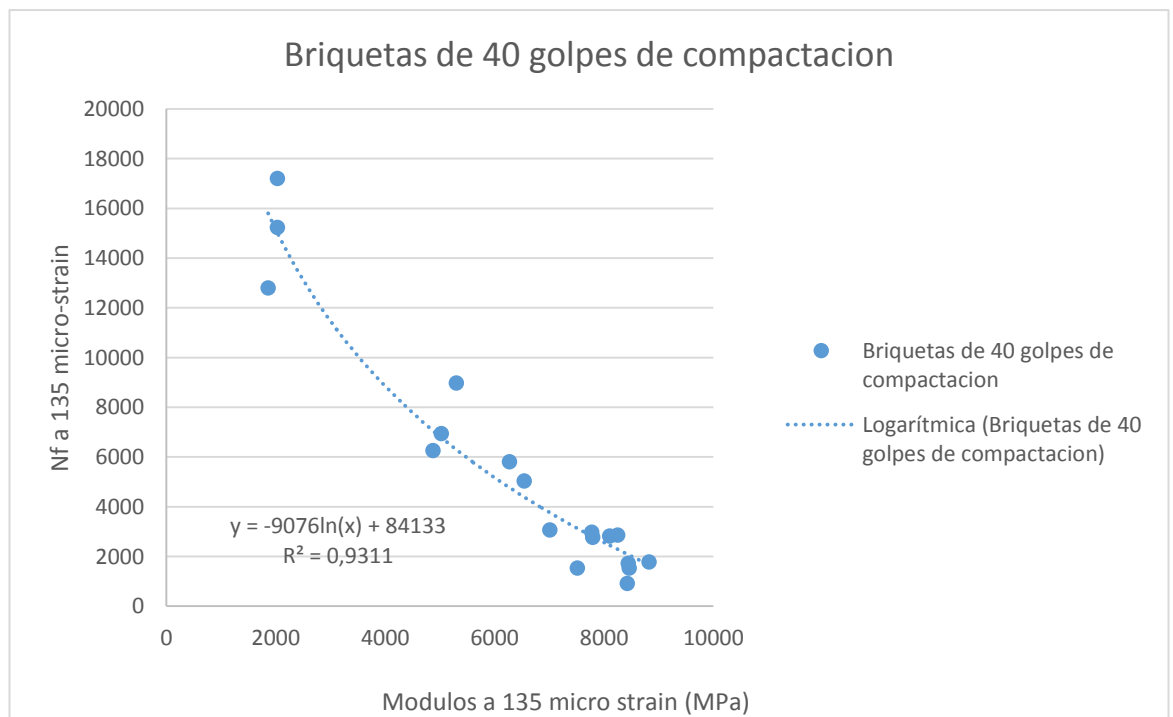
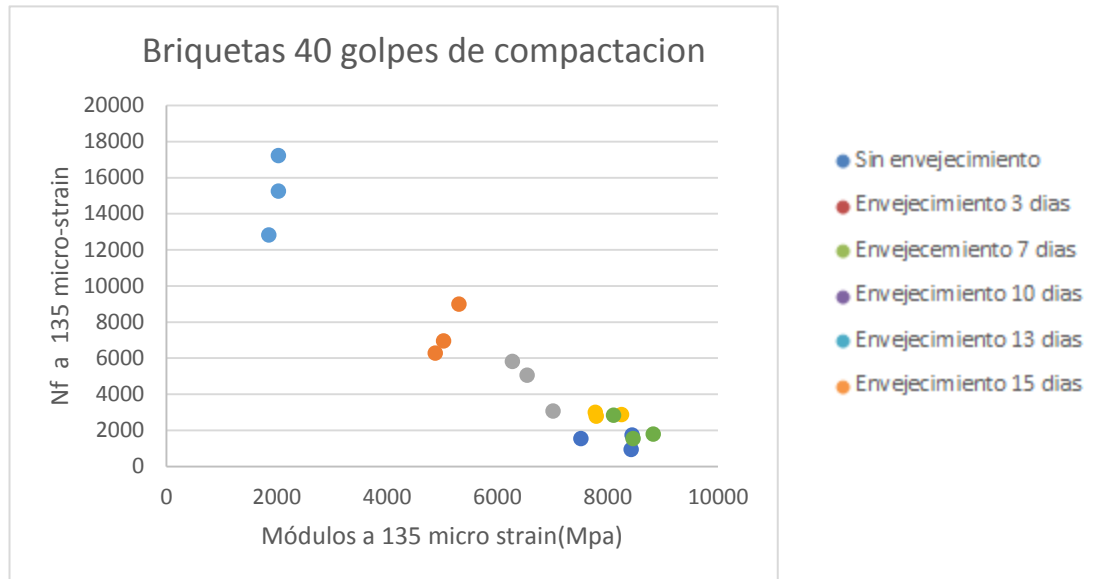


Gráfico 7-3 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra A)

