



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIARÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**“ESTUDIO COMPARATIVO DE PRUEBAS DE FATIGA
DINÁMICAS Y PRUEBAS DE TRACCIÓN INDIRECTA BAJO
CARGAS MONOTÓNICAS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS”**

AUTOR:

Palacios Maldonado, José Fernando

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romaní, Rolando. PhD.

**Guayaquil, Ecuador
2015**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **José Fernando Palacios Maldonado**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Stefany Alcivar B, MSc.

Guayaquil, a los 28 del mes de Septiembre del año 2015



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **José Fernando Palacios Maldonado**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas** previo 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 del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

Guayaquil, a los 28 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR

José Fernando Palacios Maldonado



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **José Fernando Palacios Maldonado**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Estudio comparativo de pruebas de fatiga dinámicas y pruebas de tracción indirecta bajo cargas monotónicas en mezclas asfálticas** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 28 del mes de Septiembre del año 2015

EL AUTOR:

José Fernando Palacios Maldonado

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, quienes siempre han esta a mi lado mostrándome su apoyo y amor incondicional, inspirándome día a día para poder alcanzar mis metas. Un agradecimiento especial a mi padre que fue mi primer profesor de ingeniería y que con cada detalle ha sabido guiarme desde mi día uno.

José Fernando Palacios Maldonado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a cada uno de mis profesores de ingeniería, quienes día a día se esforzaron por transmitir sus conocimientos y así pueda alcanzar esta meta.

José Fernando Palacios Maldonado

ÍNDICE GENERAL

Contenido

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.	12
1.1 Generalidades	12
1.2 Descripción de la problemática.....	13
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.	15
2.1 Mezclas asfálticas.....	15
2.2 Cemento asfáltico	15
2.3 Agregado mineral.....	16
2.4 Parámetros volumétricos.....	16
2.5 Metodología de diseño Marshall	23
CAPITULO 3: PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.	26
3.1 Estabilidad.....	26
3.2 Resistencia a la fatiga.....	27
3.3 Durabilidad.....	27
CAPITULO 4: OBSERVACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.	28
4.2 Deformación permanente.....	28
4.3 Agrietamiento por fatiga.....	29
CAPITULO 5: PARAMETROS QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.	31
5.2 Tipo y cantidad de asfalto	31

5.3 Granulometría.....	33
5.4 Forma de aplicación de carga en la prueba	34
5.5 Efecto del tiempo de receso	36
5.6 Rigidez de la mezcla	37
5.7 Vacíos de aire	38
5.8 Ecuaciones empíricas	39
6.1 Ensayo de tracción indirecta.....	41
6.2 Ensayo de flexión semi-circular (SCB Semi-circular bending)	44
6.3 Módulo de rigidez mediante deformación controlada.....	49
6.4 Módulo de rigidez mediante carga controlada.....	50
6.5 Ensayos de fatiga dinámicos	51
a.- Ensayo con desplazamiento controlado	51
b.- Ensayo con esfuerzo controlado.....	52
CAPITULO 7: TRABAJO BÁSICO EXPERIMENTAL	57
7.1 Mezclas estudiadas	57
7.2 Ensayos rutinarios	57
7.2.1 Granulometría.....	57
7.2.2 Determinación del contenido de asfalto por medio de centrifugación.....	59
7.2.3 Densidades y porcentajes de vacíos	61
7.3 Determinación de temperatura y nivel de envejecimiento para el estudio.....	62
CAPITULO 8: RESULTADOS OBTENIDOS.....	64
8.1 Variación de la resistencia a la tracción indirecta con el envejecimiento y temperatura	64
8.2 Resultados de tracción indirecta (T.I.)	66
8.3 Resultados de Flexión semi-circular (SCB Semi-circular bending)	72
8.4 Resultados de las pruebas de módulos de rigidez bajo deformación controlada	75

8.5 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos.....	75
CAPITULO 9: ANALISIS DE RESULTADOS.	79
CAPITULO 10: CONCLUSIONES	84
CAPITULO 12: BIBLIOGRAFÍA	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Parámetros de diseño volumétrico.....	19
Figura 2.2 Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica en caliente	20
Figura 2.3 Martillo automático de compactación Marshall del laboratorio de pavimentos de la UCSG.....	25
Figura 4.1 Ilustración de una falla por ahuellamiento	29
Figura 4.2 Ilustración de una falla severa por agrietamiento por fatiga.....	30
Figura 5.4 Esfuerzo de flexión vs. Numero de ciclos a la falla, para mezcla de diferente rigidez (S).....	37
Figura 5.5 Curva de vida de fatiga relativa contra porcentaje de vacios en la mezcla..	39
Figura 5.6 Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos a) bajo deformación controlada y b) bajo esfuerzo controlado.....	39
Figura 6.1 Distribución de esfuerzos durante ensayo de tracción indirecta	42
Figura 6.2 Prensa de compresión de la UCSG	43
Figura 6.3 Diales para lectura de deformación horizontal en tracción indirecta.	44
Figura 6.4 Muestra semi-circular con dial de deformación para ensayo SCB.....	46
Figura 6.5 Base y cabezal de acero para ensayo SCB.....	47
Figura 6.6 Briquetas para ensayo SCB con diferentes niveles de envejecimiento.	48
Figura 6.7 Proceso de corte de especímenes semi-circulares.	48
Figura 6.8 Espécimen semi-circular con ranura para ensayo SCB.	49
6.5 Ensayos de fatiga dinámicos	51

