



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

**TÍTULO:
“EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS Y DETERMINACIÓN DE PUNTOS ÓPTIMOS PARA
SU CONTROL”**

**AUTOR:
WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS**

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

**TUTOR:
ING. GUSTAVO GARCÍA CAPUTI**

Guayaquil, Ecuador
2014



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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS** como requerimiento parcial para la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**

TUTOR

Ing. Gustavo García Caputi

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Mario Dueñas

Guayaquil, a los 7 del mes de octubre del año 2014



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación “**EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y DETERMINACIÓN DE PUNTOS ÓPTIMOS PARA SU CONTROL**” 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 7 del mes de octubre del año 2014

EL AUTOR

WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“EVALUACIÓN DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y DETERMINACIÓN DE PUNTOS ÓPTIMOS PARA SU CONTROL”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 7 del mes de octubre del año 2014

EL AUTOR:

WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mi tutor, el Ing Gustavo García, por la orientación brindada para desarrollar el tema.

WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me apoyaron siempre y cuyo ejemplo de sacrificio, trabajo constante y superación me impulsaron a siempre a seguir adelante en todos los aspectos de mi vida.

WILLIAM MANUEL MACERO QUINTEROS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

ING. GUSTAVO GARCÍA CAPUTI
ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. Descripción del problema	2
1.3. Objetivos	3
CAPÍTULO 2: DISTINTAS FALLAS DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	4
2.1. Ahuellamiento	4
2.2. Fatiga	6
2.2.1. Ensayo	10
2.3. Agrietamiento Térmico	11
CAPÍTULO 3: FACTORES QUE AFECTAN A LA FATIGA	13
3.1. Ductilidad	13
3.2. Envejecimiento	14
3.2. Fenómeno	15
3.3.1. Variables intrínsecas	16
3.3.2. Variables extrínsecas	20
3.4. Módulos	23
CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE PARAMETROS	25

4.1. Módulo Resiliente	25
4.1.1. Ensayo.....	26
4.2. Módulo dinámico complejo	27
4.2.1. Ensayo.....	30
4.3. Propiedades volumétricas	32
CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA.....	36
5.1 Introducción.....	36
5.2. Desarrollo	37
5.2.1. Modelos de fisuras a fatiga.....	42
5.2.2. Valor de resistencia máxima	48
5.3. Verificación	51
5.3.1. Granulometrías.....	52
5.3.2. Envejecimiento de los testigos.....	53
5.3.3. Ensayo en el NAT.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
Anexos.....	60
A.1 Pasos para realizar las Briquetas.....	60
A.2. Pasos para Realizar en Ensayo Rice	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1 Líneas de tendencia logarítmica y potencial.....	38
Tabla5-2 Valores de R ²	38
Tabla 5-3 Resultado reemplazar las ecuaciones por 3 valores de ciclos de laboratorio.....	40

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1 Ahuellamiento por Sub-base débil.....	4
Gráfico 2-2 Ahuellamiento por mezcla débil.....	5
Gráfico 2-3 Ahuellamiento severo de pavimento.....	6
Gráfico 2-4 Fatiga severa de pavimento.....	7
Gráfico 2-5. Vida de fatiga de tres mezclas asfálticas.....	9
Gráfico 2-6. Dos formas de ensayo de Fatiga: Esfuerzo constante y deformación constante.....	10
Gráfico 2-7. Ejemplo de agrietamiento por temperatura.....	11
Gráfico 3-1. Ensayo ASTM D113 de ductilidad.....	13
Gráfico 3-2. Separación en fracciones SARA para algunos asfaltos.....	16
Gráfico 3-3. Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas.....	18
Gráfico 3-4. Etapas en el proceso de envejecimiento.....	22
Gráfico 3-5. Relación de módulos de envejecimiento para tres mezclas asfálticas.....	23
Gráfico 4-1. Deformaciones bajo cargas repetitivas.....	25
Gráfico 4-2. Deformaciones longitudinales y transversales, al fondo de una capa asfáltica.....	26
Gráfico 4-3. Dos asfaltos con el mismo G* pero con diferente ángulo de fase.....	29
Gráfico 4-4. Caracterización básica del reómetro dinámico de corte.....	29
Gráfico 4-5. Resultados de Esfuerzo y deformación obtenidos en un reómetro de esfuerzo constante.....	30

Gráfico 4-6. Respuesta de Esfuerzo-Deformación de un material visco. elástico.....	31
Gráfica 4-7 Ilustración de los parámetros del diseño volumétrico.....	33
Gráfica 4-8. Ilustración de los volúmenes de los diferentes componentes del asfalto.....	34
Gráfica 5-1. Ley de fatiga (Sierra) dibujada en una escala no-logarítmica.....	37
Gráfica 5-2. Ley de fatiga (Costa) dibujada en una escala no-logarítmica.....	37
Gráfica 5-3. Ley de fatiga (Oriente) dibujada en una escala no-logarítmica.....	38
Gráfica 5-4. Muestra las deformaciones, máximas, mínimas, obtenidas, así como también su promedio y Percentil 15.....	40
Gráfica 5-5. Gráficos de las diferentes leyes de fatiga utilizadas para el diseño a Fatiga.	44
Gráfica 5-6. Gráficos de las diferentes leyes de fatiga utilizadas para el diseño a Fatiga.	45
Gráfica 5-7. Valores Mínimo, máximo y promedio de las diferentes leyes de Fatiga utilizadas para el diseño.....	45
Gráfica 5-8. Ley de Fatiga repeticiones contra deformación.....	46
Gráfica 5-9. Ley de fatiga graficada de manera no logarítmica.....	47
Gráfica 5-10 Esquema de los estados I, II y III.....	48
Gráfica 5-11. Pruebas de diferentes esfuerzos para validar la existencia de “Endurance limit”	49
Gráfica 5-12. Granulometrías usadas para realizar las briquetas.....	50
Gráfica 5-13 Modulo de Rigidez.....	54
Gráfica 5-14 Ensayo a fatiga.....	55
Gráfica A-1. Peso de 1100 gr de material para realizar la briqueta.....	60
Gráfica A-2. Eliminación de posibles espacios vacíos en la briqueta.....	61
Gráfica A-3.- Molde y soporte Marshal para compactación.....	61

RESUMEN (ABSTRACT)

En la actualidad el tema de la fatiga en los pavimentos asfálticos no tiene un enfoque tan simple. El fenómeno está muy bien entendido, pero existen todavía muchas dudas en cuanto a cómo predecir si se tendrá un buen desempeño a fatiga.

Este trabajo tiene el objetivo de obtener puntos óptimos de control, con los cuales se pueda predecir el comportamiento de mezclas asfálticas a Fatiga, cuando estas presentan módulos de rigidez demasiado altos y saber así si la mezcla es aceptable o no.

Para lograrlo se analizó leyes de Fatiga, obtenidas previamente de varias carreteras del país. Estos datos fueron recopilados en las tesis de los estudiantes, Katheryn Nuñez, Gelo Cardenas y Andrés Andaluz.

Lo que se obtuvo al final es un dato de deformación unitaria inicial, y una cantidad de ciclos de laboratorio a los cuales se probaran las mezclas.

Palabras Claves: Mezclas asfálticas, alto desempeño, fatiga, módulo de rigidez, deformación unitaria, percentil, envejecimiento.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Uno de los grandes problemas de la vialidad actual, ha sido el buscar el más alto desempeño de las mezclas asfálticas en caliente. Esto no solo asegura tener una red vial muy cómoda para el usuario, sino que además, conlleva a un ahorro de recursos, al aumentar la vida útil del pavimento.

Este desempeño consiste, como siempre se ha tenido claro, en mezclas asfálticas que no se deforman y que no se agrietan.

Las propiedades asociadas a la resistencia contra la deformación son el esqueleto mineral de la mezcla y la rigidez del asfalto que se usa (ya sea que se lo modifique o no, con algún polímero o producto que de mayor rigidez en las temperaturas altas de uso en el pavimento); y las pruebas que se usan en la actualidad para determinar la resistencia de las mezclas, son las de deformación permanente ante carga repetida (“creep” dinámico), y las de pistas de laboratorio con medición de deformación, como la rueda de Hamburgo, con rueda metálica, el APA, con rueda metálica y manguera que simule la acción del neumático, o la pista española o francesa, con ruedas infladas a presiones similares a las del tráfico en la vía.

Las propiedades asociadas a la resistencia contra el agrietamiento, tienen que ver con la ductilidad (o capacidad de fluir del cemento asfáltico) en temperaturas frías, y a lo largo de los años, de manera que no se agriete por contracción térmica; y con el módulo de rigidez (o el módulo dinámico) de la mezcla asfáltica que sea suficientemente alto para resistir a los esfuerzos causados por el tráfico, y que resista a la fatiga que se da ante la repetición de cargas durante el tiempo de servicio del pavimento.

Buscando el mayor beneficio y sabiendo que un módulo de rigidez elevado asegura que la mezcla tendrá estabilidad, y mejor transmisión de los esfuerzos a las capas inferiores; y dado que el envejecimiento del pavimento ayuda a aumentar dicho módulo, Se podría pensar, erróneamente, que envejeciendo el asfalto en planta se obtendría un módulo muy alto, y mejores mezclas.

Se debe aclarar que el envejecimiento del asfalto causa que se obtengan mezclas con mala resistencia a la fatiga, puesto que se vuelven muy frágiles y quebradizas, por lo tanto, si hay pérdida de ductilidad en el asfalto, y bajo contenido de asfalto, y muchos vacíos de aire en las mezclas, tendremos mezclas con baja resistencia a la fatiga; independientemente de que su módulo de rigidez pueda ser elevado.

Tal vez el obtener módulos de rigidez elevados por otras metodologías que no le quiten ductilidad al asfalto, como el uso de polímeros o el uso de mezclas con matriz de piedra (SMA) si generen mejor resistencia a la fatiga y por eso es necesario un ensayo de fatiga que determine si la rigidez mayor en una mezcla trae beneficios al desempeño general de la misma o no.

1.2. Descripción del problema

Actualmente se tiene un criterio generalizado de que si se tiene un módulo alto, se tiene una mezcla buena, por lo cual decir que, módulos demasiado altos son perjudiciales, no suele ser bien visto. Se conoce, eso sí, que para evitar deformaciones, hay valores mínimos de módulo que se deben respetar, pero no hay valores tope, por lo cual cuando una mezcla empieza a mostrar módulos muy altos, empieza a ser sospechosa de tener un desempeño a fatiga deficiente. Cabe recalcar que para que la rigidez funcione a beneficio se debe asegurar que se tienen suficiente espesor como para asegurar que no se tendrán deformaciones unitarias muy grandes al fondo de la misma,

por lo cual se asegurara que no se empiecen a desarrollar las grietas a fatiga. Además de eso el aumento de rigidez no debe venir acompañado con una disminución de ductilidad la ductilidad, para que este no sea perjudicial.

1.3. Objetivos

Objetivo General

- Utilizar datos recopilados con anterioridad, en tesis similares para poder lograr diseñar un ensayo, el cual nos permita saber cuándo la mezcla no está resistencia a fatiga, a pesar de que tenga un alto modulo.
- Así mismo se espera obtener por medio de ensayos de fatiga una idea de a qué punto mis muestras tendrán problemas de resistencia a la fatiga. De igual manera, obtener un rango el cual nos permita conocer de módulos aceptables para tener mezclas que tengan un buen desempeño ante la fatiga, cuando las mezclas no han sido tratadas con polímeros.

Objetivo Especifico

- Obtener la deformación unitaria inicial a la cual se puede probar una briqueta en el NAT.
- Definir el número de ciclos que debe soportar una briqueta a la deformación unitaria inicial del ensayo para considerar que esta tiene un buen comportamiento a la flexión.

CAPÍTULO 2: DISTINTAS FALLAS DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

2.1. Ahuellamiento

El ahuellamiento es una de las dos fallas que se producen en pavimentos asfálticos, su característica principal es que la sección transversal de la superficie ya no está en la posición de diseño. Aunque puede tener varias causas como la abrasión, la densificación del tráfico o por una capa subyacente debilitada por la humedad, existen dos causas principales.

En un caso se tiene que si se aplica más cargas repetitivas de las que la subcapa (base o sub-base) puede resistir. Este se lo considera más un problema estructural que un problema del material. Se también se puede dar por capas subyacentes que han sido debilitadas por la intrusión no deseada de la humedad. La Grafica 1-1 muestra como la deformación ocurre en las capas inferiores y no en la capa asfáltica.

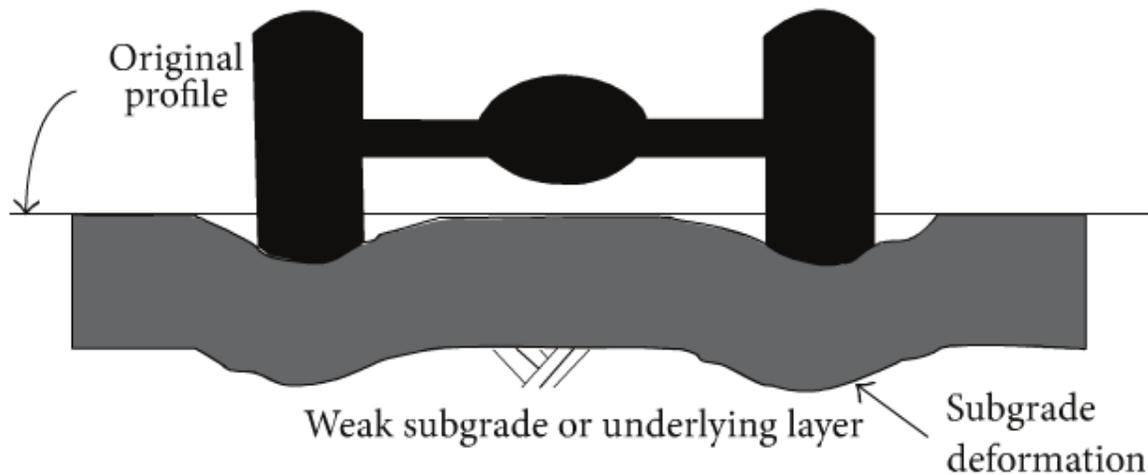
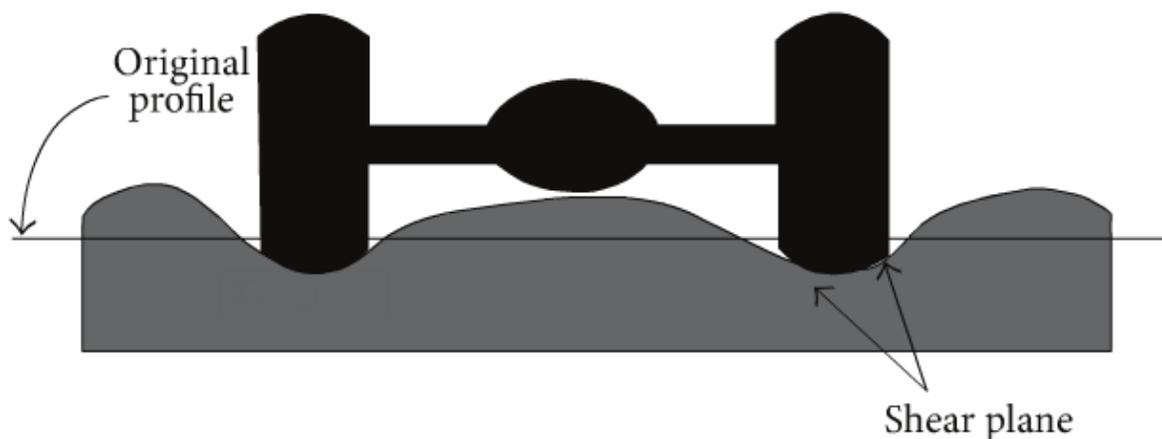


Gráfico 2-1 Ahuellamiento por Sub-base débil. Tomado de: Superpave Mix design

El otro caso concierne a la deformación de la superficie de rodadura asfáltica. Esta tiene que ver con una mezcla diseñada sin la suficiente resistencia a corte, para resistir grandes cargas. Con una mezcla débil, se tendrá acumulación de pequeñas deformaciones plásticas, las cuales son permanentes. Eventualmente se formara un ahuellamiento con la característica de una depresión y un levantamiento de la mezcla, como se muestra en la siguiente figura.



Gráfica 2-1 Ahuellamiento por mezcla débil. Fuente: Superpave Mix design.