7.3.2 Lote de briquetas a 75 golpes de compactación

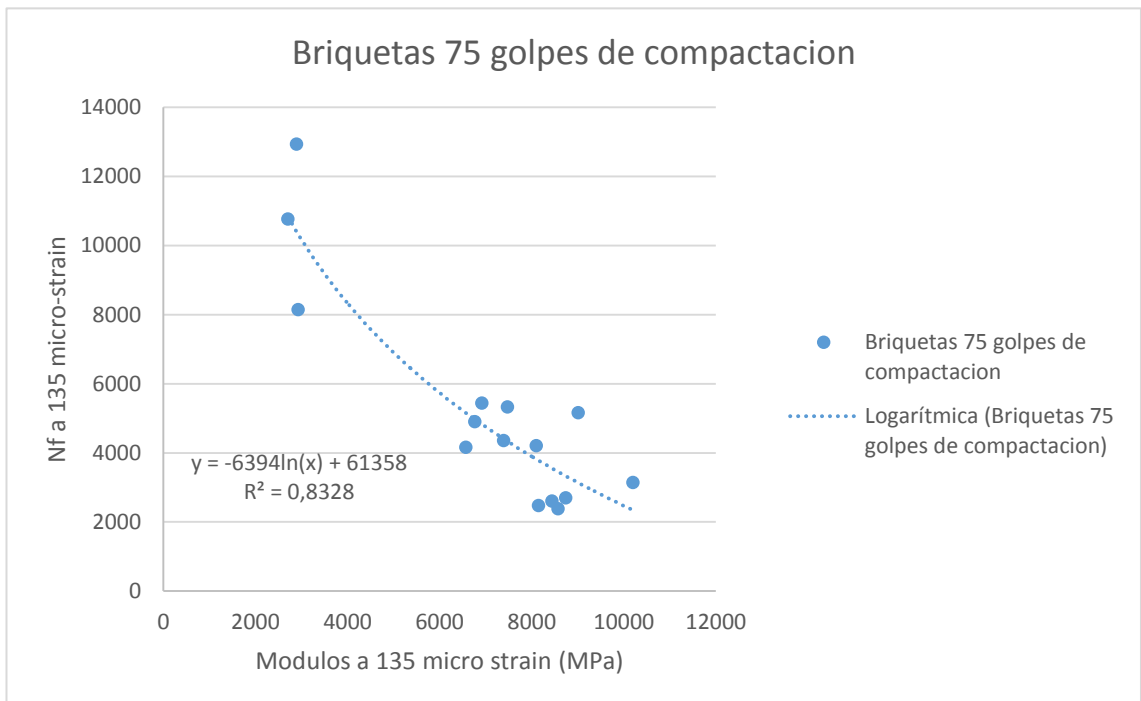
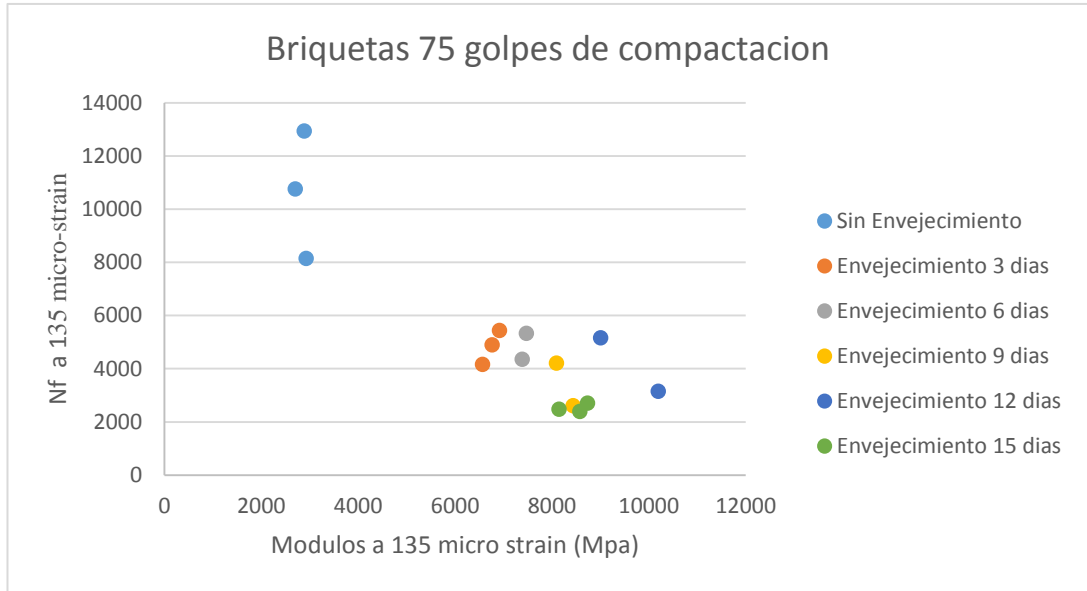


Grafico 7-4 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra B)

7.3.3 Lote de briquetas a 75 golpes de compactación (granulometría modificada)

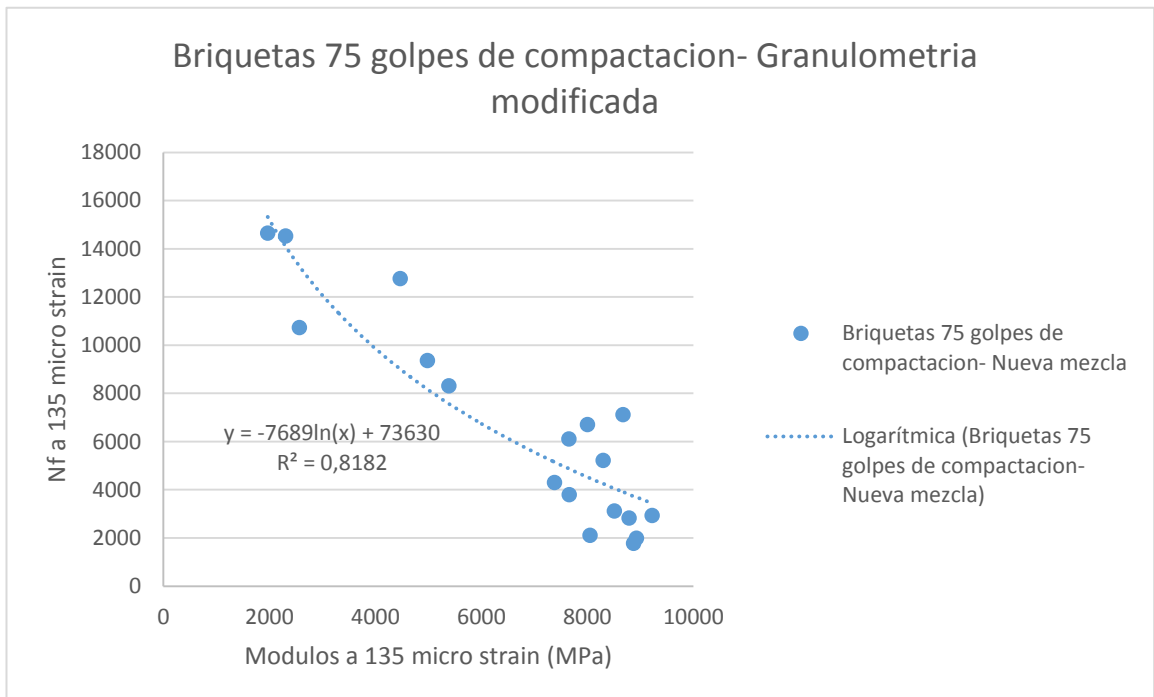
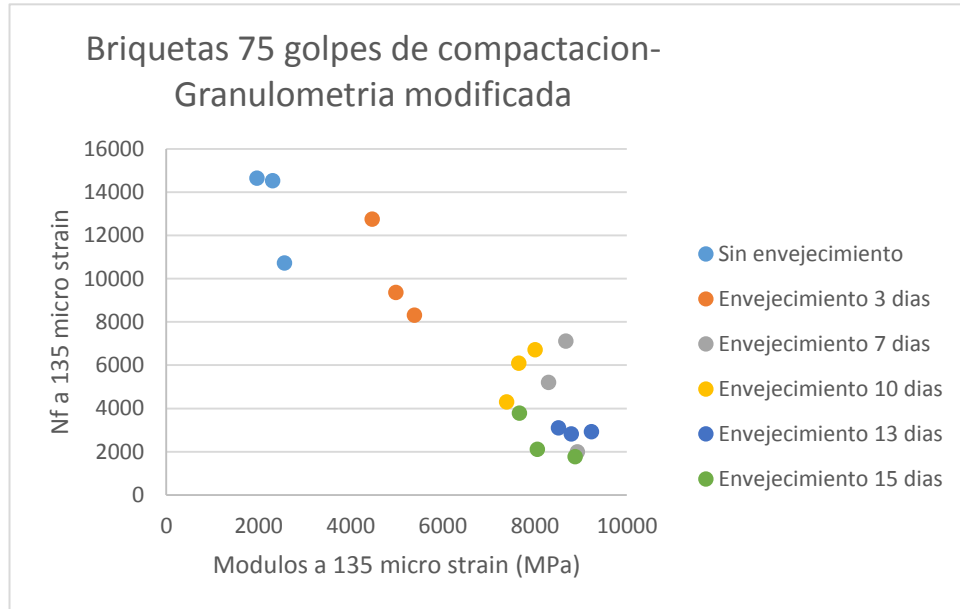