Figura 6.11 Equipo NAT del laboratorio de UCSG	53
Figura 6.12 Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT	54
Figura 6.13 Relaciones N_f vs ϵ correspondientes a promedios y percentiles 15	56
Figura 7.1 Juego de tamices para ensayo granulométrico.	58
Figura 7.2 Curvas granulométricas de las diferentes mezclas.	59
Figura 7.3 Cuarteo de mezcla para extracción de asfalto.	60
Figura 7.4 Extractor centrifuga HUMBOLDT de la UCSG.....	61
Figura 7.5 Etapas en el proceso de envejecimiento	63
Figura 8.1 Grafico resistencia a tracción indirecta a distintas temperaturas vs. Nivel de envejecimiento	65
Figura 8.2 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; $V=50.8$ mm/min; Sin envejecimiento.....	68
Figura 8.3 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; $V=50.8$ mm/min; 6 días de envejecimiento.	69
Figura 8.4 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; $V=1.27$ mm/min; Sin envejecimiento.....	71
Figura 8.5 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; $V=50.8$ mm/min; Sin ranura; Sin envejecimiento	72
Figura 8.6 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; $V=50.8$ mm/min; Sin ranura; 6 días de envejecimiento.....	73
Figura 8.7 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; $V=1.27$ mm/min; Con ranura; Sin envejecimiento.....	74
Figura 8.8 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; $V=1.27$ mm/min; Con ranura; 6 días de envejecimiento	75
Figura 8.9 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta A	76
Figura 8.10 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta B	77
Figura 8.11 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta C	77
Figura 8.12 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta D	78
Figura 8.13 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta E.....	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Coeficientes de regresión de la ecuación.....	40
Tabla 6.1 Deformaciones correspondientes a los promedios y percentiles 15	55
Tabla 7.2 Contenidos de asfalto de las diferentes mezclas	61
Tabla 7.3 Características volumétricas y contenido de asfalto de las mezclas en estudio	62
Figura 7.5 Etapas en el proceso de envejecimiento	63
Tabla 8.1 Resultados de ensayo de tracción indirecta a 5°C y 20°C.	64
Tabla 8.2 Resultados de ensayo de tracción indirecta sobre briquetas; v= 50.8 mm/min; sin envejecimiento.	66
Tabla 8.4 Resumen de resultados de pruebas T.I; V=50.8 mm/min; Sin envejecimiento	68
Tabla 8.5 Energías disipadas a carga máxima (EPmáx) y energías totales (ETotal) durante las pruebas T.I; V=50.8 mm/min; Sin envejecimiento	68
Tabla 8.6 Resumen de resultados de pruebas T.I; V=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento	69
Tabla 8.7 Energías disipadas a carga máxima (EPmáx) y energías totales (ETotal) durante las pruebas T.I; V=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento	69
Tabla 8.8 Resumen de resultados de pruebas T.I; V=1.27 mm/min; Sin envejecimiento	70
Tabla 8.9 Energías disipadas a carga máxima (EPmáx) y energías totales (ETotal) durante las pruebas T.I; V=1.27 mm/min; Sin envejecimiento	71
Tabla 8.10 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; Sin envejecimiento	72
Figura 8.5 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; Sin envejecimiento	72
Tabla 8.11 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; 6 días de envejecimiento	73

Tabla 8.12 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; Sin envejecimiento	73
Tabla 8.13 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; 6 días de envejecimiento	74
Tabla 8.15 Resultados de las pruebas de fatiga a baja y alta tensión	76
Tabla 9.1 Calificación del comportamiento de las mezclas a la fatiga.....	82
Tabla 9.2 Comparación de comportamientos a fatiga y a T.I. con v=50.8mm/min, sin envejecimiento	83
Tabla 9.3 Comparación de comportamientos a fatiga y a T.I. con v=1.27mm/min, sin envejecimiento	83
Tabla 9.4 Comparación de comportamientos a fatiga y SCB con v=50.8mm/min, sin envejecimiento, sin ranura	83
Tabla 9.5 Comparación de comportamientos a fatiga y SCB con v=1.27mm/min, sin envejecimiento, con ranura	84
Tabla 9.6 Cuadro comparativo con estudios similares	84

RESUMEN (ABSTRACT)

El trabajo presente muestra un estudio comparativo entre los ensayos de fatiga dinámicos y ensayos de cargas monotónicas, con el objetivo de determinar la existencia de una relación entre los resultados de los ensayos mencionados. El mismo que destaca la importancia del análisis de la disipación de energía durante la ejecución de los ensayos antes mencionados.

En este trabajo investigativo se utilizaron cinco mezclas provenientes de diferentes plantas de la región costa del Ecuador. Las mezclas fueron ensayadas a dos niveles de envejecimiento a una temperatura de 20 °C. Los ensayos realizados fueron: Tracción indirecta (T.I.), flexión semi – circular (SCB) y ensayos dinámicos de fatiga por tracción indirecta empleando el equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT).

Al final de la investigación se determinó que si existe una relación entre los ensayos dinámicos y los monotónicos. En el caso del T.I. se encontró que la relación es más acertada cuando se emplea una velocidad de ensayo de 50.8 mm/min, en cuanto al SCB cuando la velocidad de aplicación de carga es de 1.27 mm/min y con una muestra ranurada.

Palabras Claves: fatiga, tracción indirecta, flexión semi-circular, envejecimiento, ductilidad, rigidez.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.

1.1 Generalidades

Es conocido por todos que la construcción de carreteras y vías en un país afecta directamente a la economía de una forma positiva, disminuyendo los tiempos de transporte de productos, por lo tanto disminuyendo los costos en transporte y generando nuevas “líneas” de comercio. Una vía en buen estado brindara un transporte más cómodo y seguro. Teniendo esto como idea principal y recordando que nuestros diseños deben ser económicos y duraderos, surge la necesidad de estudiar nuestros pavimentos, buscando nuevas formas y más económicas de realizar controles de calidad y métodos constructivos.

Los pavimentos se encuentran sometidos a un ciclo constante de carga y descarga debido al tráfico al que este sirve. El constante paso de tráfico genera fallos por ahuellamiento o agrietamientos por fatiga. Este trabajo se enfoca en los pavimentos flexibles, en mezclas asfálticas precisamente.

El pasar de los años y el estar expuesto a la intemperie genera un fenómeno denominado envejecimiento, esto genera un aumento en la rigidez de la mezcla, haciéndolos más frágiles. Esto puede ser beneficioso en cierta medida ya que mejorara su comportamiento ante el ahuellamiento, pero si es muy rígido se agrietara más rápido debido a su baja capacidad de deformarse bajo acción de cargas.

1.2 Descripción de la problemática

Las fallas por fatiga se generan debido al paso repetido del tráfico, generando un estado flexo compresión en las mezclas, es decir, compresión en la superficie y tracción en la parte inferior de la mezcla (este escenario se genera justo en la zona de contacto llanta-asfalto). La repetición de este escenario con el pasar del tiempo va degradando las características de los materiales que componen la mezcla, es decir que los materiales van perdiendo sus características originales, ocasionando una disminución de su resistencia, este fenómeno se conoce como fatiga.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Correlacionar los resultados de ensayos de tracción indirecta (T.I.) y flexión semi-circular (SCB) bajo cargas monotónicas y los resultados dinámicos de pruebas de fatiga en el equipo NAT en briquetas confeccionadas con mezclas asfálticas procedentes de cinco diferentes plantas de la región costa del Ecuador.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar la temperatura a la cual se realizarán los ensayos que se llevarán a cabo durante esta investigación.