Teniendo en cuenta que los problemas de ahuellamiento ocurren en las épocas de verano donde existe una mayor temperatura, se podría pensar que es solo un problema del asfalto, pero para ser más exactos se debería considerar un problema combinado de la resistencia del agregado mineral y el cemento asfáltico.

Este se produce más seguido en mezclas que no tienen un módulo de rigidez alto, como lo tienen las mezclas envejecidas. En las calles de Guayaquil casi no se ha tenido problemas de ahuellamiento en años anteriores, ya que el asfalto usado para producir esos pavimentos tenía un alto envejecimiento en la refinería, evidencia de esto son los núcleos que se suelen obtener en vías de 3 o 4 años de servicio. Estos núcleos tener módulos tan altos como 8000 MPa.



Gráfica 2-3 Ahuellamiento severo de pavimento (tomado de pavementinteractive.org)

Teniendo en cuenta que esta falla se produce por la acumulación de pequeñas deformaciones, una de las soluciones sería la utilización de un cemento asáltico más rígido, el cual se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Bajo las cargas, el asfalto actuaría como un caucho que se deformaría e inmediatamente recobraría su posición cuando se deje de aplicar la carga.

2.2. Fatiga

La fatiga se define como el fenómeno por el cual un material sometido a cargas dinámicas cíclicas, falla más fácilmente que si se le aplica las mismas cargas de manera estática. En los materiales este proceso se lo relaciona con fracturas a largo plazo.

En los pavimentos asfálticos, la fatiga ocurre cuando las cargas aplicadas sobre esfuerzan a los materiales del pavimento causando fisuras. En estados iniciales se presentan fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la capa de rodadura a la altura donde pasan las ruedas de los vehículos. Este proceso sigue progresando hasta

que las fisuras iniciales se empiezan a interconectar, lo que causa más fisuras. En un estado avanzado las fisuras longitudinales estarán conectadas con fisuras transversales, formando algo parecido a escamas. Es por esta razón que a esta falla se la conoce comúnmente como “Piel de cocodrilo”. En casos extremos se forman baches por el desprendimiento de pedazos de asfalto, al paso de vehículos.



Gráfica 2-4 Fatiga severa de pavimento (tomado de pavementinteractive.org)

Usualmente la fatiga es causada por varios factores ocurriendo al mismo tiempo. Desde luego se tiene que tener repeticiones de carga. Capas delgadas o con capas subyacentes muy débiles son propensas a sufrir deflexiones al estar expuestas al paso de los camiones. Deformaciones altas por la continua flexión de la capa asfáltica, crean esfuerzos de tensión horizontal en la parte más baja de esta, lo que lleva a la fatiga. Así mismo, un mal drenaje, problemas de construcción y un diseño insuficiente del pavimento pueden contribuir al problema.

Usualmente la fisura de piel de cocodrilo, es una muestra de que el pavimento ha superado el número de pasadas de diseño, en cuyo caso el pavimento solo requeriría el

mantenimiento planificado. Si la fatiga ocurrió mucho antes del periodo de diseño, entonces es un signo de que las cargas de tráfico fueron subestimadas.

Se ha verificado con varios ensayos de laboratorio que la relación entre la vida a fatiga (representada por N ciclos de carga antes de romperse a fatiga) y la deformación \mathcal{E} , están ligadas por la expresión.

$$N = k_1 \mathcal{E}^{k_2}$$

En esta expresión, N representa el número de ciclos de carga hasta la fatiga al nivel de deformación \mathcal{E} , que es la deformación unitaria de tracción (en micro deformaciones $\mu m / m$) y k_1 y k_2 , son constantes que describen el comportamiento a fatiga del material.

La acumulación de daño causado por la fatiga, D en cada punto a lo largo del pavimento debido al paso del tráfico, se estima mediante la ley de Miner de acumulación lineal de daño.

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{N^i}{N_f^i}$$

Según el Instituto de Asfalto las mejores maneras de superar las fisuras por Fatiga son:

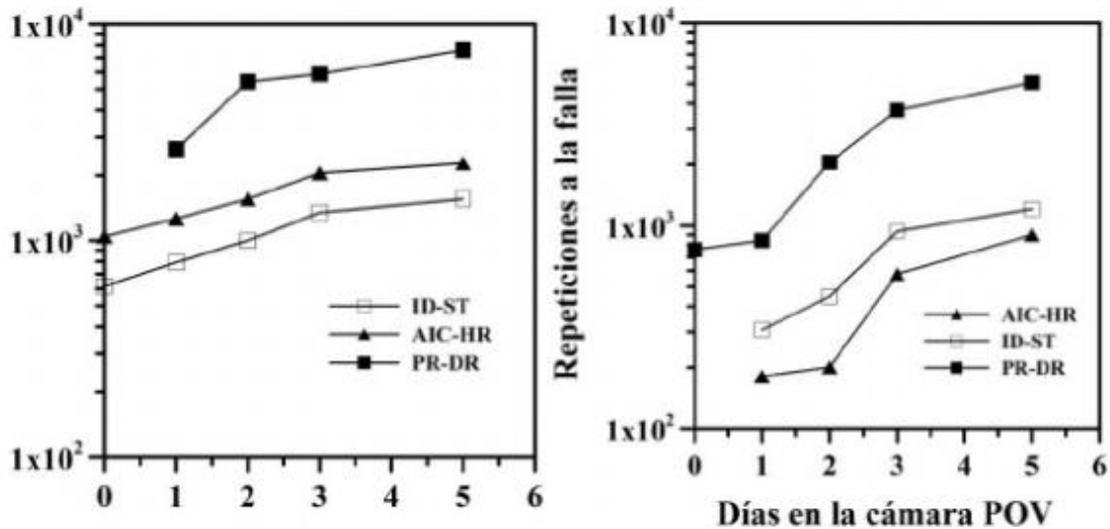
- Un adecuado dimensionamiento del número de pasadas durante la etapa del diseño.
- Uso de mayor espesor de pavimentos.
- Asegurar que la sub rasante este seca.
- Usar un pavimento hecho con materiales cuya resistencia no sea demasiado afectada por la humedad.

- Utilizar mezclas asfálticas calientes (HMA) suficientemente resistentes para soportar las deflexiones normales.

El último punto mencionado, se alcanza estrictamente con un buen diseño y una selección adecuada de materiales. La mezcla asfáltica en caliente (HMA) debe tener la suficiente resistencia a tensión para soportar los esfuerzos en la base de la capa y lo bastante resistente para soportar las cargas del tráfico sin tener fisuras. Se sabe que asfaltos muy rígidos no tienden a comportarse mejor a la fatiga. La mezcla deberá ser diseñada para comportarse como un material elástico cuando sea cargada a tensión, para así evitar la fatiga.

Para evaluar el desempeño a la fatiga de un cemento asfáltico, se usa el criterio de la componente viscosa del módulo complejo $G'' = G^* \sin \delta$ 10 rad/s y a la temperatura media de operación, el cual debe ser máximo 5 MPa (Petersen et al., 1993). Dicha evaluación debe realizarse en un material envejecido a largo plazo, por eso las pruebas en laboratorio se realizan sobre asfaltos envejecidos en el PAV.

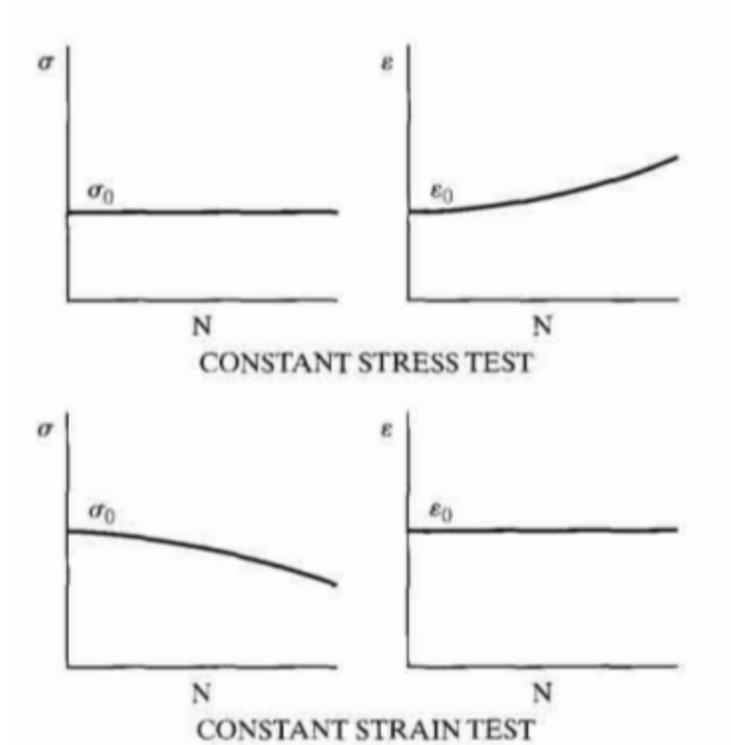
El siguiente cuadro muestra la vida de fatiga de tres muestras asfálticas, envejecidas en la cámara de presión de oxígeno, POV por sus siglas en inglés (Pressure Oven Vessel).



Gráfica 2-5. Vida de fatiga de tres mezclas asfálticas, a) al 88% y b) al 94% de compactación. (Kimet al., 1986).

2.2.1. Ensayo

Se puede controlar el ensayo de fatiga en las mezclas asfálticas de dos formas: Esfuerzo constante y deformación constante (Gráfica 2-6). En el primer caso el esfuerzo se mantiene, mientras que la deformación aumenta con el número de repeticiones. Por otro lado con deformaciones constantes, los esfuerzos van disminuyendo a medida que aumentan el número de repeticiones. Según Huang al., 2002 se utiliza ensayos de esfuerzo constante, para pavimentos con espesores mayores a 6 pulgadas, donde el principal soporte de carga son los componentes. Para pavimento con espesores menores a dos pulgadas, se utiliza el ensayo de deformación constante porque la deformación en la capa asfáltica es gobernada por las capas subyacentes y no es afectada por la disminución en rigidez de la mezcla.



Gráfica 2-6. Dos formas de ensayo de Fatiga: Esfuerzo constante y deformación constante. (Yang H. Huang, 2002)

2.3. Agrietamiento Térmico

El agrietamiento de la capa de rodadura puede producirse por dos situaciones. La primera cuando hay un descenso puntual y drástico de temperatura, el cual rompe la carpeta de asfalto, y la segunda, cuando esta grieta es producida por las repeticiones de carga por cambio de temperatura que terminan con la falla del material, en este caso el asfalto. Este agrietamiento térmico se reconoce fácilmente ya que, las es perpendicular al tráfico y se repiten casi a la misma distancia.



Gráfica 2-7. Ejemplo de agrietamiento por temperatura (Tomada de ASTM.org)

CAPÍTULO 3: FACTORES QUE AFECTAN A LA FATIGA

3.1. Ductilidad

La ductilidad es la propiedad que tiene un material de deformarse (plásticamente) antes de llegar a la ruptura. Esto significa que el material puede ser estirado de manera considerable antes de romperse.

La ductilidad de un cemento asfáltico se mide como la distancia a la que se elongaran dos extremos de una briqueta antes de quebrarse. El test se lo realiza a una velocidad y a una temperatura específica.

La relevancia de las pruebas de ductilidad como método para controlar la calidad del asfalto, ha sido muy discutida ya su naturaleza es muy empírica y es difícil de replicar.

Una mayor ductilidad significara pues un mejor comportamiento ante la Fatiga, con una disminución de aparición de fisuras en el pavimento en servicio. Hay varios estudios que apoyan esto.

Doyle (20) midió la ductilidad del asfalto a 13 C° y observo extenso fisuramiento del pavimento cuando la ductilidad bajaba a 5 centímetros. Halstead (21) demostró que pavimentos que contenían cementos asfálticos con penetraciones del rango aceptable, entre 30 y 50 pero con baja ductilidad, era más factible que su seveciabilidad sea inadecuada con respecto a cementos asfálticos con la misma penetración pero como mayor ductilidad.

En el proyecto Zaca-Wigmore, Hveem et al (22) se encontró bastante evidencia, sobre que la prueba de ductilidad en asfaltos recuperados en pavimentos durante su vida de servicio, es un método importante para juzgar el desempeño del pavimento.

Serafin (23) reviso los datos de núcleos tomados después de 7 años de servicio en el *Michigan Bituminous Experimental Road* y reportó que la sección que contenía la

ductilidad más baja, tenía más fisuras, aunque los valores de penetración no variaban mucho.



Gráfica 3-1. Ensayo ASTM D113 de ductilidad, en el cemento asfáltico. Fuente: <http://www.abc.gob.bo/Ensayos>

3.2. Envejecimiento

El proceso del envejecimiento del asfalto es uno de los factores que contribuye en la reducción de la vida útil de las mezclas asfálticas. Es un fenómeno muy complejo el cual es causado por variables que pueden ser intrínsecas o sea características propias de la mezcla como: el asfalto, el contenido de vacíos, los agregados y la película asfáltica que los recubre. Así mismo hay variables extrínsecas las cuales son la humedad, la radiación UV (Ultra violeta), la temperatura de producción de la mezcla y la temperatura ambiente.

Los mecanismos que forman parte de este proceso se relacionan, con cambios de orden, físico, químico, reológico y mecánico. Generalmente las alteraciones químicas

como la polimerización, la oxidación y la volatilización producen un reacomodo de la estructura molecular del asfalto y la manifestación de respuesta a estos conlleva a un endurecimiento de la mezcla que lentamente se convierte en un material frágil, el cual tiende a agrietarse. Al aparecer las primeras grietas se inicia un proceso de ingreso de vapor y de agua al interior del pavimento, lo que lleva a daños por humedad y pérdida de cohesión afectando así al desempeño de la mezcla asfáltica.

3.2. Fenómeno

Se puede dividir en fenómeno del envejecimiento en dos: Envejecimiento a corto y largo plazo. El envejecimiento a corto plazo es el que se produce en la producción, transporte y almacenamiento de la mezcla y es un envejecimiento muy rápido y agresivo por las altas temperaturas en planta y por el mayor contacto con el oxígeno del ambiente que favorece la pérdida de componentes volátiles. Por otro lado el envejecimiento a largo plazo es un proceso lento, ya que hay una menor temperatura en el pavimento en comparación al momento de la producción y además al estar la mezcla ya compactada la oxidación solo ocurren en la superficie.

Aunque se pueda conocer las cantidades volumétricas, así como las propiedades de cada material, gracias a los métodos de diseño, no se puede concluir que el envejecimiento del asfalto o de los agregados predice el envejecimiento de la mezcla. Es así que varios investigadores que han estudiado los efectos del fenómeno del envejecimiento sobre asfaltos tanto modificados como convencionales y se ha establecido que la radiación ultravioleta, la humedad, la temperatura y la presión generan procesos de oxidación que producen envejecimiento de los materiales (Traxler, 1963; Vallerga, 1981).

Por otro lado, otros estudios concluyen que cambios en las propiedades físicas, químicas y geológicas dependen directamente de los materiales con los que está compuesta la mezcla, y las condiciones de exposición a las condiciones ambientales y el tiempo. (Abbas *et al.*, 2002; Lauet *et al.*, 1992; Lee, 1973)

En conclusión para entender mejor el envejecimiento se requiere por una parte el análisis de las variables intrínsecas de las mezclas, los agregados, los vacíos, el asfalto y el espesor de la película y por otra las variables extrínsecas, tales como el viento, las cargas de tránsito, la radiación, humedad relativa del ambiente y el tiempo de servicio.