Grafico 7-5 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (muestra C)

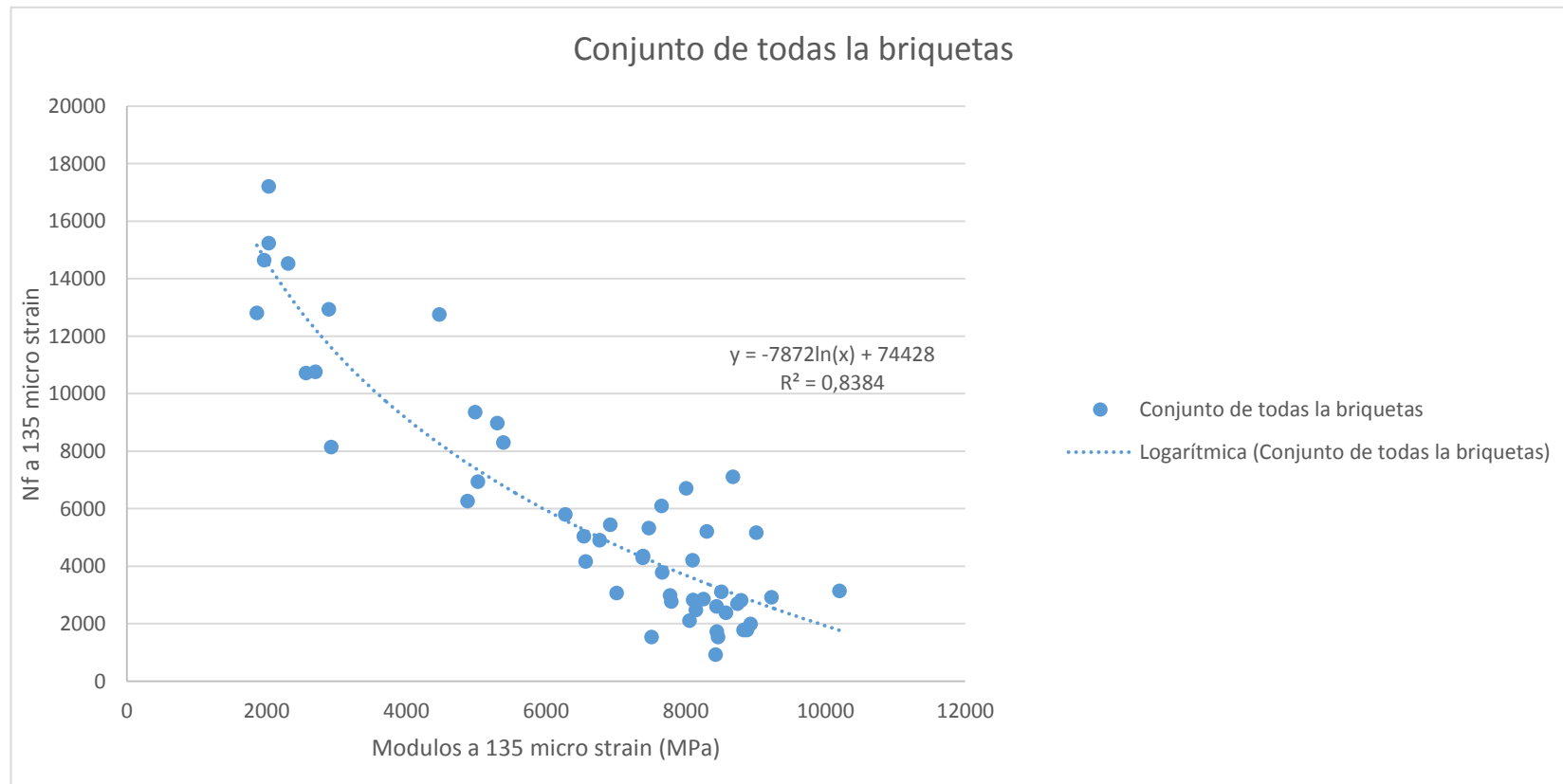
El comportamiento a fatiga de las briquetas a 40 golpes de compactación observado en el gráfico 7-3 muestra que inicialmente las muestras sin envejecimiento tienen un buen comportamiento a la fatiga, según la línea de control de las 10000 repeticiones. Sin embargo a partir del 3er día de envejecimiento en el horno la resistencia a la fatiga decae drásticamente. Esto se debe a que el efecto de oxidación es fuerte en estas muestras puesto que tienen más vacíos, la oxidación penetra a todo el asfalto. Al incrementarse el número de días de envejecimiento al horno se observa que la resistencia decrece aún más, a pesar de que los módulos hayan aumentado.

En el caso de las briquetas con 75 golpes de compactación se observa un comportamiento similar al anterior, inicialmente ofrece buena resistencia a la fatiga pero al producirse oxidación por el envejecimiento al horno, la mencionada resistencia empieza a ser mala. Ver gráfico 7-4.