Determinar el envejecimiento al cual serán sometidas las briquetas.

Implementar análisis de disipación de energía en el ensayo de tracción indirecta como indicador del comportamiento de la mezclas.

Analizar alternativas de la realización de ensayos de tracción indirecta y flexión semi-circular que permitan mejorar la identificación de fallas.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas son una mezcla de agregados minerales y un ligante asfáltico. Combinados forman una mezcla de color oscuro que yace en la parte superficial de un sistema multicapas conocido como pavimento flexible.

Existen algunas formas de clasificar las mezclas asfálticas, si tomamos en cuenta la temperatura pueden ser mezclas en frío o mezclas en caliente. En función de su porcentaje de vacíos pueden ser densas o cerradas (vacíos menores a 6%), semidensas o semicerradas (vacíos entre 6% y 12%), abiertas (vacíos entre 12% y 18%) y porosas (vacíos mayores a 18%). Si la clasificamos según su granulometría pueden ser continuas o discontinuas.

2.2 Cemento asfáltico

Es un material oscuro de origen natural, que actúa como ligante en las mezclas asfálticas. Es resistente a una gran cantidad de ácidos y es impermeable, lo que lo hace idóneo para la construcción de superficies de rodadura en los pavimentos flexibles.

Una de sus principales características es su viscosidad, la cual cambia dependiendo de la temperatura a la cual se encuentre sometido. Otra característica importante es su durabilidad, la cual hace referencia a la resistencia al envejecimiento, es decir su capacidad de conservar sus características iniciales con el pasar de los tiempos,

2.3 Agregado mineral

Proveniente de canteras o de ríos, es la parte mineral de la mezcla. Se clasifica en agregado grueso, que son gravas y agregado fino, que son arenas, pueden ser provenientes del proceso de trituración de las gravas o de ríos.

Los agregados deben cumplir con ciertas características para que así nuestras mezclas se desempeñen de mejor manera, ya que de ellos depende una gran parte del comportamiento de las mezclas.

La idoneidad de estos agregados recae sobre sus características tales como la granulometría, durabilidad, textura, porosidad, forma, afinidad con el asfalto, etc.

2.4 Parámetros volumétricos

Comúnmente las mezclas asfálticas son diseñadas en función del volumen total de la mezcla, es decir los componentes de la mezcla son dados en porcentajes de un volumen total, o pueden ser diseñadas en porcentajes de la masa del agregado.

En el análisis de los parámetros volumétricos de las mezclas se analizan los vacíos en el agregado mineral como los vacíos de aire, esto hace que sea necesario calcular las diferentes densidades (específica, aparente y bulk) para en función de estas definir los parámetros antes mencionados. Lo que hace necesario definir estos conceptos.

Los agregados utilizados en las mezclas en general son porosos, lo que nos indica que tienen la capacidad de absorber tanto agua como asfalto. Es ilógico pensar que absorción de los agregados es constante, por lo cual es

necesario siempre definir la gravedad específica por los métodos descritos a continuación:

Gravedad específica bulk (G_{sb}): es la relación de la masa de material al aire con una unidad de volumen de agua. Esta relación incluye el volumen ocupado por los vacíos presentes en la mezcla.

Dado que en las mezclas asfálticas la parte de agregado mineral no consisten en un solo material, sino que consta de una parte gruesa, una parte fina y polvo o llenante (filler), la gravedad específica bulk se calcula como la relación entre el porcentaje que representa en función del volumen total y su gravedad específica respectiva, como se ilustra a continuación:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} : gravedad específica bulk de todo el agregado

P_1, P_2, P_n : Porcentaje del volumen total que representa el agregado respectivamente.

G_1, G_2, G_n : Gravedad específica del agregado respectivamente.

Gravedad específica efectiva (G_{se}): relaciona la masa de material pesada en el aire y una unidad de volumen de agua, sin incluir los vacíos permeables de asfalto por obvias razones.

El volumen de asfalto que es absorbido por los agregados es similar o aproximado al volumen de agua que estos pueden absorber, de lo cual se puede inferir que el valor de la gravedad específica efectiva esta entre la gravedad específica neta y la gravedad específica aparente. Un valor fuera de este rango estará indicando que hubo un error en la determinación de G_{mm} .

Se calcula en función de la gravedad específica máxima de la mezcla (Gmm), con la siguiente expresión:

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde:

Gse: gravedad especifica efectiva del agregado

Gmm: gravedad especifica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire).

Pmm: porcentaje del total de la masa, siempre es 100%

Pb: contenido de asfalto

Gb: gravedad especifica del asfalto

Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica: esta característica del agregado varía en función del contenido de asfalto utilizado. Diferentes contenidos de asfalto resultaran en diferentes vacíos de aire dentro de la mezcla.

Se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde:

Gmm: gravedad especifica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire)

Pmm: porcentaje total de la masa de la mezcla, 100%

Ps: contenido de agregado, en función del total de la masa; 100 – Pb

Pb: contenido de asfalto, en función del total de la masa

Gse: gravedad especifica efectiva del agregado

Gb: gravedad específica del asfalto

Gravedad específica aparente (Gsa): relación entre la masa de material en el aire y la masa de un volumen de agua.

A continuación se presenta la Figura 2.1 para una mejor comprensión de los conceptos antes mencionados.