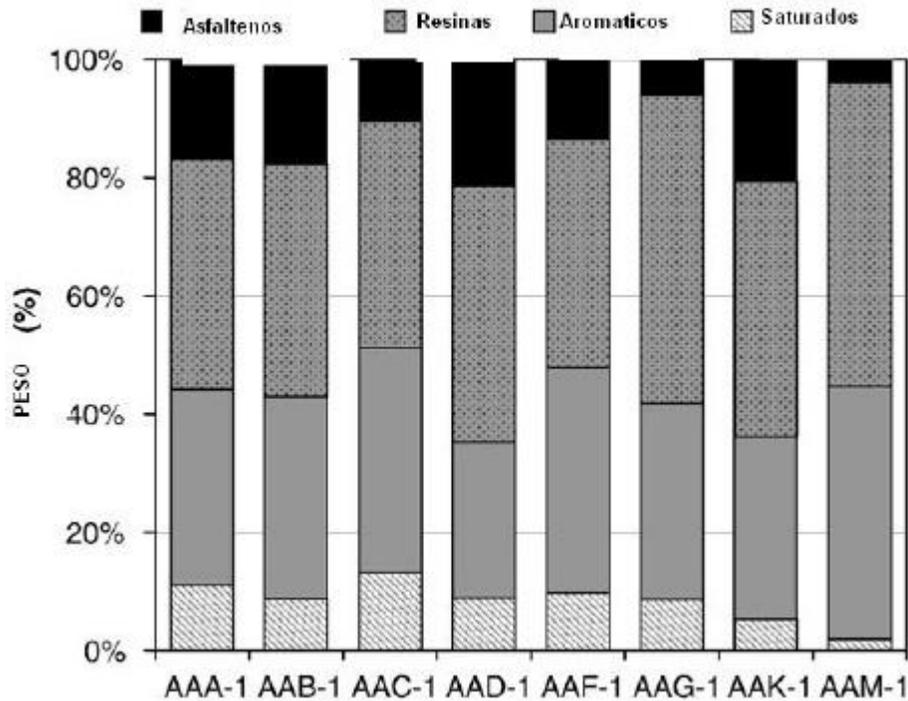
3.3.1. Variables intrínsecas

3.3.1.1. Asfalto

El asfalto es un material derivado del petróleo, el cual tiene una composición química que es bastante compleja, y es de esta composición química de la cual se derivan las propiedades físicas de la mezcla. En este trabajo se usará el modelo coloidal en el cual las partículas sólidas conocidas como asfáltenos, están dispersas en una matriz líquida aceitosa (los maltenos). El fraccionamiento que propuso Corbett en 1908 mediante una elución-absorción en una columna de cromatografía líquida en alúmina activa con solventes que incrementaron la polaridad y la aromaticidad. Es así que se puede separar el asfalto en cuatro fraccionamientos que son: los saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos, Estas cuatro fracciones relativas se las denomina SARA, y podemos ver un ejemplo en la (figura N.-1)

Según Corbett (1970) cada fracción tiene una funcionalidad con respecto a las propiedades físicas del asfalto. Es así que los asfáltenos tienen función de espesantes,

mientras que la fluidez está dada por los aromáticos y los saturados; las resinas dan ductilidad a los asfaltos. Los asfáltenos en combinación con los aromáticos y los saturados producen en el asfalto condiciones de flujo.



Gráfica 3-2. Separación en fracciones SARA para algunos asfaltos (Mortazavi & Moulthrop, 1993)

Es importante tener esto en claro ya que las alteraciones químicas que se producen, se evidencian en los cambios que ocurren en estas fracciones. El envejecimiento en particular produce una reducción en el contenido de aromáticos y un aumento en las resinas, lo que a su vez incrementa los asfáltenos (Petersen, 2009; Qi & Wang, 2003, 2004a, 2004b; Siddiqui & Ali, 1999a, 1999b; Farcas, 1996; Petersen, 1984).

3.3.1.2 La película de asfalto

La película de asfalto que recubre a los agregados es del orden de los 15 a 20 micrones (Petersen, 1989) y se recomienda que el espesor mínimo sea de 6 a 8 micrones. Un adecuado espesor de película de asfalto asegura una durabilidad razonable de la mezcla asfáltica. Esta película es la que se envejece y consecuentemente se endurece. Esta es la razón por lo cual los ensayos de envejecimiento se hacen en una película delgada de 3 mm.

3.3.1.3 Agregados

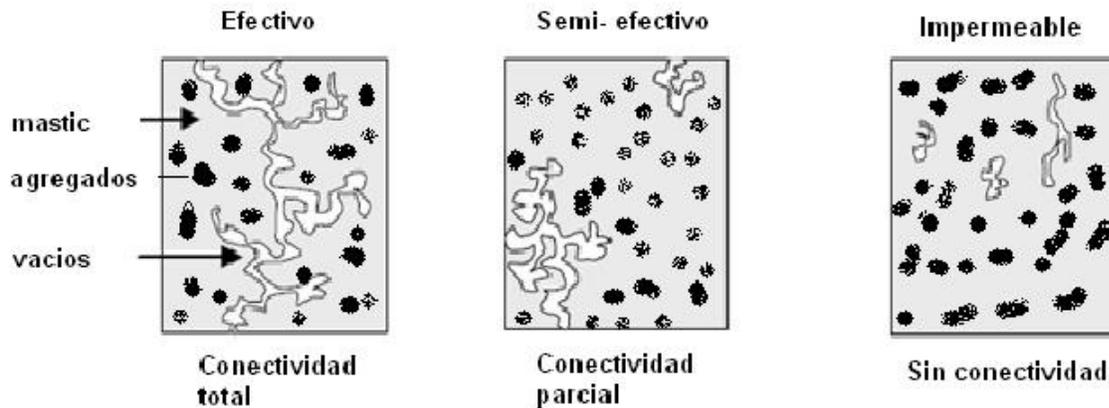
No hay mucha evidencia científica sobre la participación de los agregados en los fenómenos de envejecimiento, de hecho siempre se los ha considerados como materiales inertes, que al mezclarse con otros materiales, no son objeto de reacciones químicas que puedan cambiar su composición.

El llenado mineral o “filler”, es un material que es pasante del tamiz N° 200 que cuando se combina el asfalto forma un sistema el cual se lo denomina “mastic”, el cual forma una capa más gruesa, la cual mejora la adherencia, mejora la fluidez, y de igual manera la lámina que recubre los agregados es de mayor espesor. El uso del filler mejora la resistencia al envejecimiento y mejora la durabilidad.

3.3.1.4 Contenido de vacíos con Aire

El tamaño y la distribución de los vacíos con aire en las mezclas asfálticas dependen de las propiedades de los agregados, el diseño de la mezcla y el proceso de compactación. (Chen et al.,2004)

Los contenidos de aire en las mezclas se los clasificó como: efectivo, Semi-efectivo, Impermeable.



Gráfica 3-3. Clasificación de los vacíos en las mezclas asfálticas (adaptado de Chen et al. 2004)

Se debe tener un equilibrio en el contenido de vacíos dentro de una mezcla, ya que la ausencia de ellos crea problemas de ahuellamiento y exudación y vacíos excesivos generan un pavimento muy permeable que es más susceptible al paso de agua y vapor, por lo tanto habrá mayor oxidación lo que se traduce en que se tendrá problemas de envejecimiento.

En si la función de los vacíos es generar espacios a los cuales la mezcla pueda fluir en el momento que haya acción del tráfico o que se produzca un incremento de la temperatura ambiente.

Según las normas SuperPave valores de un 8% y más, nos darán mezclas muy permeables, mientras que valores de 3% son los que se espera tener al final de la vida útil del pavimento, menos que eso nos traerá problemas de estabilidad y exudación.

3.3.2. Variables extrínsecas

3.3.2.1. Temperatura

La mezcla asfáltica está expuesta a dos rangos de temperaturas durante su vida de servicio: Uno tiene que ver con el proceso de mezclado, almacenamiento y construcción donde ocurre el envejecimiento a corto plazo y la otra con la temperatura de operación (temperatura del asfalto no del ambiente), durante toda su vida útil, por la cual ocurre el envejecimiento a largo plazo.

En la producción el asfalto está sometido a temperaturas que varían de entre 150 °C a 170 °C, en este ambiente ocurre la volatilización del asfalto lo que conlleva a alguna pérdida de masa y adicionalmente ocurre la polimerización de pequeñas moléculas.

La volatilización inicia a una temperatura de 150°C. Este proceso ocurre por la evaporación de los componentes aromáticos y siempre está acompañada de reacciones de oxidación, las cuales aportan al incremento de la rigidez. (Swiertz, 2010)

Dessouky et al., (2011) encontró que si se maneja el asfalto a temperaturas cercanas a 290°F se tiene menor envejecimiento que si se manejan a temperaturas cercanas a 365°F, lo que hace quedar claro que las temperaturas que se manejen en planta afectaran el envejecimiento de la mezcla.

3.3.2.2. Humedad

La humedad es uno de los factores que afecta en mayor medida al desempeño de pavimento asfáltico ya que la presencia de esta, tanto en forma de vapor como líquida, permite una degradación de las propiedades mecánicas del material. (Caro *et al.*, 2008).

Se sabe pues que el envejecimiento depende de varios factores y que un pavimento, que sufre de humedad, mal drenaje y un alto porcentaje de vacíos, favorecerá al envejecimiento por oxidación, ya que el bitumen tiene un mayor contacto con el agua, pero además de esto la humedad genera una pérdida de adherencia entre los agregados y el cemento asfáltico, y a su vez una pérdida de cohesión de este último. Este proceso es conocido como “stripping”.

En consecuencia a lo antes mencionado el stripping afecta el desempeño de la carpeta asfáltica con respecto a la resistencia a tensión y a su módulo dinámico (Hammons et al. 2006). Gracias a inspecciones de campo se sabe que el stripping comienza a afectar al pavimento desde el fondo de la capa y trabaja hacia arriba atacando en mayor medida al agregado grueso (Taylor & Khosla, 1983)

3.3.2.3. Radiación UV

La radiación solar ultravioleta es una parte de la energía radiante del sol, y esta se transmite en forma de ondas electromagnéticas en cantidad casi constante.

En el cemento asfáltico la radiación ultravioleta puede cambiar la estructura molecular del mismo y además alterar la susceptibilidad del agua o acelerar los procesos de envejecimiento térmico de la mezcla. (Cortes et al., 2010)

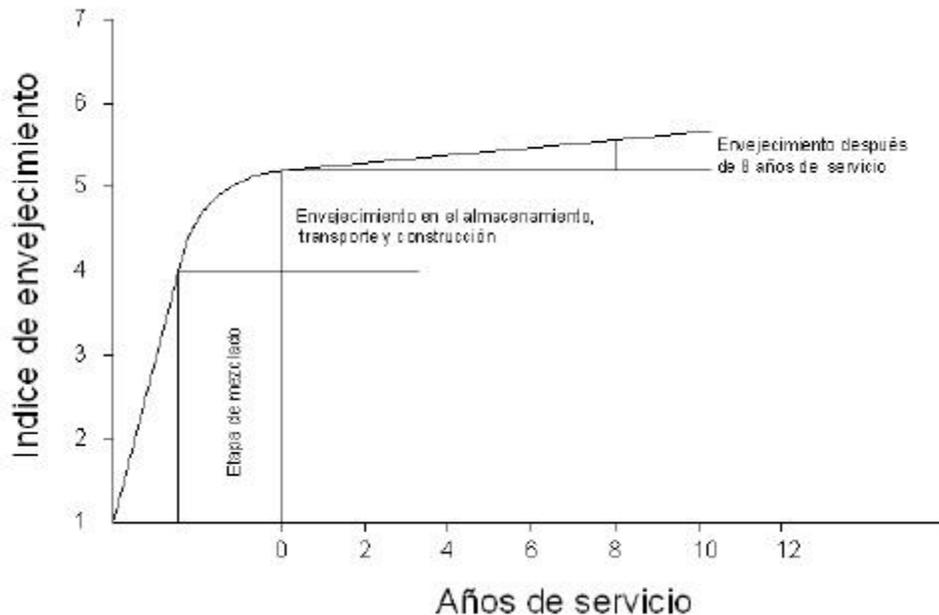
Esto sucede ya que tres mecanismos de envejecimiento se pueden dar al mismo tiempo, oxidación, volatilización y polimerización. Cuando la radiación alcanza el material, hay moléculas que experimentan niveles altos de energía, así mismo puede ocurrir la degradación molecular. Al romperse las cadenas de carbono-carbono y combinarse con el aire se produce la oxidación, así mismo la degradación puede llevar a la pérdida de materiales livianos, conocida como volatilización. Adicionalmente como resultado de la degradación puede presentarse formación de radicales libres y esto puede influir en la formación de nuevas moléculas al combinarse (polimerización). En

con secuencia a todos estos procesos tenemos un endurecimiento superficial de a capa de rodadura, la fragilidad de la misma y la aparición de grietas (Montepara et al, 1996).

3.3.2.4. Tiempo de exposición

El tiempo de exposición es la variable que ha sido un poco esquivada para analizar para los investigadores, se ha intentado predecirla en diferentes pruebas y ensayos de laboratorio. Lo que se busca es el tiempo de duración de una prueba que sea equivalente al envejecimiento producido a corto plazo, y el tiempo de duración que sea equivalente al envejecimiento a largo plazo. El proyecto SHRP (Strategic Highway Research Program 1987-1993) determinó que el efecto producido por el RTFOT durante 85 minutos y a 163°C equivaldría al envejecimiento a corto plazo, Mientras que el residuo de esta prueba sometido a un vaso de presión PAV durante 20 horas a 100°C y 2,07 MPa de presión equivaldría aproximadamente a 8 años de envejecimiento a largo plazo en servicio del pavimento asfáltico. (Bahia & Anderson, 1995; Bahia *et al.*, 1999; Bahia *et al.*, 1998).

En el cuadro de abajo podemos observar como el envejecimiento a corto plazo, el cual se produce en el momento de la mezcla, transporte y almacenamiento, se caracteriza porque la volatilización y la oxidación en esta etapa se experimentan de una manera rápida. Esto se ve claramente en la pendiente alta que presenta la curva al principio. El proceso de envejecimiento a largo plazo se nota que es más lento con una pendiente más acostada, esto se debe a que después de la compactación solo las moléculas superficiales del pavimento reaccionan con el ambiente.

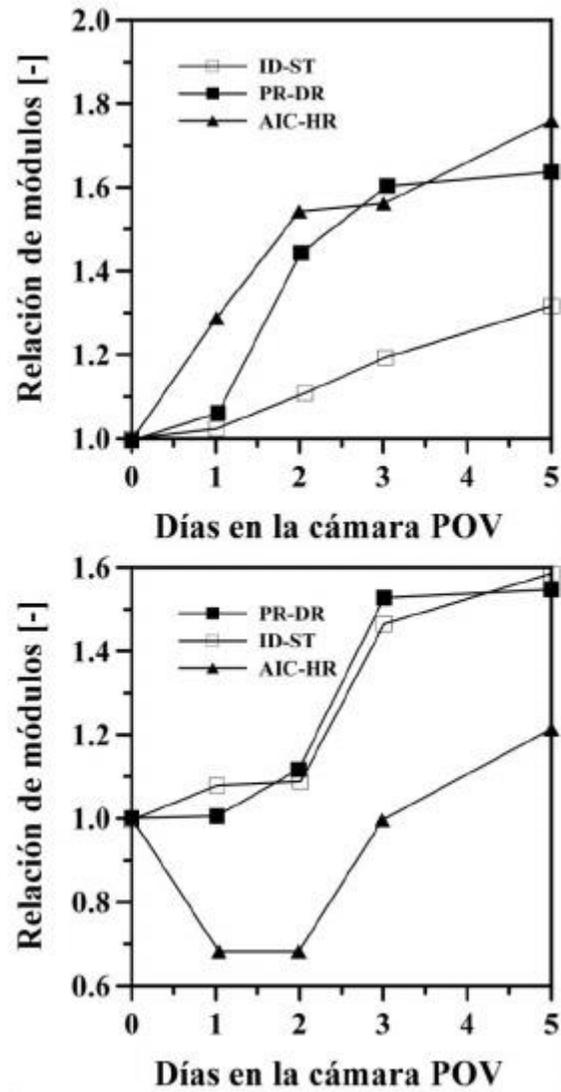


Gráfica 3-4. Etapas en el proceso de envejecimiento (Read & Whiteoak, 2003)

3.4. Módulos

Es bastante aceptado que un módulo muy bajo será evidencia de una mezcla muy flexible o blanda (con tendencia a ahuellarse), por lo cual siempre se busca mantener valores mínimos. Por el contrario valores muy altos darán una mezcla rígida que tendrán como consecuencia una influencia negativa a la resistencia a la fatiga. Una de las causas de incremento en los módulos es el envejecimiento.

Según los reportes de varios investigadores, dependiendo del volumen de vacíos de las mezclas, la relación de módulos antes y después del envejecimiento fue de hasta 5 veces. (C. Bell et al., 1991; Kim, Bell, Wilson, & Boyle, 1987; H. L. Von Quintus et al., 1991).