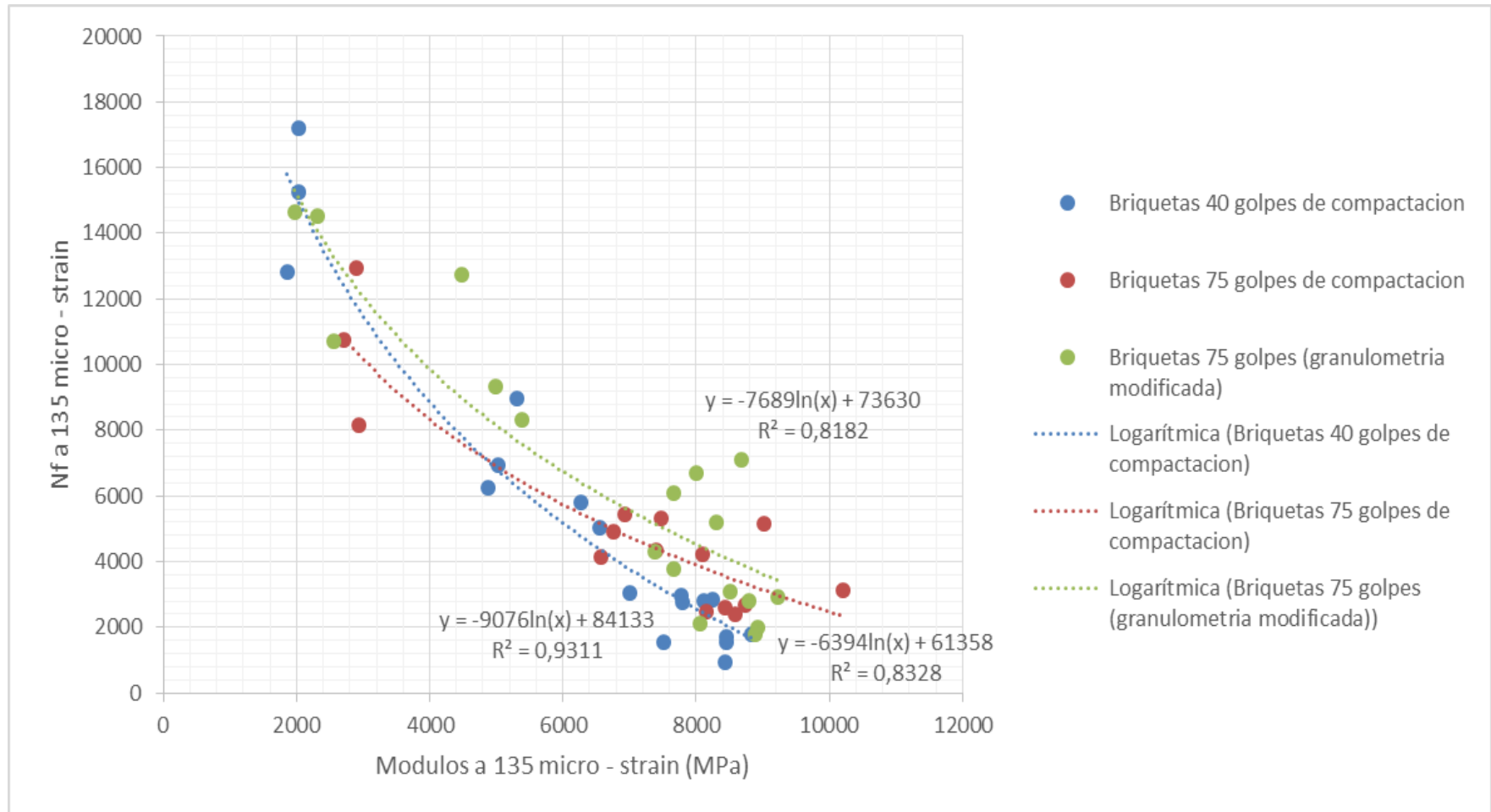
De los resultados obtenidos en la gráfica 7-5 puede verse que las muestras con granulometría modificada ofrecen un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a la fatiga, aunque no el mejor. Esta mejoría se debe a que la cantidad adicional de asfalto no permite que la oxidación penetre a todo el asfalto.

Evidentemente el incremento del módulo por exceso de envejecimiento no significa un aumento en la resistencia a la fatiga sino más bien un deterioro de la misma, debido a la excesiva rigidez del asfalto.

A continuación se presenta la curva Repeticiones Vs Incremento de Modulo para el conjunto de todos los lotes de briquetas.



Grafica 7-6 Repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo (conjunto de todas las muestras)



Grafica 7-7 Líneas de tendencia de cada uno de los 3 lotes de briquetas

Al juntar toda la data obtenemos una sola ecuación con un factor de correlación aceptable. Esta ecuación describe razonablemente los resultados lo que significa que se podría pensar que mediante la medición del módulo para mezclas que no tengan modificaciones en los asfaltos y que se hagan con asfalto de Ecuador estamos dándonos cuenta del nivel de envejecimiento que tiene esa mezcla y quién sabe si podríamos llegar a decir cuanta vida remanente le queda a la mezcla

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Evidentemente existe relación para las mezclas asfálticas de uso común en el Ecuador entre el módulo resiliente medido a tracción indirecta y la resistencia a la fatiga probada por el mismo método de ensayo. El módulo de rigidez juega un papel predominante en el comportamiento a la fatiga.
- Las variables que afectan la rigidez, como el porcentaje de asfalto y el grado de compactación de la mezcla, afectaran también a la fatiga. El comportamiento ante la resistencia a la fatiga en las briquetas con granulometría modificada se vio mejorada debido a que tuvo un aumento en el porcentaje de asfalto y una compactación al 4% de vacíos.
- De acuerdo a los ensayos y análisis realizado se puede concluir que el criterio presentado en la tesis de William Macero aún no se puede validar, ya que al parecer las mezclas no son óptimas en cuanto a la resistencia a la fatiga. El criterio parece ser muy estricto para este tipo de mezclas. Inicialmente las briquetas pasan las 10000 repeticiones pero al envejecerse su resistencia a la fatiga decae drásticamente.
- En la ecuación que describe las repeticiones a la fatiga con respecto al incremento del módulo, $y = -7872\ln(x) + 74428$ de la gráfica 7.6. Se observa que a partir que los módulos superan los 3584 Mpa ya no cumple el criterio de las 10000 repeticiones. Sin embargo si el criterio fuera modificado hasta las 6000 repeticiones el 30% de las mezclas cumplirían con el criterio.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio similar con las diferentes mezclas que se fabrican en la ciudad para constatar si los resultados mejoran y poder concluir si el problema es la calidad de los agregados.