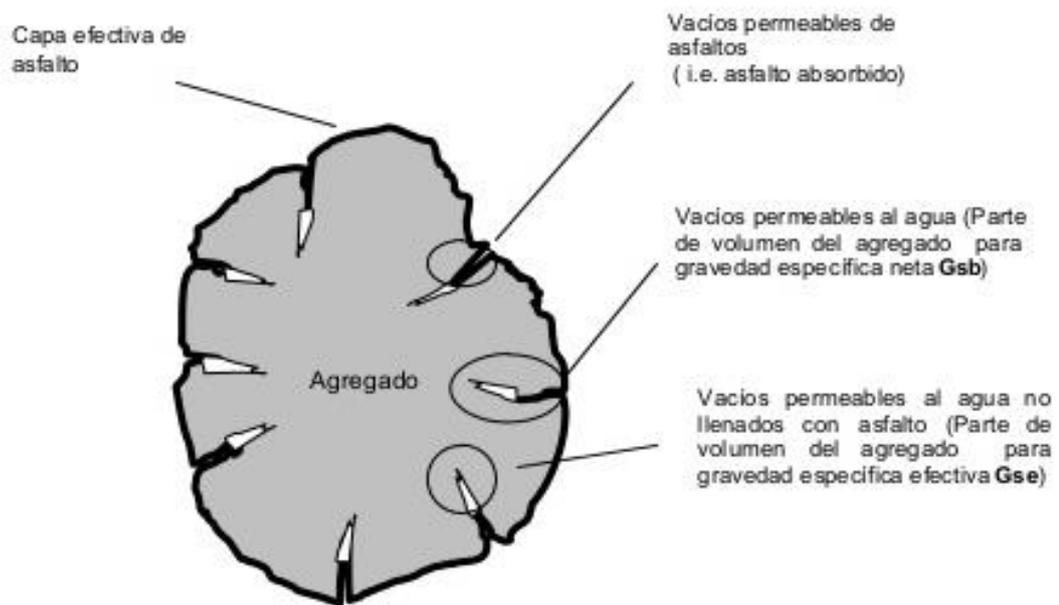


Figura 2.1 Parámetros de diseño volumétrico

Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, 2004

El comportamiento de nuestra mezcla estará definido por estos parámetros volumétricos. Los parámetros a analizar son los siguientes:

Vacíos de aire (V_a), contenido de asfalto efectivo (P_{be}), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA).

Vacíos de aire (V_a): volumen total ocupado por todos los pequeños “globos” de aire que quedaron atrapados en la mezcla, se expresa como un porcentaje del volumen de la mezcla.

Contenido de asfalto efectivo (P_{be}): representa el asfalto total presente en la mezcla, excepto en volumen absorbido por el agregado mineral.

Vacíos en el agregado mineral (VMA): denominado VMA por sus siglas en inglés (voids in mineral aggregate), es el volumen de espacios vacíos entre las partículas del agregado, incluyendo los vacíos de aire y el asfalto efectivo.

Vacíos llenos con asfalto (VFA): denominado VFA por sus siglas en inglés (voids filled with asphalt), es el volumen de los espacios vacíos del agregado que se llenó con asfalto.

Es necesario aclarar que el VMA y el V_a están en función del volumen de la mezcla, mientras que VFA es el porcentaje de VMA que se llenó de asfalto.



Figura 2.2 Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica en caliente

Fuente: Instituto Mexicano de Transporte, 2004

V_{ma} : Volumen de vacíos en el agregado mineral

V_{mb} : Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} : Volumen de la mezcla sin vacíos de aire.

Vfa: Volumen de vacíos llenos con asfalto.

Va: Volumen de vacíos de aire.

Vb: volumen de asfalto.

Vba: Volumen de asfalto absorbido.

Vsb: Volumen de agregado mineral neto o bulk.

Vse: Volumen de agregado mineral específico.

A continuación se detallara las expresiones para calcular las propiedades descritas anteriormente.

Contenido de asfalto efectivo

Se sabe que los agregados son porosos y tienden a absorber tanto agua como asfalto. El asfalto efectivo es el volumen de asfalto total de la mezcla menos el volumen que fue absorbido por el agregado, es decir que el asfalto efectivo es aquel que forma la película entre partículas creando cohesión entre ellas.

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} Ps$$

Donde:

Pbe: contenido de asfalto efectivo

Pb: contenido de asfalto

Pba: asfalto absorbido

Ps: contenido de agregado

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Puede calcularse en función de la gravedad específica neta del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla.

Si la mezcla se diseña en función del total de la masa, VMA se calcula de la siguiente manera:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Donde:

VMA: vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

Gsb: gravedad especifica bulk del total de agregado

Gmb: gravedad especifica neta de la mezcla compactada

Ps: contenido de agregado, en función del total de la masa de la mezcla

Si la mezcla se diseñó en función de la masa del agregado, se calcula como se indica a continuación:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} * \frac{100}{100 + Pb} * 100$$

Donde:

Pb: contenido de asfalto en función de la masa del agregado mineral.

Porcentaje de vacíos de aire

Se determina utilizando la siguiente relación:

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Donde:

Va: vacíos de aire en la mezcla

Gmm: gravedad especifica máxima de la mezcla

Gmb: gravedad especifica bulk de la mezcla.

Porcentajes de vacíos llenos de asfalto

Los vacíos llenos de asfalto se determinan con la siguiente expresión:

$$VFA = 100 * \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde:

VFA: vacíos llenos de asfalto

VMA: vacíos en el agregado mineral en función del volumen total

Va: vacíos de aire en mezcla.

2.5 Metodología de diseño Marshall

Este método es aplicable solo a mezclas asfálticas en caliente con agregados no mayores a 25 mm.

La finalidad de esta metodología es determinar un contenido de asfalto óptimo, tal que al combinarse con los agregados que cumplieron con las exigencias, se forme en estos una película de espesor suficiente que permita a la mezcla desempeñarse al cien.

Este método hace énfasis en 2 relaciones entre las características de la mezcla:

Vacíos – Densidad

Estabilidad – Flujo

Para estos análisis se emplean unas briquetas cilíndricas. Las dimensiones de dichas briquetas se encuentran normalizadas y son las siguientes: diámetro = 103 mm, espesor = 64 mm.

Para el diseño de la mezcla se debe conocer la curva de viscosidad – temperatura del asfalto que se utilizara, esto otorgara información importante como la temperatura de mezcla y la temperatura de compactación.

Para la selección del contenido óptimo de asfalto se realizan análisis basados en los valores de VMA, VFA y Va que se calculan con los contenidos de asfaltos iniciales, los pasos según el método nombrado son los siguientes:

Se debe utilizar un mínimo de 3 muestras.

La temperatura de mezcla y compactación se determinan según la viscosidad del ligante. (La temperatura de compactación es la que de una viscosidad de 380 ± 30 cts.

Los moldes deben calentarse previamente para evitar disminución de temperatura, la cara del martillo debe estar limpia y se debe calentar de igual forma.

Se emplea 1200 gr de muestra aproximadamente.

La muestra se ubica en el molde, y con ayuda de una espátula se “varilla” para evitar que queden bolsas de aire internas.