δ

Gráfica 3-5. Relación de módulos de envejecimiento para tres mezclas asfálticas, a) al 88% y b) 94% de compactación (Kim et al. 1987).

CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE PARAMETROS

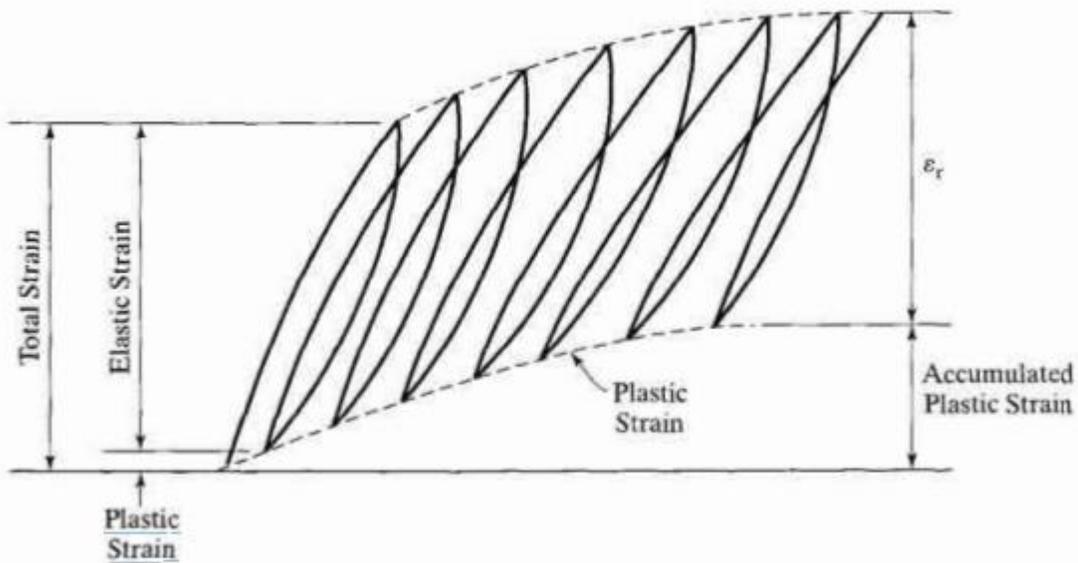
4.1. Módulo Resiliente

El módulo resiliente es el modulo elástico utilizado en la teoría elástica. Se sabe que la mayoría de pavimentos no son elásticos sino que experimentas pequeñas deformaciones permanentes con el paso de las cargas, pero ya que la carga es muy pequeña comparada con la resistencia del material, la deformación en cada repetición de carga se recupera casi completamente, por lo que se puede considerar elástica.

El módulo elástico basado en tensión recuperable bajo cargas repetitivas, se llama módulo Resiliente M_r definido como:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde σ_d es el esfuerzo desviador, el cual es el esfuerzo axial en una prueba de compresión simple, o el esfuerzo axial en exceso de la presión de confinamiento, en una prueba de compresión triaxial, y ϵ_r es la deformación unitaria resiliente



Gráfica

4-1. Deformaciones bajo cargas repetitivas (Yang H. Huang)

4.1.1. Ensayo

El módulo resiliente en mezclas asfálticas puede ser determinado por cargas repetidas en la prueba de tracción indirecta (IDT). En el laboratorio de pavimentos de la UCSG, se tiene el equipo NAT, el cual hace este tipo de ensayos, los cuales consisten en aplicar cargas de compresión en forma de pulsos en un plano vertical diametral, de un espécimen cilíndrico y los resultados horizontales de deformación recuperada son medidos. El módulo resiliente se lo calcula de la siguiente manera.

$$M_R = \frac{P(v+0.2734)}{\delta t}$$

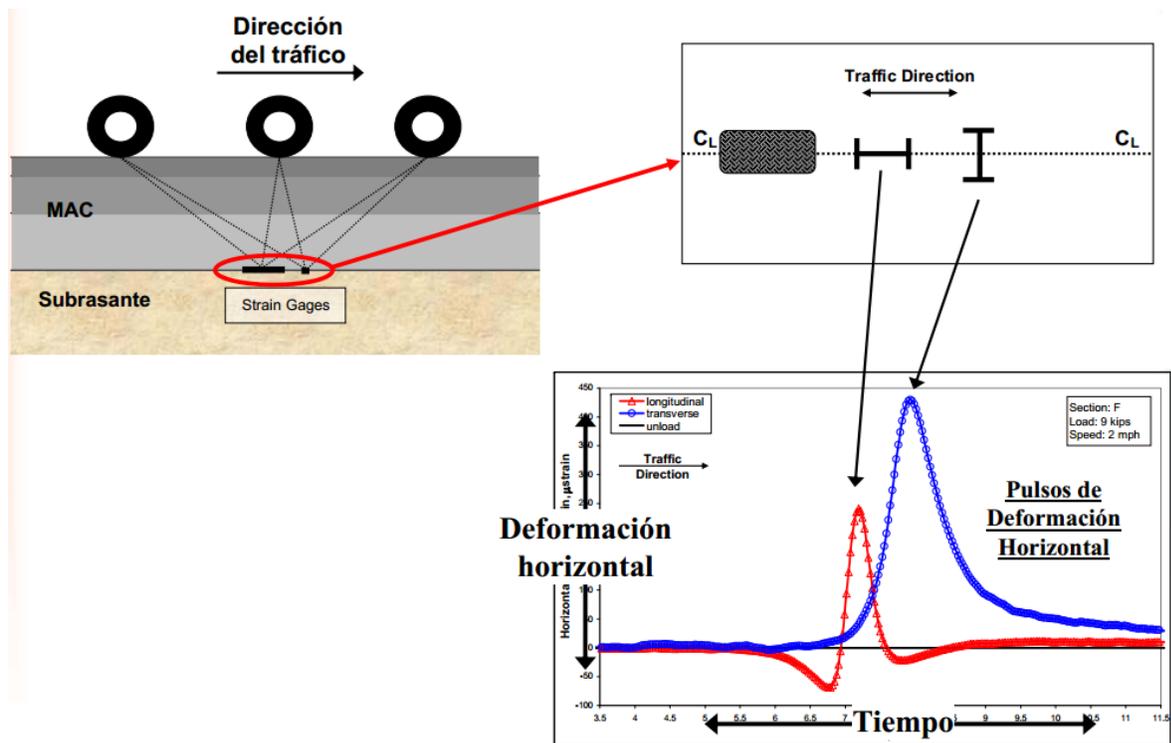
Donde P es la magnitud de la carga dinámica en libras, v es la relación de Poisson (Usualmente se usa 0,35), y δ es la deformación total recuperada en pulgadas, t es el espesor del espécimen en pulgadas.

4.2. Módulo dinámico complejo

Para diseños de pavimentos flexibles, mayoritariamente se basa en la teoría elástica de capas, la cual requiere de dos parámetros elásticos para caracterizar cada material.

- Modulo elástico (rigidez), E
- Razón de Poisson, ν

El modulo dinámico $|E^*|$ es un parámetro que recrea la rigidez de la capa asfáltica en el momento que pasa una rueda de carga. Esto se asemeja a una carga de pulso, ya que cuando está a una distancia considerable, del punto a estudiar, la deformación se considera nula, en cambio cuando se sitúa la rueda encima de este, la deformación es máxima.



Gráfica 4-2. Deformaciones longitudinales y transversales, al fondo de una capa asfáltica. Fuente: Seminario de Recapeo, PH.D Gabriel García S, junio 2012.

La única diferencia del módulo resiliente con el módulo complejo, es que en el primero se usan de cargas, con un periodo de descanso entre ellas, mientras que en el otro se usan cargas sinusoidales o “harvesine waveform” sin periodo de descanso. El modulo complejo es uno de los varios métodos que describe la relación Esfuerzo-Deformación de los materiales visco elásticos. El modulo es un número complejo en el cual la parte real representa la rigidez elástica y la parte imaginaria caracteriza el amortiguamiento interno de los materiales. (Yang H. Huang, 2002).

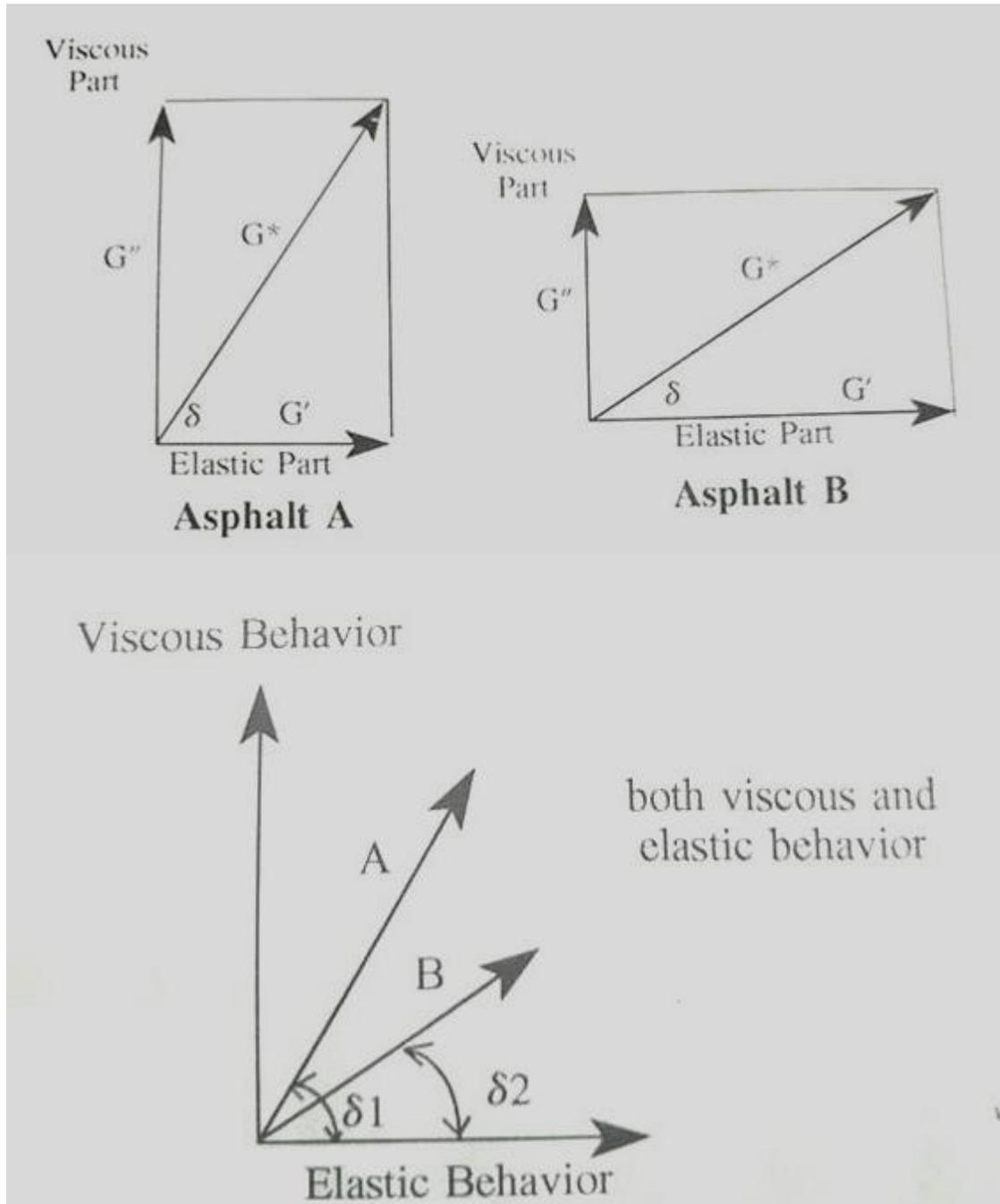
Cuando se aplican cagas a los materiales visco elástico, parte de la deformación es elástica y parte viscosa (no recuperable). El DSR (Dynamic shear rheometer) da una imagen completa midiendo el parámetro G^* y el ángulo de fase δ .

G^* consta de dos partes; el módulo de almacenamiento de energía G' , o parte elástica, y el módulo de perdida G'' o parte viscosa, no recuperable.

El módulo de almacenamiento de energía se refiere a la energía almacenada en la muestra durante cada ciclo de la prueba. La componente viscosa o módulo de pérdida, se refiere a la energía perdida con cada ciclo a través de la deformación permanente.

En la Gráfica 4-3 se muestra como es necesario la medición del ángulo de fase para tener una clara idea del comportamiento del asfalto. Dos asfaltos con el mismo G^* pueden tener diferentes comportamientos al tener diferente ángulo de fase.

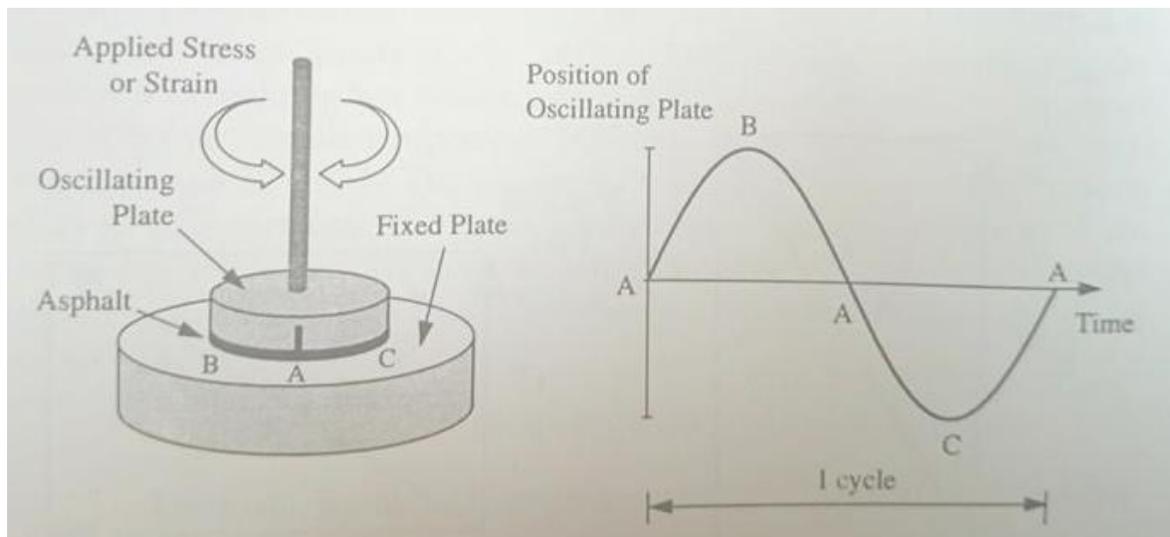
El modulo G^* del asfalto A, tiene una parte elástica mayor a la del asfalto B. Esto significara que cuando este asfalto sea cargado mostrara más deformación elástica (recuperable) y menos deformación viscosa o no recuperable (permanente) comparada con el asfalto A.



Gráfica 4-3. Dos asfaltos con el mismo G^* pero con diferente ángulo de fase. Fuente: (Hot Mix Asphalt Materials, Mixture design and construction.)

4.2.1. Ensayo

Para obtener el modulo G^* se utiliza del DSR (Dynamic Shear Rheometer) cuyo principio es muy simple. El procedimiento esta normado por AASHYO TP5. Según como se muestra en la Gráfica 4-4, la muestra asfáltica está confinada entre una placa rígida y otra oscilante. Cuando se aplica un torque a la placa oscilante, esta se empieza a mover del punto A hasta el punto B. Del punto B, la placa regresa hasta el punto C, pasando por el punto A. Del punto regresa al punto A. Esto se toma como un ciclo de oscilación. La frecuencia de oscilación se puede expresar en Hertz (número de oscilaciones por cada segundo), o en radianes. Los ensayos DSR se conducen a 10 radianes por segundo lo que equivale a 1,59Hz.