BIBLIOGRAFIA

Andaluz, A. (2013) *Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región costa del Ecuador mediante pruebas de desempeño.*

Asphalt Institute. (1997) *Mix design methods for asphalt concrete.* MS-2 (Sixth Edition.). U.S.A.

Bell, C. A., Wieder, A. J., & Fellin, M. J. (1994). *Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures: field validation* (No. SHRP-A-390).

Cardenas, G. A. (2014). *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Oriente del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño.* Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Chávez-Valencia, Luis Elías; Hernández-Barriga, C. (2009). Estado del Arte y Perspectiva del Envejecimiento de los Pavimentos Asfálticos. Acta Universitaria, Enero-Abril, 30-39.

Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Delgado, H. (2005) Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Recuperado de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>

Macero, W. M. (2014). *Evaluación de resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas y determinación de puntos óptimos para su control.* Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Nuñez, K. G. (2014). *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Sierra del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.

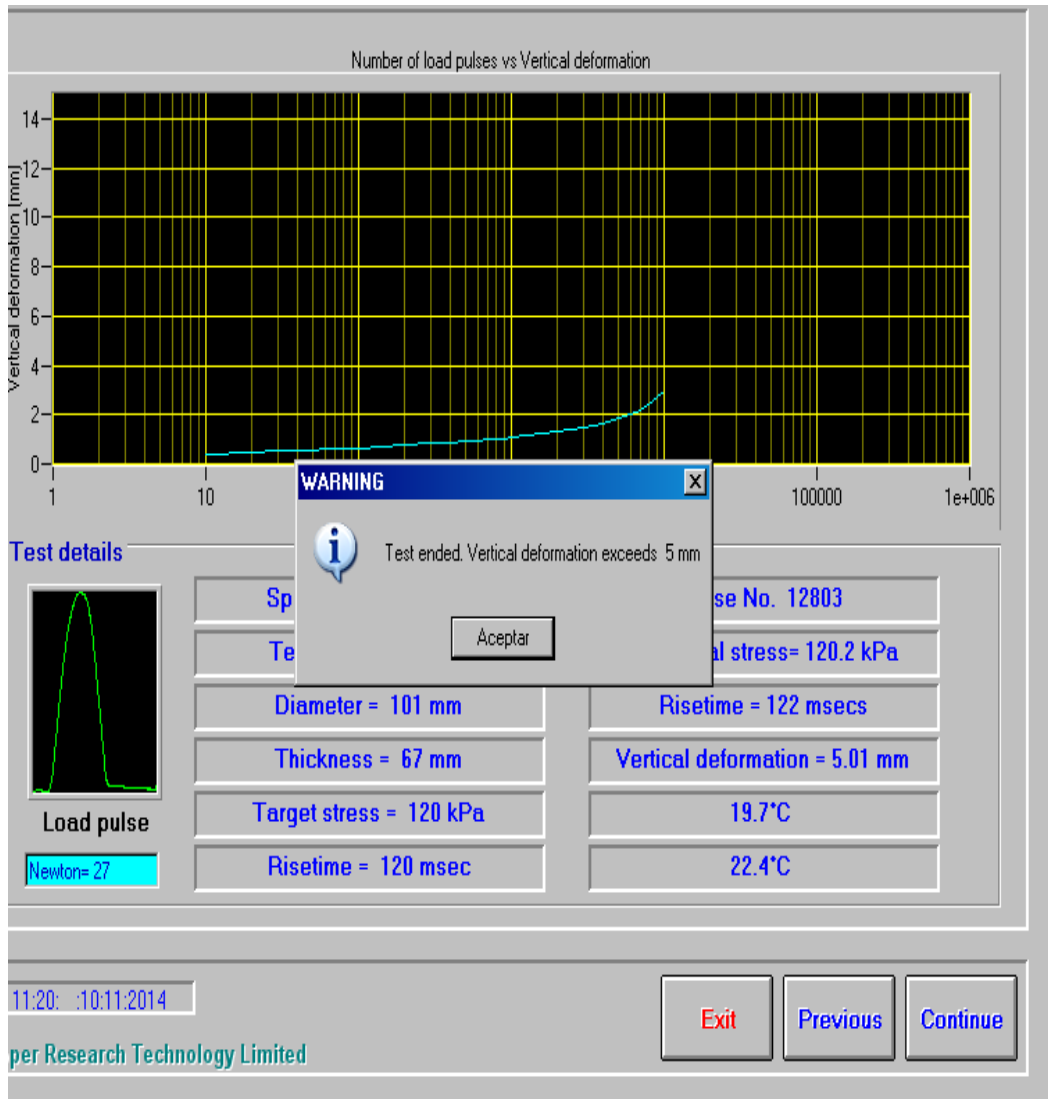
Rondón Quintana, Hugo Alexander, & Reyes Lizcano, Fredy. (2007). COMPORTAMIENTO RESILIENTE DE MATERIALES GRANULARES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: ESTADO DEL CONOCIMIENTO. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(11), 65-90. Recuperado en 19 Noviembre del 2014, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242007000200006&lng=es&tlng=es. .

Técnicas para la construcción de Carreteras y Puentes. MOPT-001-F, Quito – Ecuador, 2002