Se compacta la muestra con ayuda del martillo. El número de golpes depende del nivel de tráfico, para este trabajo se compacto con 75 golpes cada cara de la muestra.

En general, en este trabajo no se realizaron diseños como tales, sino se confeccionaron briquetas de mezclas producidas en plantas con diseños ya aprobados.



Figura 2.3 Martillo automático de compactación Marshall del laboratorio de pavimentos de la UCSG

CAPITULO 3: PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.

3.1 Introducción

Las mezclas deben ser diseñadas de tal forma que brinde una resistencia suficiente para soportar los esfuerzos inducidos por el flujo vehicular sin deformarse ni agrietarse, además de ser resistente al intemperie. Esto se logra diseñando la mezcla asfáltica con un agregado apropiado y el porcentaje de ligante necesario y óptimo para cubrir la superficie de los agregados, de tal forma que al juntarse y formar un solo cuerpo pueda cumplir con las exigencias mencionadas. Esto asegurara una superficie duradera, de tal forma que brindara al usuario un viaje cómodo y seguro. Teniendo esto en cuenta, se pueden considerar para este estudio 3 características importantes que deben poseer las mezclas asfálticas:

Estabilidad

Resistencia a la fatiga

Durabilidad

3.1 Estabilidad

La estabilidad de una mezcla asfáltica está definida como, la capacidad para resistir deformaciones y desplazamientos. Esto dependerá tanto de las características del ligante y del agregado.

La forma del agregado, su textura y granulometría, jugaran un papel muy importante en la fricción interna, la cual mejora la resistencia a deformaciones.

La calidad y contenido de ligante asfáltico impactan en la cohesión. El exceso de asfalto en la mezcla provocara un decremento en la fricción interna al generar películas muy gruesas. El óptimo contenido de ligante brindara cohesión y fricción máximas.

3.2 Resistencia a la fatiga

Es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir la aplicación repetida de cargas debida al flujo vehicular. Esta característica depende mucho del nivel de rigidez de la mezcla, al ser más rígida se volverá frágil ante la deformación debida a las cargas aplicadas, es decir que el contenido de asfalto también es un factor importante en esta propiedad, mayor contenido de asfalto le dará una mayor fluidez evitando el agrietamiento en la parte inferior.

3.3 Durabilidad

Es la capacidad a resistir los factores ambientales, tales como, aire, temperatura, radiación UV, lluvia y además resistencia al desprendimiento de partículas superficiales. Esta propiedad se puede controlar con un espesor de película apropiado.

CAPITULO 4: OBSERVACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

4.1 Generalidades

Cuando las mezclas asfálticas se incorporan a un pavimento como carpeta de rodadura, se acopla a un sistema estructural que trabaja en conjunto, disipando los esfuerzos de manera que las deformaciones verticales aplicadas sobre la sub rasante sean admisibles.

Durante la vida en servicio de una mezcla asfáltica se ha determinado que su comportamiento está relacionado con la respuesta que ofrece ante la deformación permanente o ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga o “piel de cocodrilo”.

4.2 Deformación permanente

Esta falla se presenta como una depresión longitudinal acompañado de pequeño montículos a los lados, generalmente se forma en el lugar donde rueda el flujo vehicular.

Esta falla es el resultado de acumulación de deformaciones remanentes, una vez que la carga es aplicada y luego retirada, la mezcla se deforma de la misma forma, comprime con la carga y se recupera en el ciclo de descarga, pero no se recupera del todo, una pequeña deformación queda. Ver Figura 4.1. Este tipo de falla está íntimamente ligado al contenido de vacíos (menores 4%) y a la viscosidad del cementante asfáltico.



Figura 4.1 Ilustración de una falla por ahuellamiento

Recuperado de: www.scielo.org.co

4.3 Agrietamiento por fatiga

Este tipo de falla se da cuando la compresión aplicada en la superficie genera una tensión en la parte inferior de la mezcla que supera su máxima resistencia, ocasionando grietas que continúan extendiéndose hasta la superficie. Una vez reflejadas en la superficie, el agrietamiento a tal punto de formar una especie de “cuadrícula” conocida comúnmente como piel de cocodrilo. Ver Figura 4.2.

Existen diversos factores que influyen en este mecanismo de falla. Uno de ellos es el sobre peso de los vehículos, induciendo mayores esfuerzos generando agrietamiento prematuro. Otro factor que afecta son los espesores deficientes.



Figura 4.2 Ilustración de una falla severa por agrietamiento por fatiga

Fuente: Alvarez et al, 2009

CAPITULO 5: PARAMETROS QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.

5.1 Introducción

En el análisis de la vida en fatiga de las mezclas asfálticas existe más de un parámetro que lo afecta. Las características tanto del ligante asfáltico como de los agregados influyen en su comportamiento, el conocimiento de estas características y el correcto análisis de estos influirá positivamente en nuestros diseños.

5.2 Tipo y cantidad de asfalto

Diferentes tipos de asfalto como es lógico pensar, presentaran diferentes características, como viscosidad, rigidez, índice de penetración, etc. Estas características influirán en el comportamiento de la mezcla ante la fatiga.

Un asfalto con una alta rigidez y un bajo índice de penetración resultara en una mezcla que requerirá menos asfalto (no será absorbido fácilmente por el agregado), haciéndola económica, pero su rigidez no le brindara un buen comportamiento a la fatiga, ya que no fluirá fácilmente y fallara ante las repetidas solicitudes.

En un estudio (Monismith et al, 1994) se notó que en ensayos de fatiga bajo esfuerzo controlado, el comportamiento a fatiga mejoraba cuando se empleaba asfaltos más flexibles, mientras que en durante el ensayo con deformación controlada se daba lo contrario. Al utilizar un asfalto más rígido los escenarios se presentan de manera opuesta a lo mencionado anteriormente.

La cantidad de asfalto utilizado en la mezcla también es un factor importante que se debe tener en cuenta. Una mayor cantidad de asfalto le permitirá fluir y deformarse sin fallar, pero será víctima de las deformaciones permanentes ante grandes cargas, puesto que le permitirá fluir.

Es importante mencionar que la cantidad de asfalto de una mezcla está relacionado directamente con la cohesión. Las mezclas asfálticas deben diseñarse manteniendo el equilibrio entre cohesión y fricción generada por sus agregados, ambos afectados por el porcentaje de asfalto utilizado. Una mayor cantidad de asfalto resultara en una película de recubrimiento más gruesa, disminuyendo el contacto entre partículas, aumentando la cohesión pero disminuyendo la fricción.