Gráfi

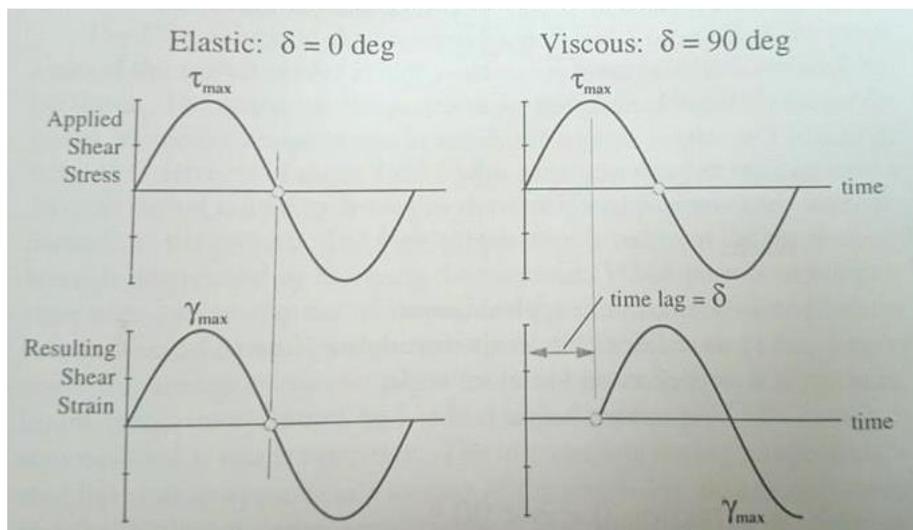
ca 4-4. Caracterización básica del reómetro dinámico de corte.

Se pueden realizar dos tipos de pruebas, en el reómetro, estas son: carga constante y deformación constante. Los reómetros de carga constantes usan un solo torque durante el ensayo, por lo cual la deformación unitaria es la que cambia de forma ascendente; Por otro lado los reómetros de deformación constante tienen placas ajustadas para

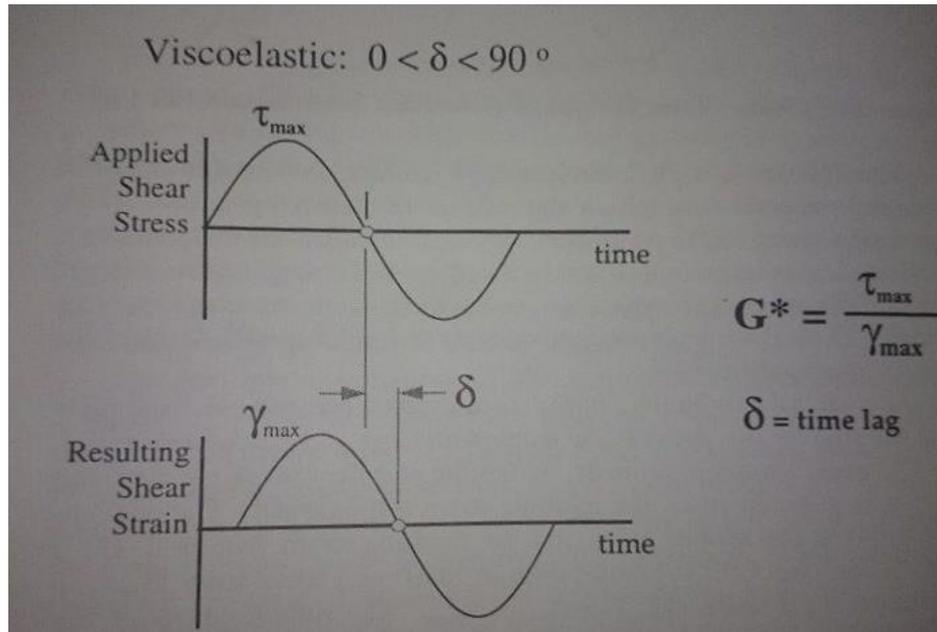
moverse hasta cierta deformación por lo cual la carga va a variar de forma descendente. El tiempo de desfase entre la aplicación de la carga y la deformación resultante se conoce como ángulo δ

La Gráfica 4-5 muestra dos resultados de ensayos de reómetro realizados a un material elástico y un material totalmente viscoso. Para un material elástico perfecto hay una respuesta inmediata y por lo tanto el tiempo entre la aplicación de la carga y la deformación resultante es cero, por lo que se tiene un ángulo δ igual a cero. Cuando se realiza este ensayo a un material viscoso como lo puede ser el asfalto caliente, el lapso de tiempo entre la aplicación de la carga y la deformación es mayor y el ángulo de fase δ se aproxima a los 90 grados.

Para el caso de las mezclas asfálticas, la respuesta de será la de un material con propiedades intermedias. En la gráfica 4-6 se muestra el diagrama Esfuerzo-Deformación donde se ve que el ángulo de fases está entre los valores de 0 y 90 grados.



Gráfica 4-5. Resultados de Esfuerzo y deformación obtenidos en un reómetro de esfuerzo constante. (Obtenido de Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction)



Gráfica 4-6. Respuesta de Esfuerzo-Deformación de un material visco elástico. (Obtenido de Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design ans Construction)

4.3. Propiedades volumétricas

Un factor que se debe tomar en consideración cuando se estudia el comportamiento de una mezcla de asfalto caliente, son las propiedades o proporciones volumétricas.

Las propiedades volumétricas son:

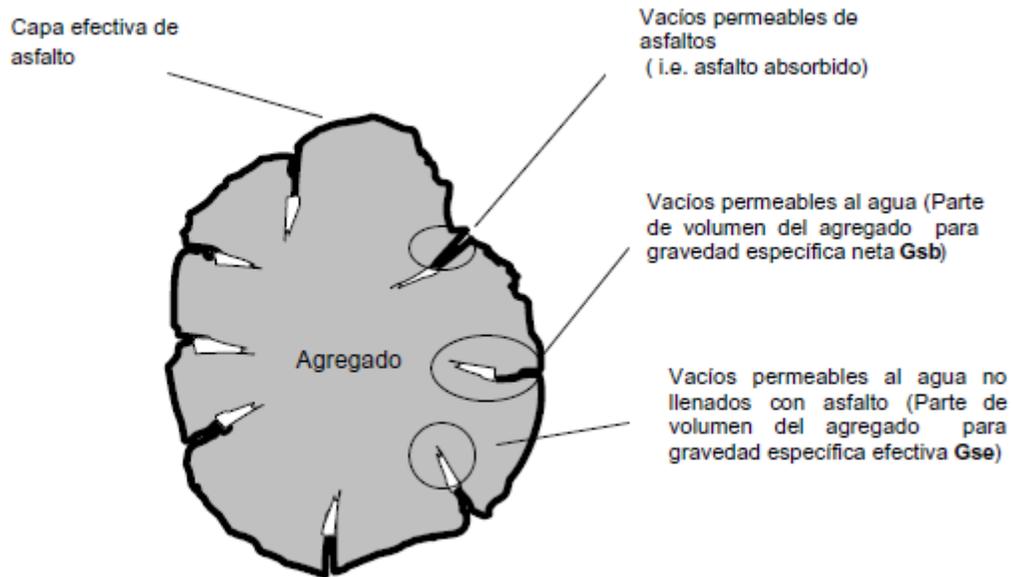
- Densidad de a mezcla
- Vacíos de aire, V_a .
- Vacíos en el agregado minera, V_{ma}
- Vacíos llenos de asfalto, V_{fa}
- Contenido de asfalto, P_b .

Los agregados son porosos y por lo tanto pueden absorber agua y asfalto a un grado variable. Por esto se han desarrollado tres métodos para medir la gravedad específica del agregado considerando las distintas variaciones, estos métodos se definen a continuación.

Gravedad Específica Bulk, Gsb.- Es la proporción de la masa de aire en una unidad de volumen de un material permeable (que incluye los vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a la masa de aire de igual densidad de agua destilada de igual volumen a una temperatura indicada.

Gravedad Específica Aparente, Gsa.- Es la proporción de aire por unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada con respecto a una masa de aire de igual densidad a un volumen igual de agua destilada a una temperatura indicada.

Gravedad Específica Efectiva, Gse.- Es la proporción de la masa de aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo los vacíos permeables al asfalto) a una temperatura indicada de una masa de aire de igual densidad, de un mismo volumen de agua destilada a una temperatura indicada.



**Gráfica 4-7 Ilustración de los parámetros del diseño volumétrico
Tomado de Superpave Design**

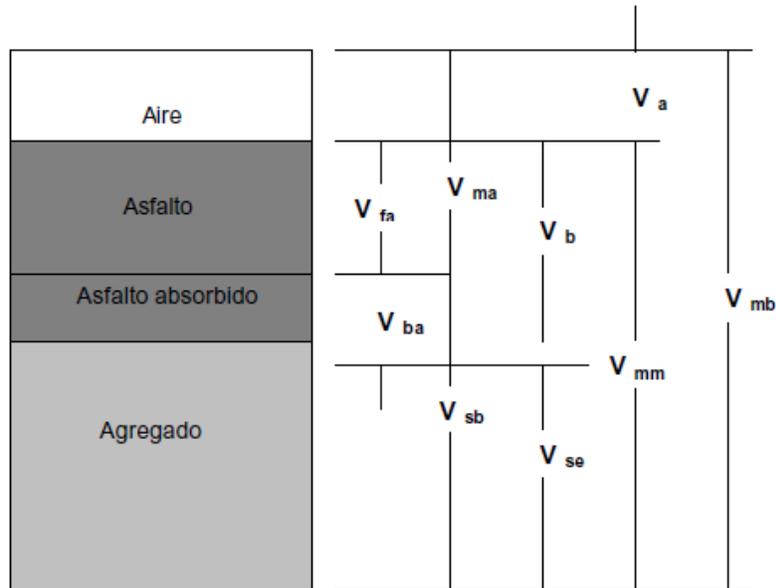
A continuación se definen los términos Vacíos del agregado mineral (VMA), contenido de asfalto efectivo (Pbe), vacíos de aire (V_a), y vacíos llenos de asfalto (VFA).

Vacíos del agregado mineral, VMA.- el volumen de vacíos inter granulares, entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada que incluyen los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, expresado como porcentaje del volumen total de la muestra.

Contenido efectivo de asfalto, Pbe.- El contenido total de asfalto de una mezcla menos la proporción de asfalto absorbido por los vacíos del agregado mineral.

Vacíos de aire, V_a .- El volumen total de los pequeños espacios de aire entre las partículas del agregado mineral, obtenidos en una mezcla compactada, la que se expresa en volumen bulk de la mezcla.

Vacíos llenado con asfalto, VFA. - Es una parte del porcentaje de volumen de los vacíos de aire intergranular en las partículas del agregado mineral que están ocupadas por asfalto efectivo. Se expresa a razón de VMA ($VMA - V_a$).



- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica.
- V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
- V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Gráfica 4-8. Ilustración de los volúmenes de los diferentes componentes del asfalto. Tomado de Superpave Design.

CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE LA PROBLEMÁTICA

5.1 Introducción

Se sabe que las fisuras a fatiga, son uno de los mayores problemas para los pavimentos hechos con mezclas asfálticas en caliente, por esta razón el estudio de este fenómeno es de vital importancia si queremos mejorar de sobre manera la calidad de las vías.

En cuanto a control de calidad, todavía no hay una prueba simplificada que nos permita predecir el comportamiento a la fatiga de nuestra mezcla. Los estudios de Fatiga, nos permiten de alguna manera conocer cómo podría ser el comportamiento de nuestra mezcla ya puesta en obra, pero estos ensayos no solo son de amplia duración, sino que los equipos para realizarlos son caros y no muy comunes en el medio.

Un factor de control para las fisuras a fatiga es la magnitud de la deformación a tensión al fondo de una capa de asfalto. Es bien sabido que disminuir esta deformación por tensión resulta en un incremento en la vida del pavimento a Fatiga. Se cree también que existe un valor de resistencia ilimitada (Endurance Limit) y que mantener la deformación a tensión por debajo de ese límite le dará al pavimento una resistencia ilimitada a la Fatiga. Entonces el “Endurance” se entendería como el valor de esfuerzo para el cual un número ilimitado de repeticiones no hará que ocurra una falla por Fatiga.

5.2. Desarrollo

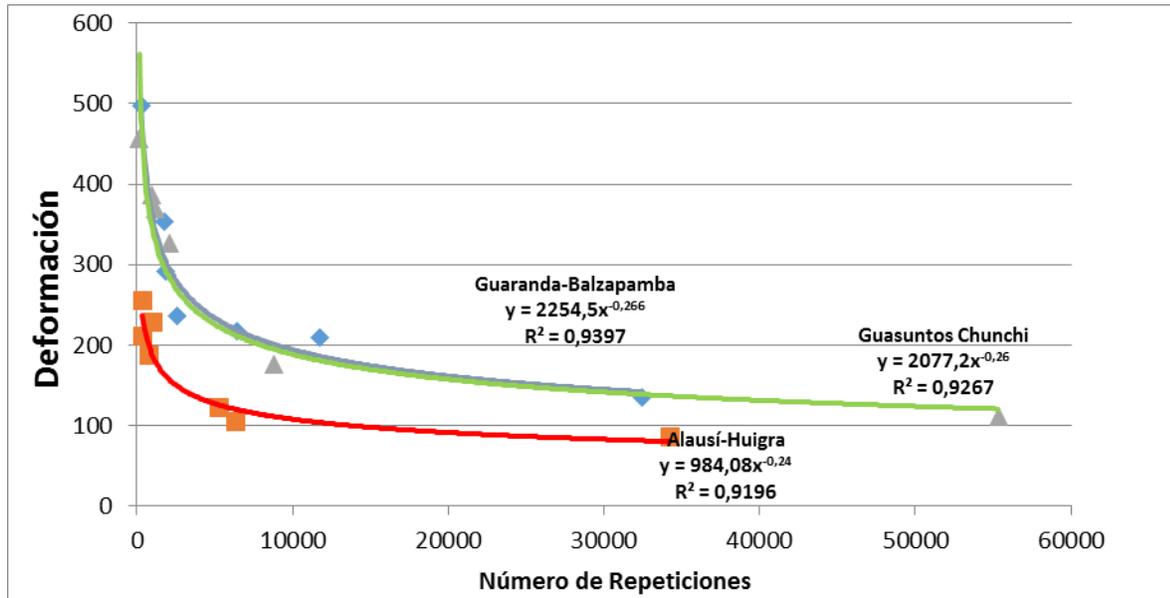
En la UCSG previamente ya se habían realizado trabajos concernientes a pruebas de desempeño en varias carreteras de diferentes regiones del país. De estos trabajos de titulación se obtuvieron los datos de las Leyes de Fatiga y se procedió a la tabulación de los mismos.

Los trabajos de los cuales se obtuvo los datos fueron los siguientes: Katheryn Nuñez, “Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región sierra del Ecuador mediante pruebas de desempeño”, Andrés Andaluz “Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región costa del Ecuador mediante pruebas de desempeño” y Gelo Cardenas, “Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región amazónica del Ecuador mediante pruebas de desempeño”.

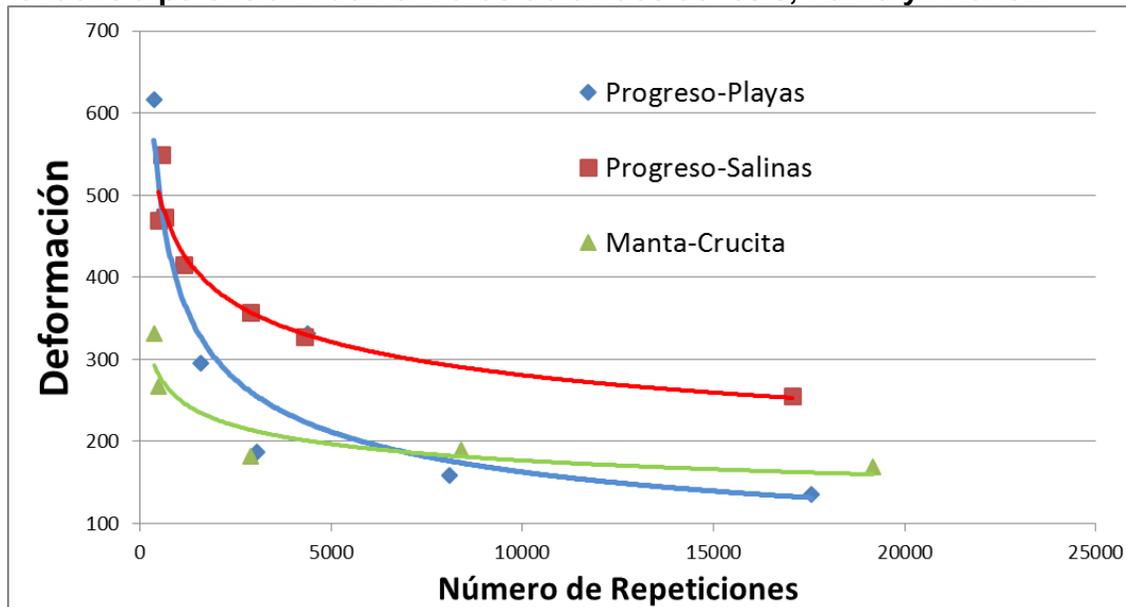
Lo que se hizo se hizo fue escoger tres carreteras por cada una de las tres regiones analizadas; El estado de estas tres carreteras era de: bueno, regular y malo respectivamente. Después a estas se le realizó varias pruebas de desempeño.