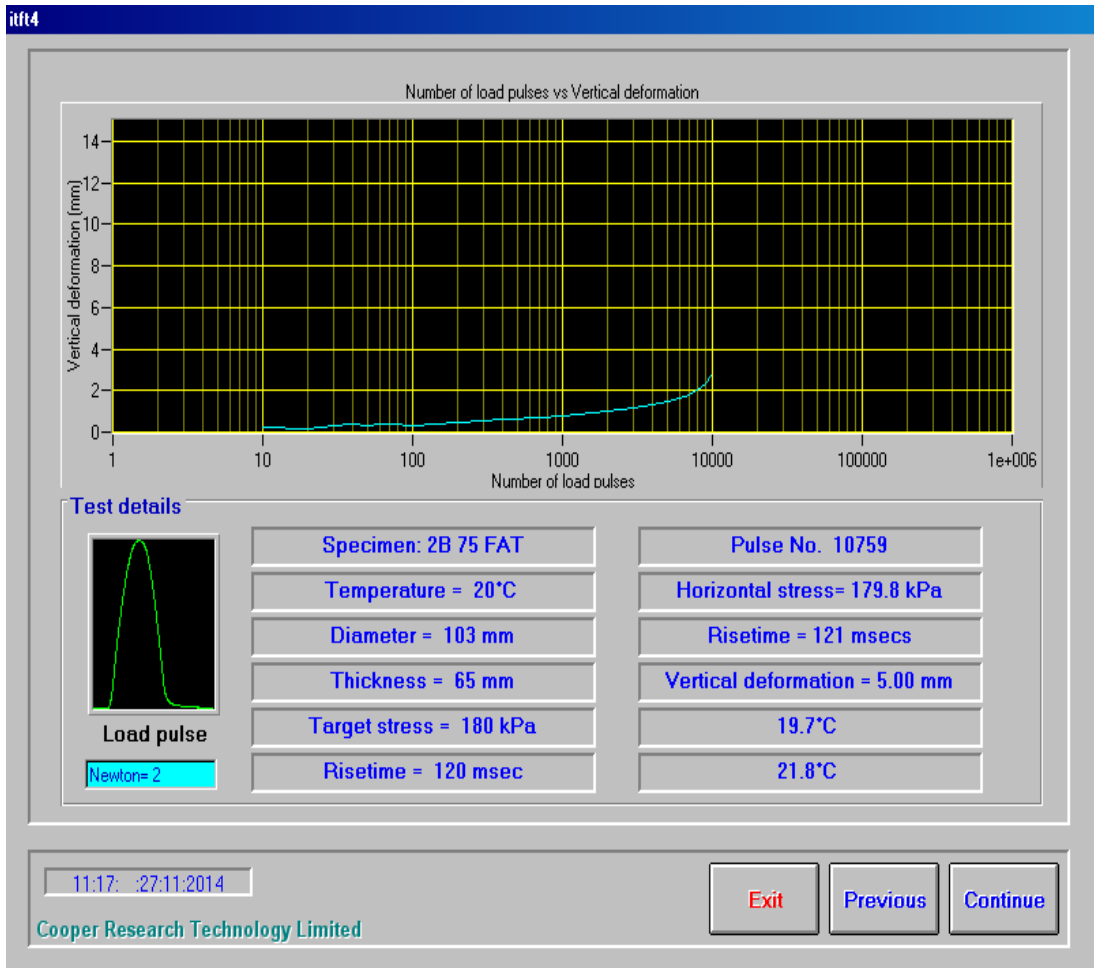
Yang H. (2004). *Pavement analysis and Design*. University of Kentucky, Second Edition U.S.A.

ANEXOS

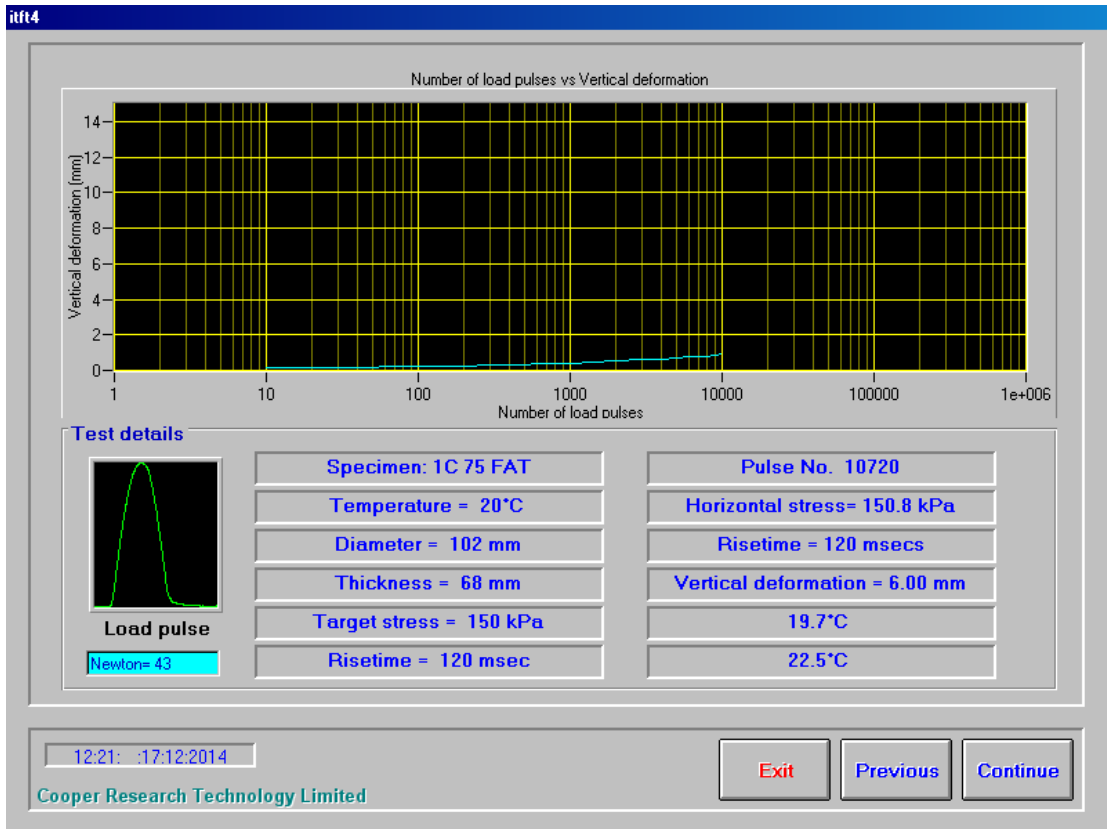
ENSAYOS DE FATIGA EN EL NAT:



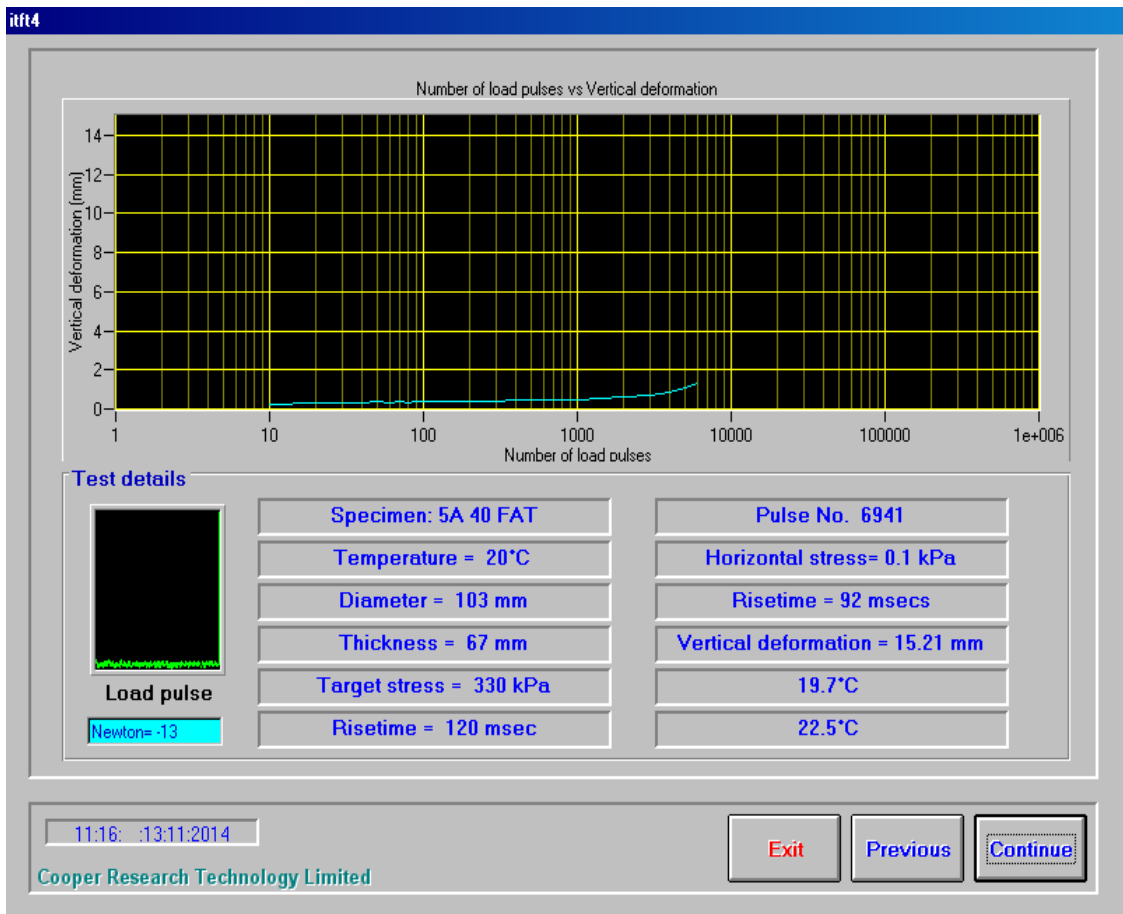
Ensayo de fatiga muestra A (sin envejecimiento)



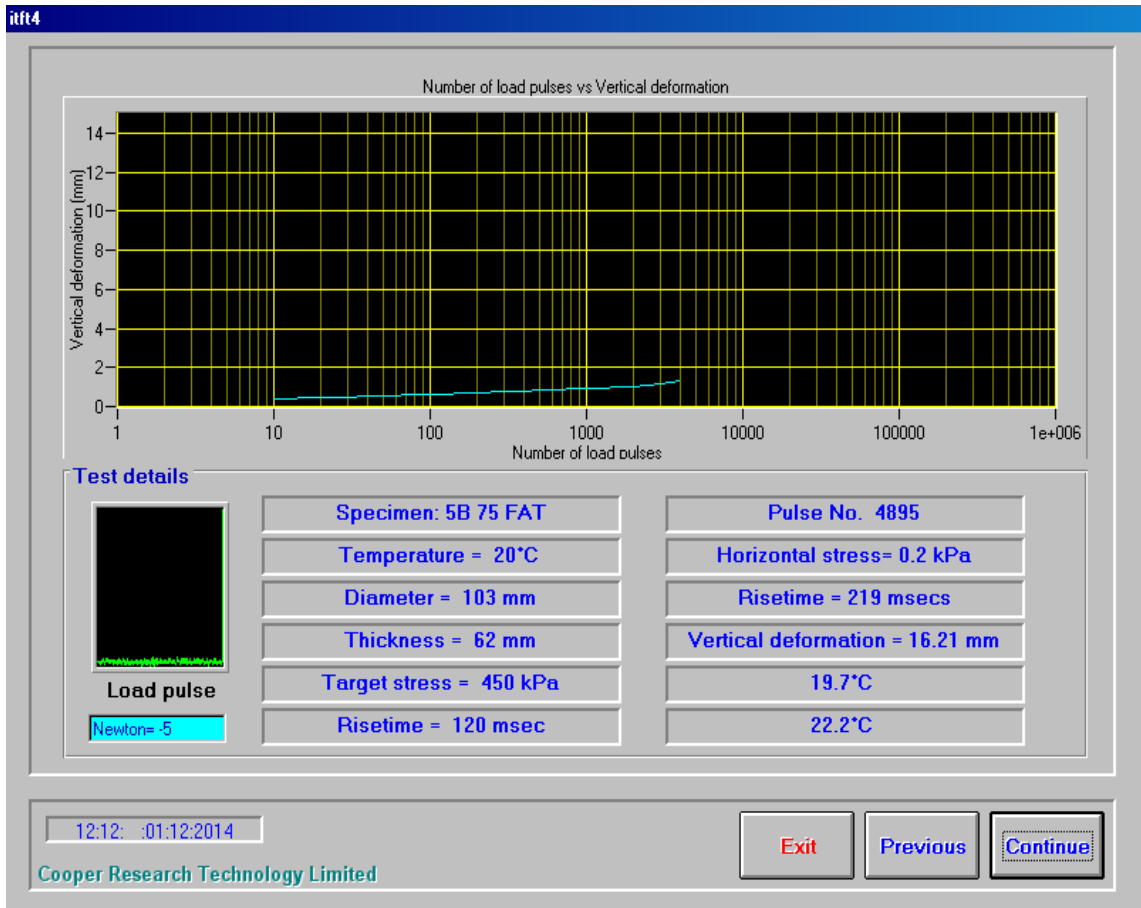
Ensayo de fatiga muestra B (sin envejecimiento)