Es necesario aclarar que los esfuerzos de flexo tracción son absorbidos directamente por el asfalto, esto es debido a que la rigidez de los agregados no les permite deformarse. Lo que se resume en: una película más gruesa reducirá los esfuerzos aumentando la vida por fatiga.

Varios investigadores demostraron la existencia de un contenido de asfalto óptimo para un mejor comportamiento a fatiga, el cual depende del tipo de agregado y su gradación. Es un tanto superior al definido por el método Marshall y ofrece una rigidez de mezcla máxima (Jimenez et al, 1962), (Pell, 1962), (Epps et al, 1969).

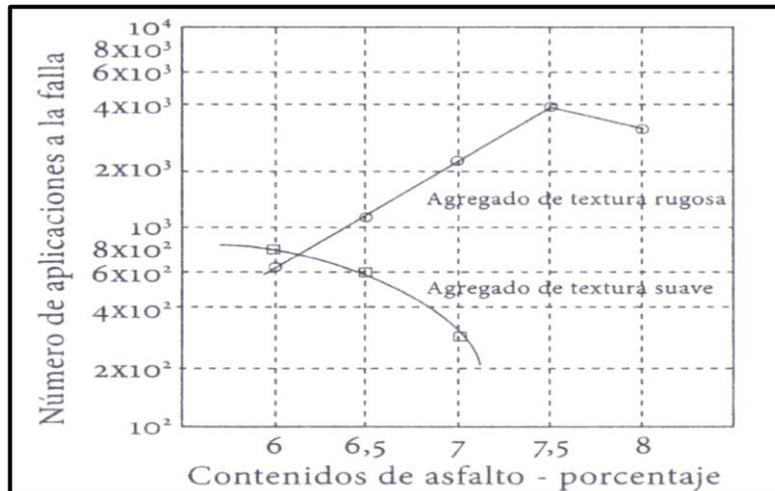


Figura 5.1 Contenido de asfalto vs. Numero de aplicaciones a la falla para dos tipos de agregados

Fuente: Jimenez et al, 1962

Otros afirman que el comportamiento a fatiga es mejor empleando un 0.5% del óptimo de asfalto determinado. (Hsu et al, 1996)

5.3 Granulometría

Este parámetro afecta a la vida por fatiga en menor escala, pero para un mejor comportamiento se recomienda agregados densos y una granulometría gruesa para carpetas asfálticas de grandes espesores y una granulometría más fina para espesores menores.

Estudios realizados (Elliott et al, 1991) muestran que la vida por fatiga se ve afectada mayormente por nivel de compactación (porcentaje de vacíos dentro de la mezcla) que por la granulometría.

5.4 Forma de aplicación de carga en la prueba

Se han definido dos modalidades de aplicación de carga para caracterizar el comportamiento a fatiga en mezclas asfálticas, estos son: bajo deformación controlada y bajo esfuerzo controlado.

La finalidad de realizar estos ensayos es, poder emular el escenario en campo, por lo tanto el conocer bajo qué modo de carga trabaja una mezcla es imperioso.

Se ha determinado una relación entre el modo de carga y el espesor de la capa asfáltica (Monismith, 1996):

- Capas con espesores igual o menor a 5 cm (2 pulgadas) se comportan similar al ensayo bajo deformación controlada. Esto se debe a que la deformación que se da en la fibra inferior debido a la tracción, está en estrecha relación con la rigidez o respuesta resiliente de la capa subyacente.
- Las capas asfálticas de espesores mayores 15 cm (6 pulgadas) se comportan similar al ensayo bajo esfuerzo controlado, ya que debido a los ciclos de carga y descarga su rigidez disminuirá resultando en deformaciones cada vez mayores.
- Las capas asfálticas con espesores entre 5 y 15 cm (2 y 6 pulgadas) tienen un comportamiento intermedio.

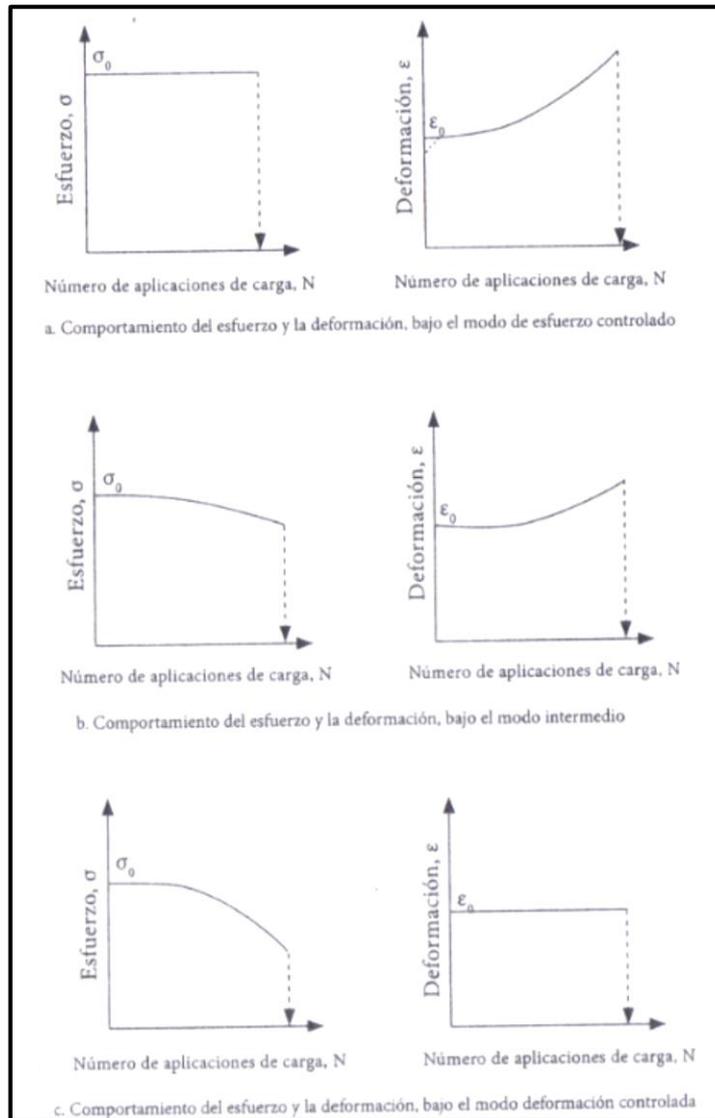


Figura 5.2 Representación esquemática del comportamiento a la fatiga de las mezclas asfálticas con distintos modos de carga.