Usualmente las leyes de fatiga se las grafica en escala logarítmica, pero para nuestro análisis se usó una escala normal (no logarítmica), por lo cual las líneas de tendencia en vez de ser rectas se representaban mejor por una ecuación logarítmica o por una potencial.

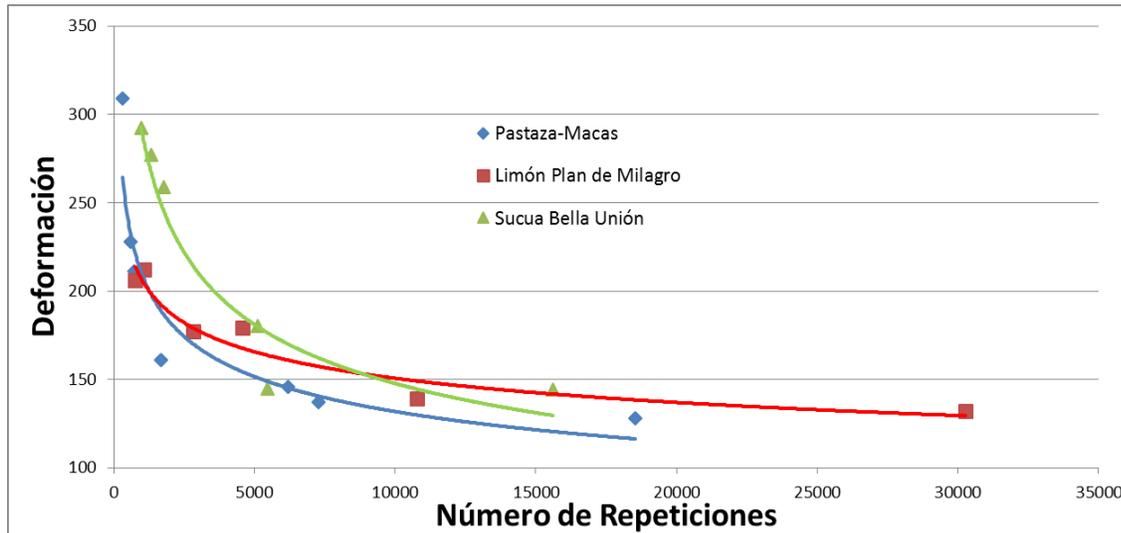
A continuación se muestran las leyes de fatiga obtenidas en las tres regiones del país, en tres carreteras.



Gráfica 5-1. Ley de fatiga dibujada en una escala no-logarítmica y con una línea de tendencia potencial. Fuente: Datos obtenidos de tesis, Katheryn Nuñez.



Gráfica 5-2. Ley de fatiga dibujada en una escala no-logarítmica y con una línea de tendencia potencial. Fuente: Datos obtenidos de tesis, Andrés Andaluz.



Gráfica 5-3. Ley de fatiga dibujada en una escala no-logarítmica y con una línea de tendencia potencial. Fuente: Datos obtenidos de tesis, Gelo Cardenas.

Las vías y las ecuaciones de las líneas de tendencia obtenidas en Excel, se muestran a continuación.

Vías		Logarítmica		Potencial	
		ESF VS REP	DEF VS REP	ESF VS REP	DEF VS REP
COSTA	Progreso-Salinas	$y = -45,05\ln(x) + 1001,3$	$y = -73,09\ln(x) + 951,34$	$y = 1750,9x^{(-0,186)}$	$y = 1688,8x^{(-0,195)}$
	Progreso-Playas	$y = -62,61\ln(x) + 942,03$	$y = -119,3\ln(x) + 1251$	$y = 1443,5x^{(-0,154)}$	$y = 5381x^{(-0,38)}$
	Manta-Crucita	$y = -78,82\ln(x) + 1037,4$	$y = -36,44\ln(x) + 511,8$	$y = 1114,1x^{(-0,07)}$	$y = 735,25x^{(-0,155)}$
SIERRA	Guaranda-Balzapamba	$y = -69,03\ln(x) + 963,29$	$y = -74,22\ln(x) + 882,77$	$y = 1678,2x^{(-0,18)}$	$y = 2254,5x^{(-0,266)}$
	Guasuntos-Chunchi	$y = -44,27\ln(x) + 719,54$	$y = -64,18\ln(x) + 803,99$	$y = 956,05x^{(-0,124)}$	$y = 2077,2x^{(-0,26)}$
	Alausí-Huigra	$y = -55,59\ln(x) + 822,75$	$y = -36,27\ln(x) + 446,57$	$y = 1217,1x^{(-0,151)}$	$y = 984,08x^{(-0,24)}$
ORIENTE	Sucua-Bella Unión	$y = -99,31\ln(x) + 1342,2$	$y = -61,05\ln(x) + 708,25$	$y = 2409,7x^{(-0,188)}$	$y = 2211,3x^{(-0,294)}$
	Pastaza-Macas	$y = -66,64\ln(x) + 956,92$	$y = -39,09\ln(x) + 488,19$	$y = 1504,7x^{(-0,161)}$	$y = 844,38x^{(-0,202)}$
	limón- Puente Milagro	$y = -64,98\ln(x) + 962,13$	$y = -23,07\ln(x) + 364,81$	$y = 1549,8x^{(-0,159)}$	$y = 532,51x^{(-0,137)}$

Tabla 5-1. Líneas de tendencia tanto logarítmica y potencial obtenidas de la graficación de las leyes de fatiga en escala no logarítmica. Fuente: Datos, tesis antes mencionadas.

		Valor de R² para Deformación vs Repeticiones	
Vías		Logaritmica	Potencial
COSTA	<i>Progreso-Salinas</i>	0,9067	0,9538
	<i>Progreso-Playas</i>	0,8001	0,8197
	<i>Manta-Crucita</i>	0,8187	0,854
SIERRA	<i>Guaranda-Balzapamba</i>	0,9045	0,9397
	<i>Guasuntos-Chunchi</i>	0,954	0,9267
	<i>Alausi-Huigra</i>	0,8683	0,9196
ORIENTE	<i>Sucua-Bella Unión</i>	0,9009	0,8981
	<i>Pastaza-Macas</i>	0,8228	0,8989
	<i>Limón- Puente Milagro</i>	0,9363	0,9365

Tabla 5-2. Valores de R² donde se ve que las curvas que mejor se ajustan a los puntos son las potenciales. Fuente: El autor. Datos obtenidos de tesis pasadas.

La línea de tendencia que más se ajustaba a los puntos graficados era la potencial, y esto se confirma al tener valores de R² mas alto, por lo tanto fue esa la que se usó para efectuar nuestra hipótesis.

A continuación lo que se hizo fue que después de obtener las ecuaciones representativas del desempeño a fatiga de cada una de las carreteras, se procedió a tabular en Excel, la deformación que se obtendría si es que se realizara un ensayo en el laboratorio, tanto a 10.000, 20.000 y 30.000 ciclos. A estos resultados se les calculó el valor mínimo, el valor máximo, el rango y el promedio. También se obtuvo la desviación estándar y el Percentil 15 inferior.

La Hipótesis que se manejó es la siguiente: “Todas las mezclas asfálticas son hechas apuntando a un buen desempeño, de estas un 15% de los casos por distintas razones, estas no cumplirán”

En la Tabla de abajo se observa de mejor manera lo antes mencionado, el cuadro del percentil 15, muestra el valor que tiene el 85% de los valores encima y el 15% por debajo. La marca rosada muestra los valores que no sobrepasaron el percentil 15, y por

lo tanto, según la hipótesis, se considera que esas mezclas no tendrán un buen desempeño a fatiga.

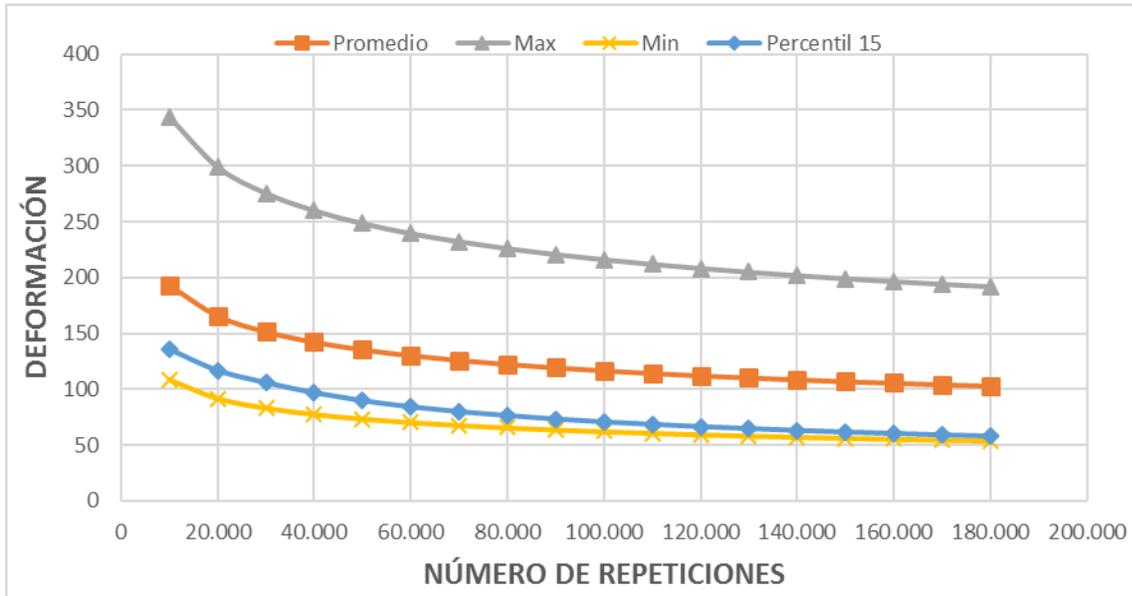
Costa	DEF VS REP	N	ε₀	N	ε₀	N	ε₀
<i>Progreso-Salinas</i>	$y = 1688,8 Nf^{(-0,195)}$	10.000	280	20.000	245	30.000	226
<i>Progreso-Playas</i>	$y = 5381 Nf^{(-0,38)}$	10.000	163	20.000	125	30.000	107
<i>Manta-Crucita</i>	$y = 735,25 Nf^{(-0,155)}$	10.000	176	20.000	158	30.000	149
Sierra	DEF VS REP	N	ε₀	N	ε₀	N	ε₀
<i>Guaranda-Balzapamba</i>	$y = 2254,5 Nf^{(-0,266)}$	10.000	195	20.000	162	30.000	145
<i>Guasuntos-Chunchi</i>	$y = 2077,2 Nf^{(-0,26)}$	10.000	189	20.000	158	30.000	142
<i>Alausí-Huigra</i>	$y = 984,08 Nf^{(-0,24)}$	10.000	108	20.000	91	30.000	83
Oriente	DEF VS REP	N	ε₀	N	ε₀	N	ε₀
<i>Sucua-Bella Unión</i>	$y = 2211,3 Nf^{(-0,294)}$	10.000	344	20.000	299	30.000	276
<i>Puente Pastaza-Macas</i>	$y = 844,38 Nf^{(-0,202)}$	10.000	131	20.000	114	30.000	105
<i>limón- Plan de Milagro</i>	$y = 532,51 Nf^{(-0,137)}$	10.000	151	20.000	137	30.000	130
		Min	108	Min	91	Min	83
		Max	344	Max	299	Max	276
		Rango	236	Rango	208	Rango	193
		Prom	193	Prom	166	Prom	151
		Desviación	74,57	Desviación	66,00	Desviación	61,66
		Percentil 15	135	Percentil 15'	116	Percentil 15'	106

Tabla 5-3. Resultado reemplazar las ecuaciones ya obtenidas, por tres valores de ciclos de laboratorio. Fuente: El autor.

Se puede observar que las dos vías que no tienen un buen desempeño a fatiga son la Alausí-Huigra, y la Puente Pastaza-Macas, las cuales fueron catalogadas de estado Marlo y Regular, respectivamente. Se podría decir que fueron excluidos del grupo que si paso el criterio ya que en 10.000 ciclos de laboratorio no tuvieron una deformación suficiente como para superar el percentil 15 y lo que nos da a entender que su comportamiento no fue lo suficientemente dúctil.

Lo que se hará entonces es realizar un ensayo a una deformación unitaria inicial de 135 micro-strain y se esperara que para que una briqueta se la considere aceptable,

esta no tendrá que fallar antes de llegar a los 10.000 ciclos, si falla después se considerara que tendrá un buen desempeño a fatiga.



Gráfica 5-4. Muestra las deformaciones, máximas, mínimas, obtenidas, así como también su promedio y Percentil 15. Fuente: El Autor.

5.2.1. Modelos de fisuras a fatiga.

El concepto de daño acumulativo ha sido usado para predecir la falla a fatiga del pavimento. Se está de acuerdo de manera general, que el número de repeticiones de carga permitido está relacionado con el esfuerzo de tensión al fondo de la capa asfáltica. La cantidad de daño se expresa como una relación de daño entre el número de repeticiones de carga predichas y las permitidas. El daño se produce cuando la suma de relaciones de daño es igual a 1. Por todas las variables inmiscuidas, el daño no ocurrirá apenas la relación llegue a 1. Esto significara que la probabilidad de fallo es del 50%, y que el 50% del área experimentara fisuras de fatiga.

La mayor diferencia entre varios métodos de diseño es las funciones de transferencia que relacionan los esfuerzos de tensión de las mezclas calientes con el número de repeticiones de carga. (Obtenido de H Huang, chapter11 Fatigue cracking)

La determinación de leyes de fatiga es una cuestión compleja que requiere de muchos ensayos que suelen llegar a tomar mucho tiempo y ser costosos. Hasta ahora no hay en el mundo un ensayo simplificado con el cual se pueda obtener datos que se acerquen a la realidad de cómo se va a comportar una mezcla asfáltica en caliente en cuanto a la fatiga.

En los métodos de diseño del instituto del asfalto y SHELL, el número permitido de repeticiones de carga N_t para llegar a la fatiga está relacionado con la deformación a tensión ϵ_t , al fondo de la capa asfáltica y del módulo de la mezcla caliente.

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3}$$

SHELL presenta una expresión simplificada para definir la fatiga de una mezcla asfáltica como la siguiente:

$$N = ((0.856 * Vb + 1.08)(10^6 * E)^{-0.36}) \epsilon^{-5}$$

Donde Vb es el % del bitumen en volumen y E es el módulo de la mezcla en Mega pascales.

El instituto del asfalto define la fatiga con esta otra expresión:

$$N = (0.0796 * C * (0.145E^{-0.854}) * \epsilon^{-3.291}$$

Donde C es un factor de corrección que viene dado por:

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right)$$

Donde V_a y V_b son el volumen de vacíos y el volumen del bitumen.

Según el libro de H Huang, el instituto de asfalto presenta la siguiente ecuación:

$$N_f = 0.0796(\varepsilon_t)^{-3.291} (E_1)^{-0.854}$$

La ecuación de SHELL se presenta como la siguiente:

$$N_f = 0.0685(\varepsilon_t)^{-5.761} (E_1)^{-2.636}$$

En la ecuación del instituto del asfalto se podría obtener una ecuación más simplificada si se obviara es termino que contiene el módulo, ya que el exponente al que esta elevado es muy bajo, pero lo que haremos será usar un valor de 3500 MPa como un módulo promedio para obtener un nuevo factor f_1

$$N_f = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} (E_1)^{-f_3}$$

$$f_{\text{corregido}} = f_1 * (E_1)^{-0.854} \text{ donde, } E = 3500 \text{ MPa}$$

Ya que la ecuación de Instituto de Asfalto esta en Psi, se debe realizar la conversión a MPa, que se la obtiene multiplicando el valor de E por el factor de conversión de: 145,0377

$$N_f = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} (145^{-0,854} * E^{f_3})$$

$$f_{\text{corregido}} = 0,0796_1 * (145^{-0,854} * (3500MPa)^{-0,854})$$

$$f_{\text{corregido}} = 1,06 * 10^{-6}$$

$$N_f = f_{\text{corregido}} (\varepsilon_t)^{-f_2}$$

$$N_f = 1,06 * 10^{-6} (\varepsilon_t)^{-f_2}$$

Así mismo se puede hacer el mismo proceso para la ecuación de Shell, que nos quedaría de la siguiente manera:

$$N_f = 6,24 * 10^{-17} (\varepsilon_t)^{-5.761}$$

Hay otras ecuaciones que no toman en cuenta los valores del módulo, a continuación de muestra una lista de algunas de estas.