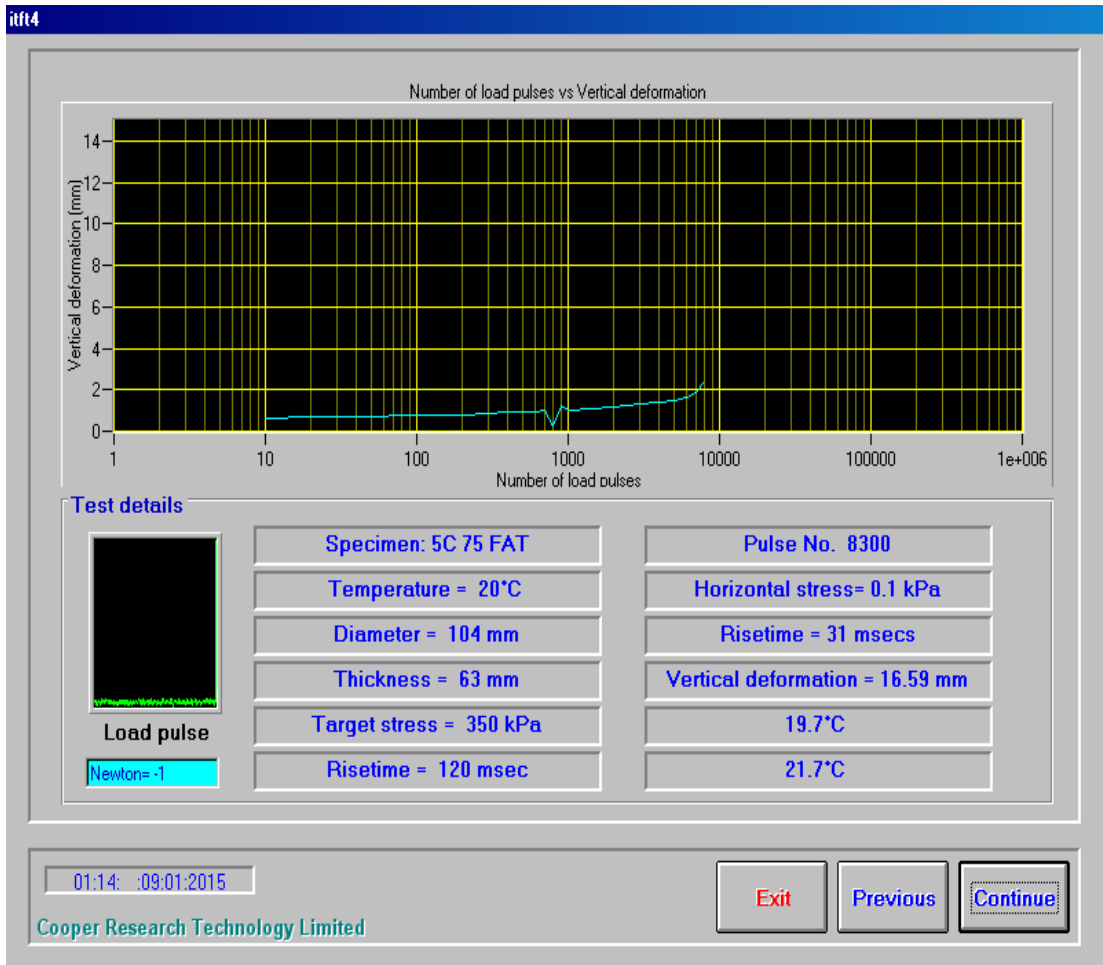
Ensayo de fatiga muestra C (sin envejecimiento)



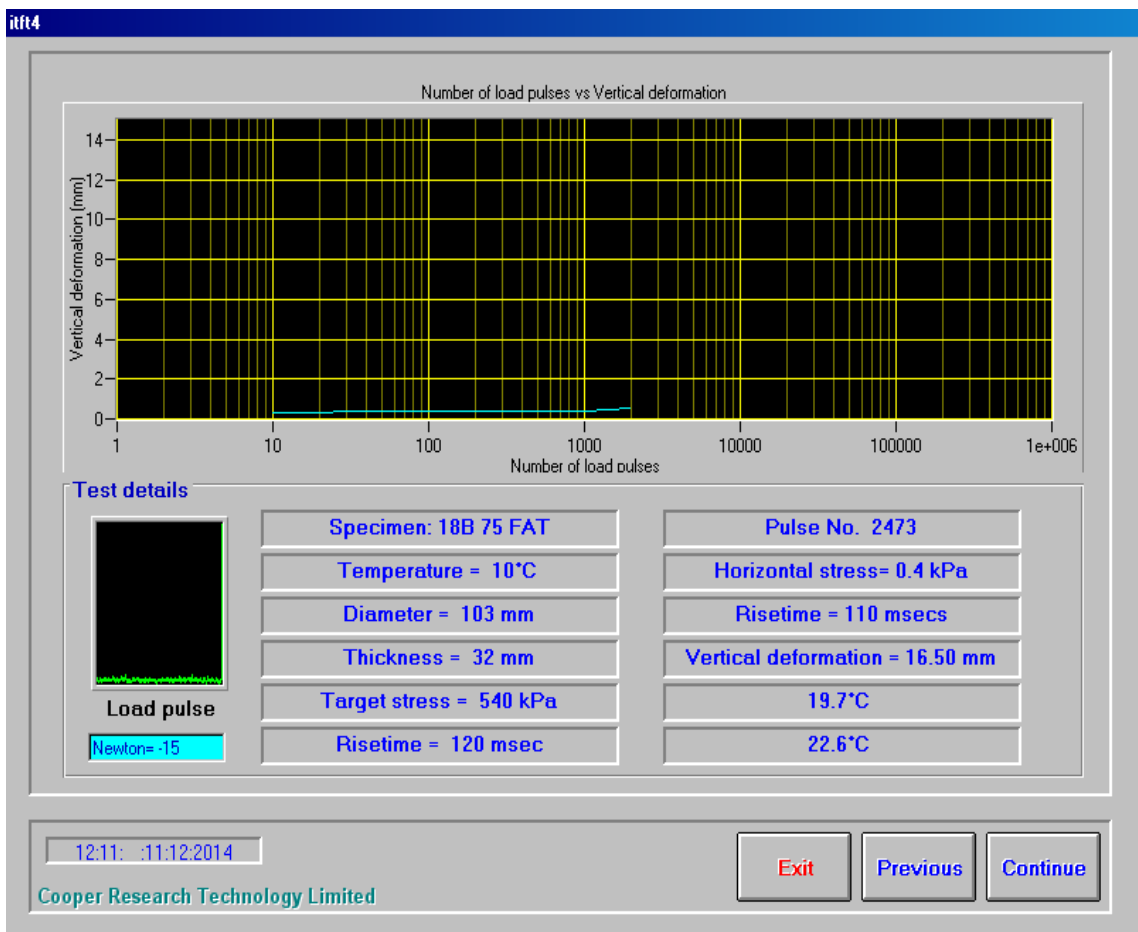
Ensayo de fatiga muestra A (3 días envejecimiento en horno)



Ensayo de fatiga muestra B (3 días envejecimiento en horno)



Ensayo de fatiga muestra C (2 días envejecimiento en horno)



Ensayo de fatiga muestra B (15 días envejecimiento en horno)