Fuente: Epps et al, 1972

Durante las investigaciones realizadas se han observado ciertas diferencias en los resultados entre ambos modos de carga, generalmente los ensayo bajo deformación controlada pueden ser hasta 10 veces más largos que bajo esfuerzo controlado, aunque se imponga la misma deformación inicial (Di Benedetto et al, 2004).

La vida a fatiga que se obtiene por la pérdida de la mitad de la rigidez, es distinta a la vida de fatiga que se define por el fallo total de una muestra. El criterio de falla se alcanza antes de la rotura de briqueta (Doan, 1977).

El modo de aplicación de influye también influye en la dispersión de resultados. Estudios afirman que el ensayo bajo esfuerzo controlado presenta menos dispersión que bajo deformación controlada (Epps et al, 1969).

5.5 Efecto del tiempo de receso

Comúnmente durante los ensayos dinámicos la aplicación de carga se realiza de forma constante, aunque este no es el escenario en campo. Cuando las cargas se aplican de forma discontinua permiten tener un “tiempo de receso” a la mezcla, la cual tiende a recuperarse. Su rigidez disminuye con la carga y vuelve a elevarse en el tiempo de receso.

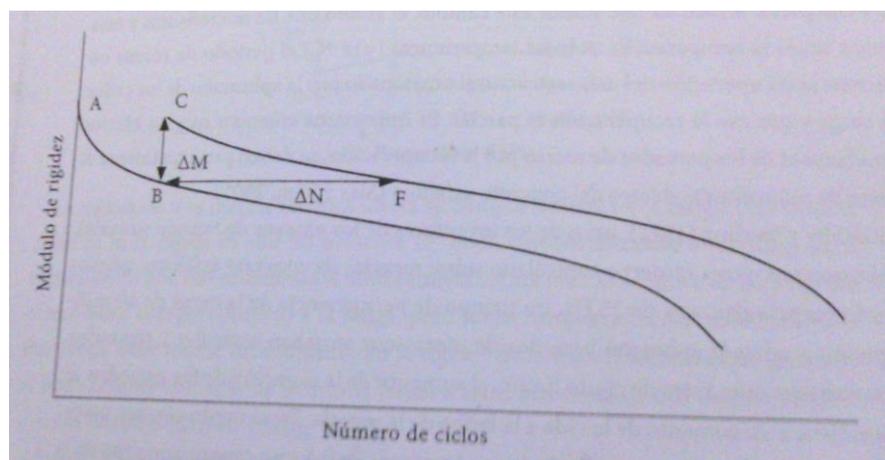


Figura 5.3 Efecto de un intervalo de receso sobre el módulo de rigidez

Fuente: Castro et al, 2006

La recuperación se debe al cierre de micro fisuras, el cual es mayor a temperaturas elevadas ($>15^{\circ}\text{C}$). Si el tiempo de receso es suficiente, la recuperación puede ser total.

5.6 Rigidez de la mezcla

El comportamiento a la fatiga está relacionado de manera inversa con su rigidez. Cuando una mezcla en campo posee una rigidez muy elevada, es un indicador de que presentara una resistencia a la deformación permanente, lo cual es muy bueno, pero, sucederá lo mismo con su comportamiento a fatiga, ya que una elevada rigidez le impedirá deformarse ante la carga lo cual resultará en una fractura de la capa asfáltica.

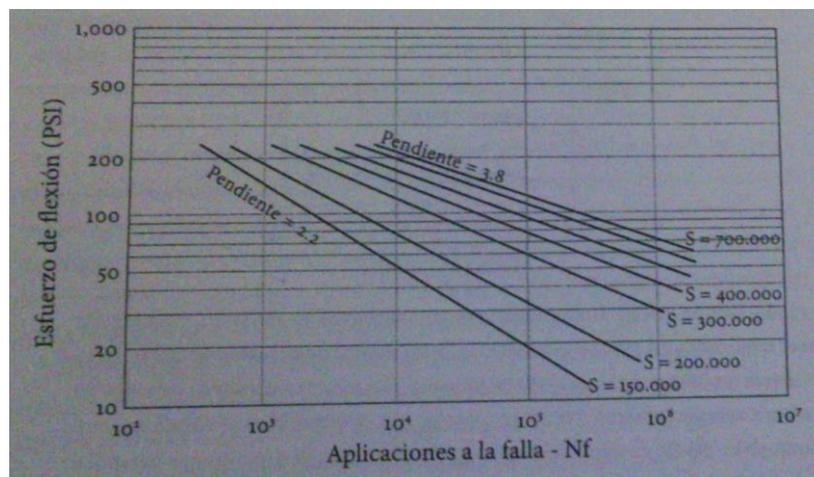


Figura 5.4 Esfuerzo de flexión vs. Numero de ciclos a la falla, para mezcla de diferente rigidez (S)

Fuente: Epps et al, 1969

El ingeniero debe encontrar el equilibrio en la rigidez de la mezcla, tal que resista la deformación permanente como la fisuración por fatiga (Brown et al, 1991)

5.7 Vacíos de aire

Con respecto a los vacíos de aires en las mezclas. Algunos investigadores determinaron que tanto en ensayos bajo esfuerzo controlado, como bajo deformación controlada la vida a fatiga disminuye al aumenta los vacíos de aire (Schimdt et al, 1969).

La resistencia a la fatiga es directamente proporcional al porcentaje de vacíos que posee la mezcla, el cual a su vez depende del nivel de compactación de la mezcla (Ver Figura 5.5). Los vacíos en la mezcla disminuyen considerablemente la resistencia a la fatiga, esto se debe a que los vacíos no pueden absorber esfuerzos.