Illinois Department of Transportation (Thompson, 1987)

$$N_f = 5x10^{-6} (\varepsilon_t)^{-3}$$

Trasnpport and Road Research Laboratory (Powell et al., 1984)

$$N_f = 1,66x10^{-10} (\varepsilon_t)^{-4,32}$$

Belgian Road Research Center (Verstraeten et al., 1982)

$$N_f = 4,92x10^{-14} (\varepsilon_t)^{-4,76}$$

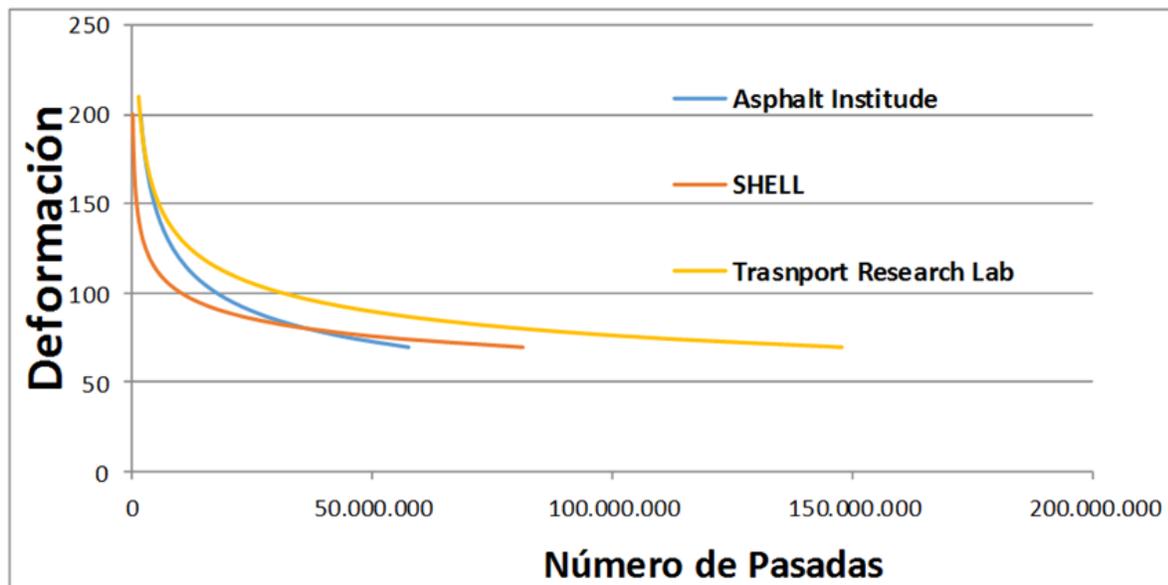
Estos métodos permiten la estimación del comportamiento a fatiga de cualquier tipo de ezcla de alto modulo.

En el laboratorio de pavimentos de la UCSG, para obtener los estudios de fatiga se han realizado estudios de Fatiga, de varias carreteras de las regiones del país por varios

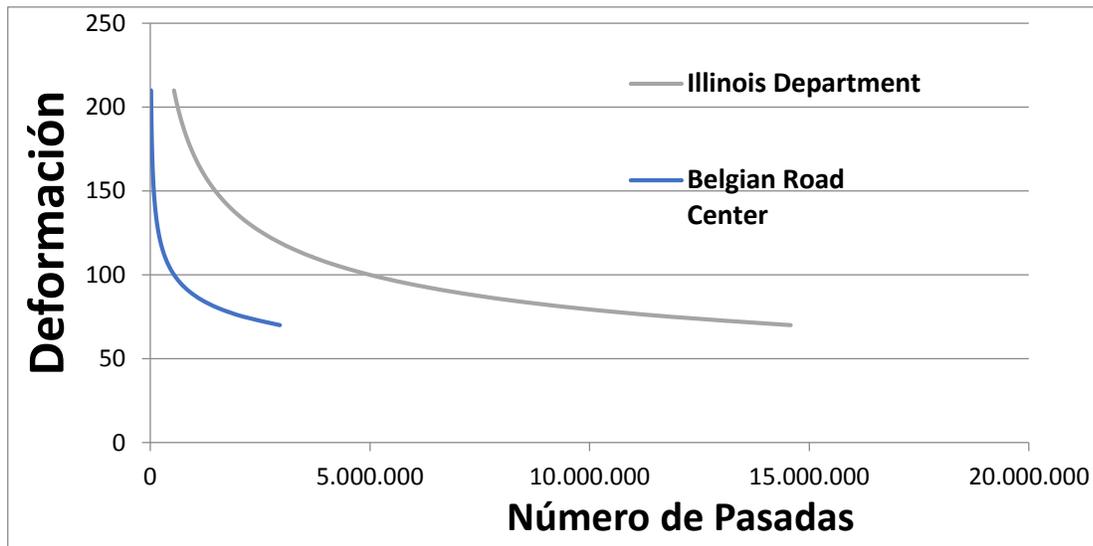
tesistas. Obtener estos datos puede fácilmente llegar a tomar una semana o un poco menos.

Por estas razones usualmente se usan estudios genéricos obtenidos por grandes laboratorios, con mayores recursos; los dos métodos que más se usan son los desarrollados por la SHELL y por el Instituto del Asfalto.

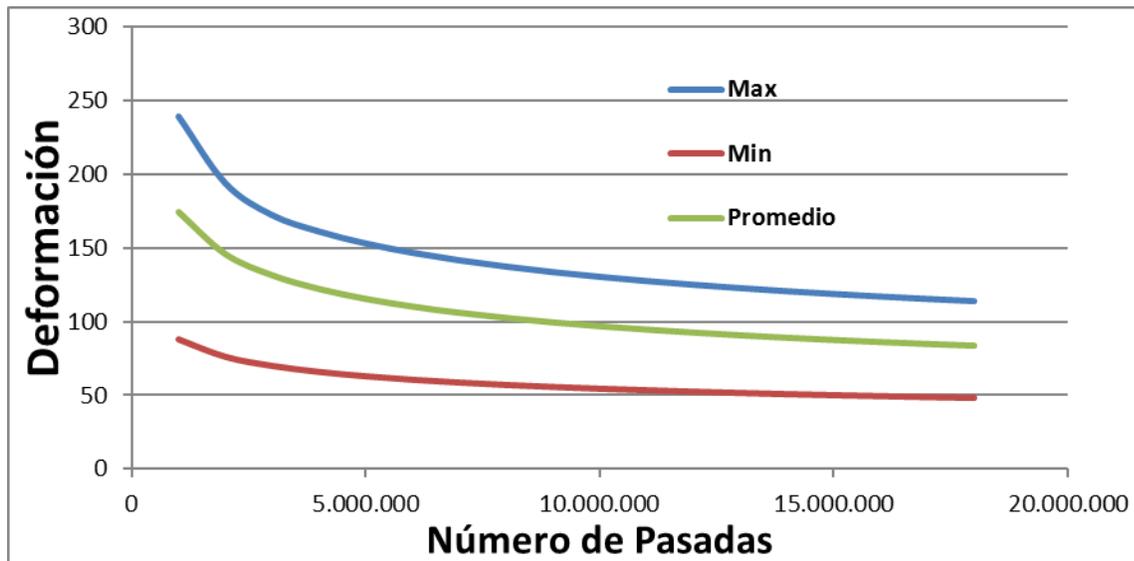
En los gráficos a continuación se muestran las gráficas de cinco leyes de fatiga con las cuales se diseña. Estas leyes se han obtenido al correr en una hoja de Excel las ecuaciones para varios valores de pasadas.



Gráfica 5-5. Gráficos de las diferentes leyes de fatiga utilizadas para el diseño a Fatiga. Datos de tesis antes mencionadas.



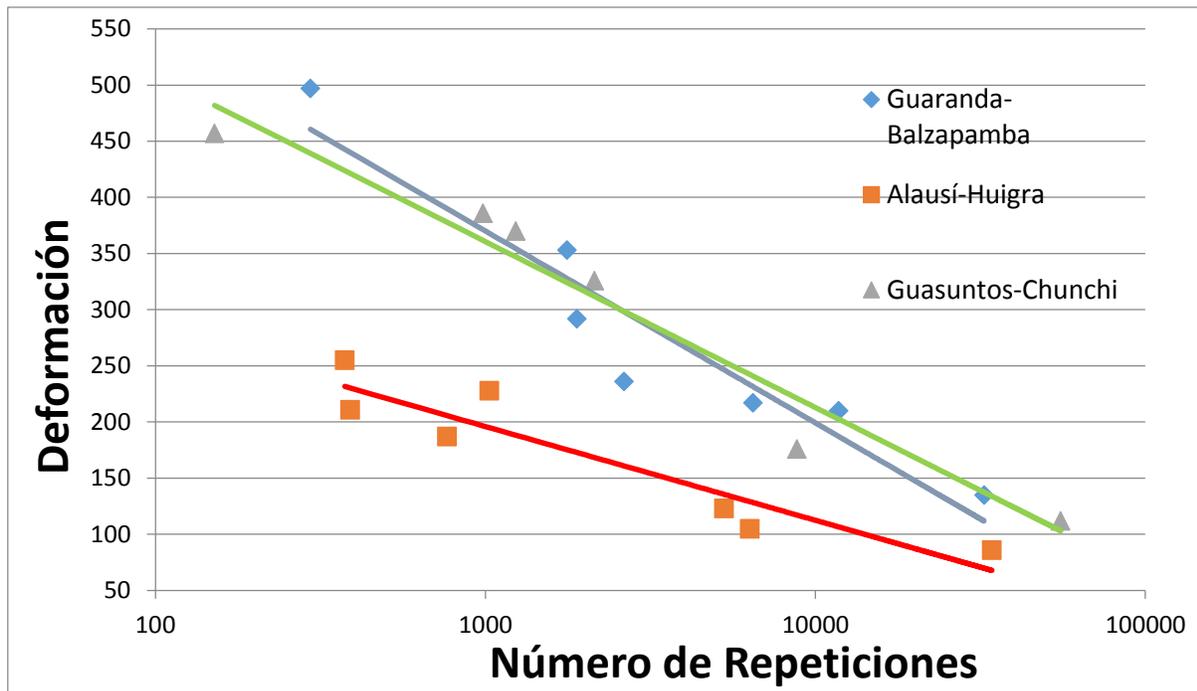
Gráfica 5-6. Gráficos de las diferentes leyes de fatiga utilizadas para el diseño a Fatiga. Fuente: El autor



Gráfica 5-7. Valores Mínimo, máximo y promedio de las diferentes leyes de Fatiga utilizadas para el diseño. Fuente: El autor

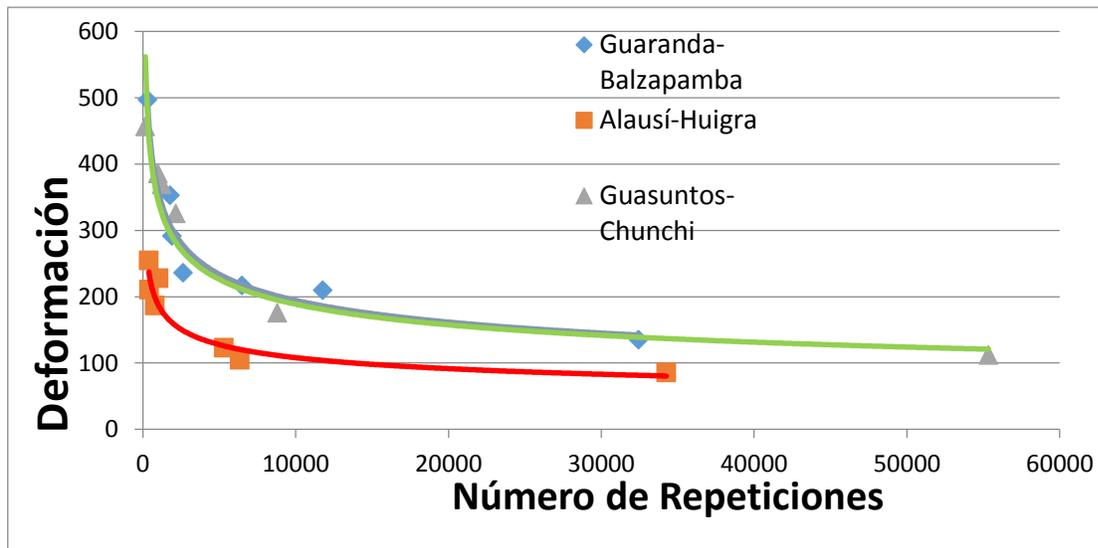
5.2.2. Valor de resistencia máxima

En la Figura podemos observar una ley de Fatiga Típica, obtenida con el NAT (Nottingham Asphalt Test) cada punto es una muestra ensayada a Fatiga a un Esfuerzo determinado. Se puede observar que el número de repeticiones esta en escala Logarítmica y que obtenemos una recta cuando trazamos una línea de tendencia.



Gráfica 5-8. Ley de Fatiga repeticiones contra deformación. Tomado de tesis de grado, Katheryn Nuñez "Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región sierra del Ecuador mediante pruebas de desempeño"

Esta misma ley de fatiga se la puede representar en un gráfico donde las repeticiones están a una escala no logarítmica y se puede observar un comportamiento que apoyaría a la idea de que existe un punto donde las repeticiones se vuelven infinitas sin que falle la muestra.



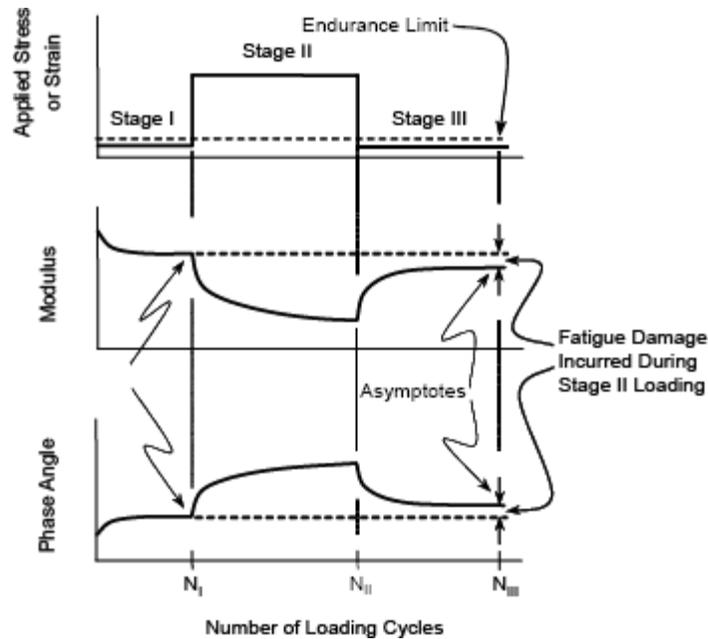
Gráfica 5-9. Ley de fatiga graficada de manera no logarítmica. Datos obtenidos de tesis de grado de Katheryn Nuñez.

Las líneas que se usaron fueron de tendencia potencial y los valores de las ecuaciones de muestran en el gráfico y a continuación.

Si reemplazamos valores en las ecuaciones, notamos que si bien no se tiene una asíntota que representaría el punto de “Endurance”, lo que si se aprecia es que los valores de las repeticiones aumentan en gran medida a medida que se baja la carga. Si se toma como ejemplo la ecuación de la vía Alausí-Huigra, con una deformación unitaria de 100 micro-strain necesitaremos 13700 ciclos de para llegar a fatigar la muestra y con 50 micro-strain se necesitara 246500 ciclos para llegar a la falla.

Según un estudio encontrado en: “Soltani, A., and D. A. Anderson, "New Test Protocol to Measure Fatigue Damage in Asphalt Mixtures," *Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 4, 2005.”

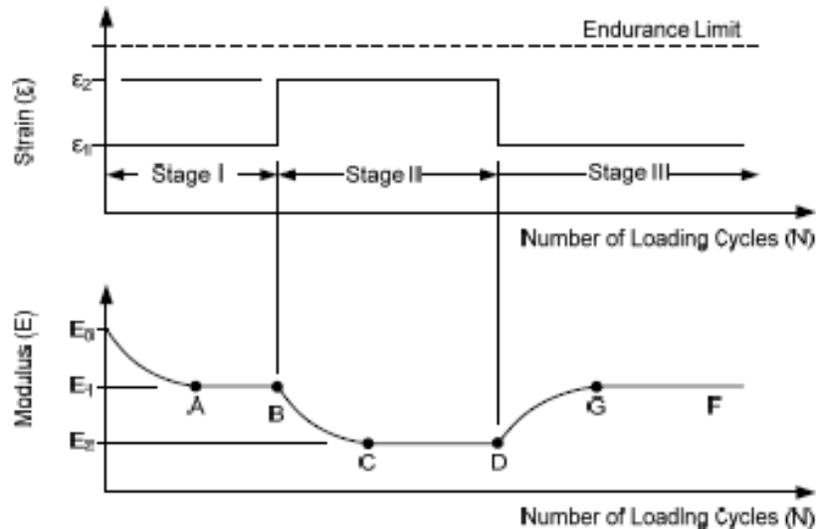
Se propuso un nuevo protocolo de fatiga en donde se consideraban tres estados de carga continua sin ningún periodo de descanso (Estados I, II y III). Durante el estado I y II, se mantuvo un nivel de esfuerzo, el cual no excedía el valor de resistencia ilimitada (Endurance limit) de la mezcla y consecuentemente no habría daño por fatiga. Durante el estado II se aplicaría un esfuerzo alto que sobrepasaría el valor de resistencia ilimitada (Endurance limit) y por lo tanto ocurriría daño por fatiga. La diferencia entre el modulo al final del estado I y III debería indicar el nivel de daño de fatiga “real” causado en un el estado II, como se muestra abajo.



Gráfica 5-10 Esquema de los estados I, II y III,
Tomado de: “<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/fatigue/fatigue2.cfm#s03>”

Solo puede ocurrir daño en el estado II, si el nivel de esfuerzo es mayor que el valor de resistencia ilimitada (Endurance limit). Para los dos estados I y III el nivel de esfuerzo se mantuvo igual (σ_1). Para el estado II, se aplicó un esfuerzo mayor (σ_2). En cada estado, la carga continúa hasta que la pendiente de la curva de modulo versus número de ciclos llegue a cero. Se espera que el modulo al final del estado III retornara al

mismo nivel observado al final del estado I, si los esfuerzos aplicados están por debajo del valor de resistencia ilimitada.



Gráfica 5-11. Pruebas de diferentes esfuerzos para validar la existencia de “Endurance limit”
 Tomadode: “<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/fatigue/fatigue2.cfm#s03>”

5.3. Verificación

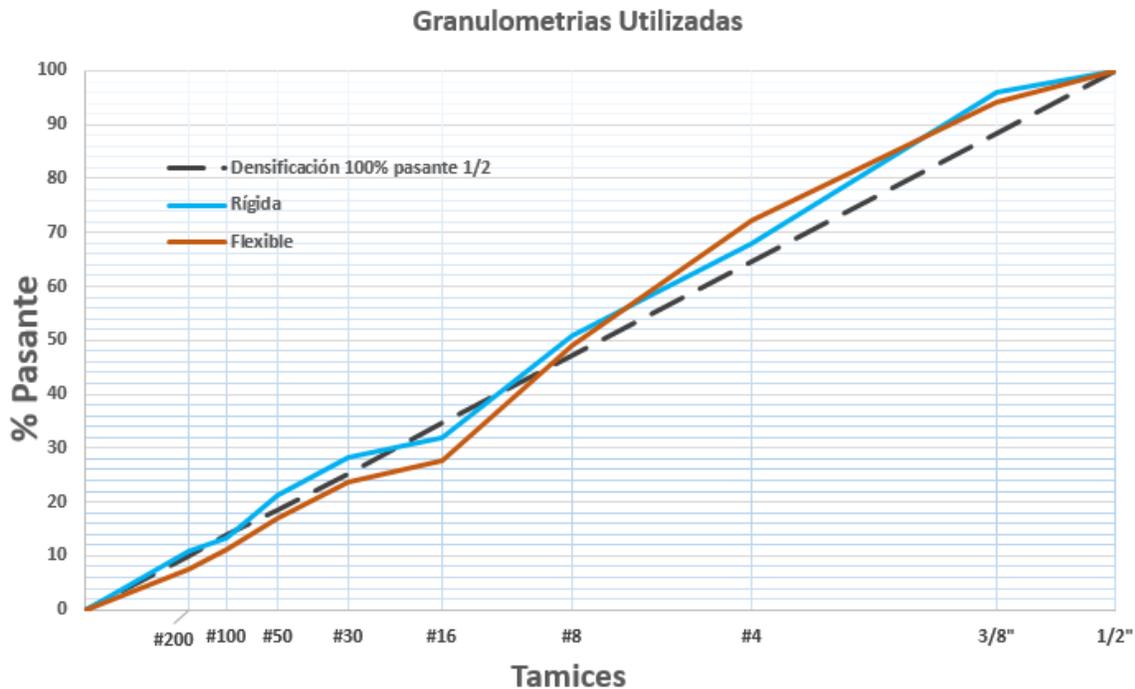
Para Comprobar lo antes estipulado, se recomienda realizar un ensayo de verificación. La idea es realizar dos lotes de briquetas. El primer lote estará conformada por briquetas rígidas que tendrán un comportamiento pobre, en cuanto a desempeño a fatiga. El segundo, por el contrario se conformara por briquetas flexibles que se comporten de mejor manera. Además las briquetas se las dejara envejecer en el horno, de tal manera que se las pruebe a medida que su módulo aumente, esto ayudara a verificar que si bien unas podrían aprobar nuestro criterio, al envejecer y volverse más

rígidas fallarían. Esto último nos puede ayudar a discernir un poco mejor, a que modulo, una mezcla se vuelve sospechosa de fallar a fatiga.

5.3.1. Granulometrías.

Para obtener una granulometría lo más densificada posible, se necesita tener material de todos los tamices. Para un material que tiene un 100% de pasantes del tamiz de $\frac{1}{2}$ " La granulometría más densa es representada por la línea diagonal punteada. Por lo tanto, una granulometría que se acerque lo más posible esta, nos dará la menor cantidad de vacíos inter partícula y por lo tanto, la briqueta que se obtendrá será más rígida. Usando el mismo criterio, para obtener una granulometría más abierta, se necesitara tener una curva que se aleje de la línea punteada, o que cruce esta una o más veces. Esto dará una granulometría con un carente de ciertos tamaños de partículas y por lo tanto más espacio para llenar con asfalto, lo que hará a la briqueta más flexible.

Las granulometrías usadas se muestran a continuación



Gráfica 5-12. Granulometrías usadas para realizar las briquetas.

Se realizó varias briquetas basadas en lo antes estipulado, pero se falló en satisfacer algunos criterios de diseño, por lo cual no se las usa como una forma preliminar para validar el criterio, aunque de igual manera se piensa probarlas para ver datos se puede obtener de las mismas.

5.3.2. Envejecimiento de los testigos

Luego de hacer las briquetas se procederá a envejecerlas en el horno, las briquetas que se hagan se irán probado a medida que el módulo de las briquetas aumente a de unos 150 Mpa del valor inicial.

Esto ayudara a observar como con un mayor envejecimiento ocurre una pérdida de ductilidad, que afecta directamente a la resistencia a la fatiga de la mezcla.

5.3.3. Ensayo en el NAT

Antes de empezar con el ensayo a fatiga se tendrá que obtener la prueba de módulo de rigidez mediante el programa Stifness Stress, el cual se hará bajo una deformación controlada. Para esto se emplea un cabezal de carga de carga de tracción indirecta, el ensayo se realiza con una temperatura de 20 °C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas “haversine” con un intervalo de tiempo entre el inicio del puso de carga y el punto en que la carga es máxima. La carga es aplicada en un tiempo de 0,12 segundos.



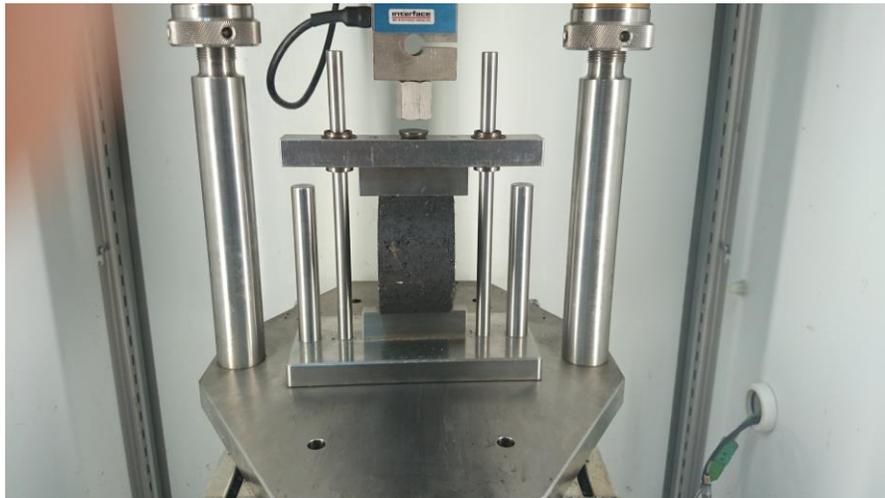
Gráfica 5-13 Modulo de Rigidez. Tomado de: Tesis Danny Morocho.

El modulo que da como resultado esta prueba está tomado en base a una deformación de 5 micro-strain, La deformación unitaria inicial para el ensayo de fatiga se la obtiene de la siguiente formula.

$$\varepsilon = \frac{\sigma(KPa)(1+3\mu)}{Sm(KPa)}$$

De ahí, conociendo ya el valor de ε (5 micro-strain) y el valor que nos de la prueba de módulo, se puede despejar y obtener el valor de Kpa . Ya que tenemos un valor de deformación unitaria al cual intentamos apuntar, se reemplazara ese valor de 135 micro-strain en ε y se buscara por medio de un par de interacciones el valor de KPa, que me dé el mismo valor de Sm.

Luego de eso se procederá a realizar el ensayo de Fatiga y a documentar los valores obtenidos de repeticiones de carga.



Gráfica 5-14 Ensayo a fatiga, Fuente: El Autor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- ✓ En el presente trabajo se ha propuesto un ensayo a Fatiga que promete ayudar a identificar, cuando una mezcla ha de tener un mejor desempeño a fatiga. Esto se logra por el análisis de datos obtenidos previamente en el laboratorio de asfaltos de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, donde se realizaron pruebas de desempeño a varios núcleos, obtenidos de varias carreteras del país.
- ✓ En el ensayo se prueba a una deformación unitaria inicial de 135 micro-strains y la muestra deberá superar los 10.000 ciclos en el laboratorio.

Recomendaciones

- ✓ Se recomienda realizar una verificación del criterio obtenido por medio de la fabricación de briquetas en laboratorio las cuales tengan tres tipos de comportamiento: El primer lote deberá ser flexible y muy resistente a la fatiga, el segundo se de manera deficiente a la fatiga.
- ✓ Se recomienda que estos baches se los envejezca en el horno y se los pruebe a fatiga, con el criterio encontrado, a medida que el módulo vaya aumentando.

BIBLIOGRAFÍA

- Andaluz, A. X. (2013) *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Costa del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- Núñez, 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.
- 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.
- Parrales R.R. (2013). *Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- Verdezoto, M.A. (2010). *Análisis Comparativo de los Módulos Resilientes, entre Mezclas Frías y Mezclas Calientes*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- Tamayo, M. J. Veloz, E.X. (2007). *Variación de la Respuesta Mecánica y Dinámica de las Mezclas Asfálticas Calientes que se Utilizan en Guayaquil al Variar los Diversos Parámetros del Diseño Marshall*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.

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

National Center for Asphalt Technology. (1991). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Second edition, U.S.A.

Asphalt Institute (1982). *Research and development of The Asphalt Institute's thickness design Manual*. MS-1 Ninth Edition. U.S.A.

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

Fan Yin, Lorena Garcíá Cucalon, Amy Epps Martins, Edith Arambula, Eun sug Park, (2014). *Performance Evolution of Hot-Mix and Warm-Mix asphalt with Field and Laboratory Aging*. Department of Civil Engineering, Texas A&M University. U.S.A. (paper).

Prowell, B. D. *Methods for Determining the Endurance Limit Using Beam Fatigue Test*. National Center for Asphalt Technology, U.S.A.

Fan Yin, Lorena Garcíá Cucalon, Amy Epps Martins, Edith Arambula, Eun sug Park, (2014). *Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt*. Department of Civil Engineering, Texas A&M University. U.S.A. (paper).

Garnica, P. (2004). *Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas*. Publicación técnica No 246, Instituto Mexicano del Transporte, México.

U.S. Department of Transportation. *An Investigation of the Endurance Limit of Hot-Mix Asphalt Concrete Using a New Uniaxial Fatigue Test Protocol*. Final Report.

Recuperado de

<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/fatigue/fatigue2.cfm#s03>

A.E.P.O. (2001). *Cálculo de Leyes de Fatiga de Mezclas Bituminosas*. Recuperado de:

<http://es.scribd.com/doc/69350343/Calculo-de-Leyes-de-Fatiga-de-Mezclas-Bituminosas>

Fernández, W.D. Rondón, H. Reyes. F. (2011). *Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del conocimiento*. Univercidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Garcia, G. (2012). *Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas*. Seminario Internacional de Recapeo, Chile. Recuperado de:

<http://www.seminariorecapados.usm.cl/presentaciones/Gabriel%20Garcia-1.pdf>

Anexos

A.1 Pasos para realizar las Briquetas

Pasos para realizar las Briquetas

Paso 1.- Definir el porcentaje de agregados y asfalto que se va a usar. La cantidad total se la obtiene según la cantidad de briquetas a realizar, más un remanente de 1000 gr para realizar el ensayo Rice.

Paso 2.- Los materiales a usar deberán ser secados con ayuda de un horno, o con una cocineta. Se podrán usar en la mezcla cuando tengan la temperatura mezclada de 150 °C. Así mismo se tiene que calentar el asfalto.

Paso 3.- Mezclar los agregados una vez secos, en los porcentajes de diseño junto con el asfalto, revolver hasta que todo el material este cubierto con asfalto.

Paso 4.- Dejar el material en el horno durante 2 horas, para asegurar que el agregado absorba todo el asfalto que absorbería con el mezclado en planta.

Paso 5.- Pesar 1,100 gr. del material y colocarlos en el molde.



Gráfica A-1. Peso de 1100 gr de material para realizar la briqueta Fuente El autor.

Paso 6.- Puesto en el molde revolver realizando incisiones en la mezcla, unas 15 veces a los lados y otras 10 en el centro para asegurar que no queden espacios sin llenar.



Gráfica A-2. Eliminación de posibles espacios vacíos en la briqueta Fuente El autor

Paso 7.- Proceder a compactar.



Gráfica A-3.- Molde y soporte Marshal para compactación. Fuente el autor.

Paso 8.- Dejar enfriar la briqueta en el molde, una hora, antes de sacarla con el gato hidráulico.

Paso 9.- Realizar el ensayo rice con 1000 gr. residuales de la mezcla.

A.2. Pasos para Realizar en Ensayo Rice

Paso 1.- Llenar el picnómetro al máximo y registrar su peso.

Paso 2.- Dejar el picnómetro con 1200 ml de agua y vaciar los 1000 gr de la muestra.

Paso 3.- Batir vigorosamente para eliminar las burbujas de aire dentro del material.
Realizar esto durante 3 minutos.

Paso 4.- Completar lo que falta de agua para llenar el picnómetro, y registrar su peso.

Paso 5.- Obtenido ya el peso del picnómetro + agua y el peso del picnómetro + agua + material, aplicar la siguiente fórmula para obtener el Rice.

$$\text{RICE} = \frac{A}{(A+B)-C}$$

A = Peso Material

B = Peso Picnómetro + Agua

C = Peso Picnómetro + Agua+ Material