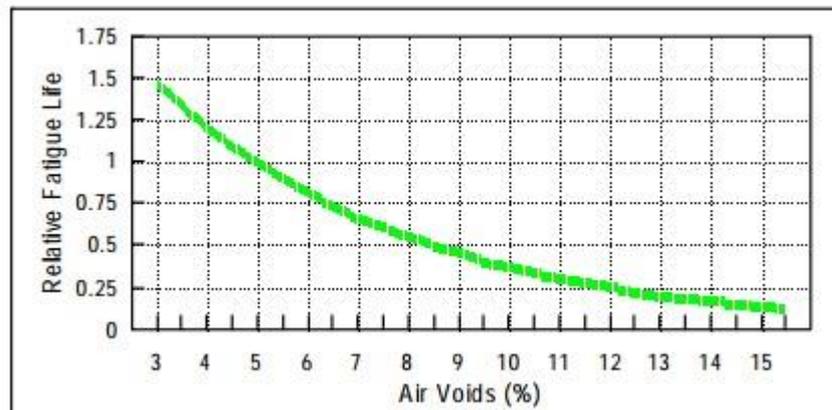


Figura 5.5 Curva de vida de fatiga relativa contra porcentaje de vacios de aire

Fuente: Cossens et al, 1999

5.8 Ecuaciones empíricas

Son las ecuaciones matemáticas que se emplean para predecir el comportamiento a la fatiga, tanto en laboratorio como en campo.

Las ecuaciones calcular el número máximo de aplicaciones de carga que soporta una mezcla antes de la falla con un esfuerzo o deformación aplicado, en función de su rigidez y su composición volumétrica.

La respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas se determina de forma empírica a través de relaciones lineales en gráficos logarítmicos que según la naturaleza del ensayo, se grafica la deformación tensión o el esfuerzo de tracción contra el numero de aplicaciones de carga (N_f).

Los primeros estudios de este fenómeno fueron realizados por Wholer en 1852, por lo cual a la curva a la que se hace relación en el párrafo anterior se la conoce como el diagrama de Wholer (Di Benedetto et al, 2005)

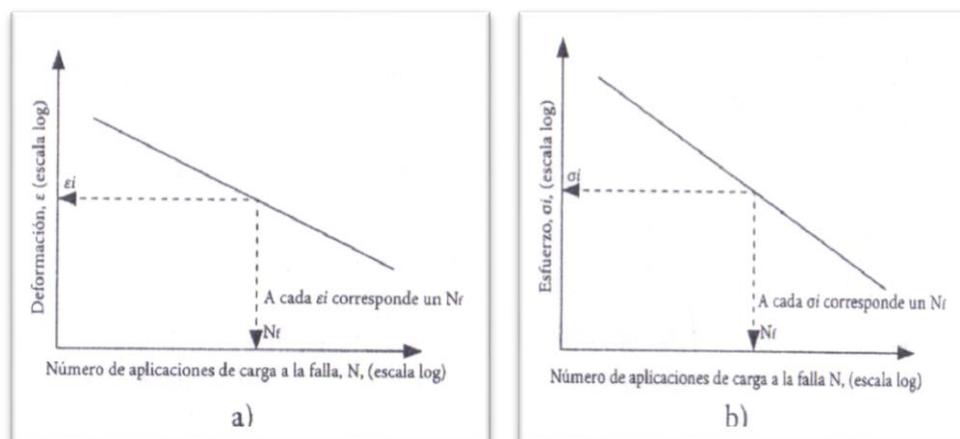


Figura 5.6 Curva de Wholer (ley de fatiga) para ensayos a) bajo deformación controlada y b) bajo esfuerzo controlado

Fuente: Epps et al, 1972

Las curvas se definen por las ecuaciones mostradas a continuación;
 Para ensayos a deformación controlada

$$Nf = K \left(\frac{1}{\varepsilon t} \right)^{K2}$$

Para ensayos a esfuerzo controlado

$$Nf = K \left(\frac{1}{\sigma t} \right)^{K2}$$

Investigador / Instituto	K1	K2
Medina et al (1982)	6.64 x 10 ⁻⁷	2.93
Thompson (1987) / Illinois Department of Transportation	5.0 x 10 ⁻⁶	3
Brown y Pell (1972)	3.8 x 10 ⁻¹⁰	3.8
Majidzadeh et al (1983) / Federal Highway Administration	7.56 x 10 ⁻¹²	4.68
Mamlouk et al (1990) / Arizona Department of Transportation	9.33 x 10 ⁻⁷	3.84

Tabla 5.1 Coeficientes de regresión de la ecuación

Fuente: Rondon et al, 2012

CAPITULO 6: PRUEBAS PRINCIPALES EMPLEADAS.

6.1 Ensayo de tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta fue desarrollado por Thomas Kennedy, es un ensayo que se destaca por su sencillez de ejecución y confiabilidad en sus resultados al mostrar poca dispersión. Este ensayo se utiliza especímenes o briquetas similares a las utilizadas en el ensayo Marshall, siendo sus dimensiones las siguientes: diámetro de 102 ± 1 mm y altura aproximada de 67 mm (depende de la cantidad de material utilizado).

Para la ejecución del ensayo se prepara la biqueta ubicándola en un cabezal Lottman, el cual posee unas barras de superficie que se acopla a la superficie de las briquetas, estas se ubican en lados opuestos, a manera de generatrices. La probeta es sometida a una compresión diametral uniforme, y la velocidad de carga es igual a 50.8 mm/min.

La aplicación de carga mediante el cabezal Lottman genera sobre la biqueta un estado de esfuerzos biaxial de tensiones. A lo largo del eje vertical se puede observar que los esfuerzos son prácticamente constantes, lo cual explica la forma de rotura que tiene el espécimen cuando los esfuerzos superan la resistencia que esta ofrece, el máximo esfuerzo soportado es denominado tensión de rotura.

Aunque en la realidad las mezclas no tienen un comportamiento cien por ciento elásticos, los valores de tensión horizontal se aproximan suficientemente a los reales. El fallo inicial se produce por rotura a tracción, por lo tanto la resistencia a tracción indirecta en el momento de la rotura está dada por la siguiente expresión:

$$St = \frac{2 * Pmax}{\pi * t * d}$$

Donde:

St= resistencia a la rotura por tracción indirecta

Pmax= carga máxima o carga de rotura

t= espesor de la briqueta

d= diámetro de la briqueta

Este ensayo no solo brinda información de la resistencia a tracción indirecta, sino que también es útil para conocer propiedades elásticas resilientes, tales como, módulo de elasticidad estático o dinámico, dependiendo de la naturaleza de la aplicación de carga utilizada durante el ensayo, fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y para evaluar el efecto de la humedad en mezclas.

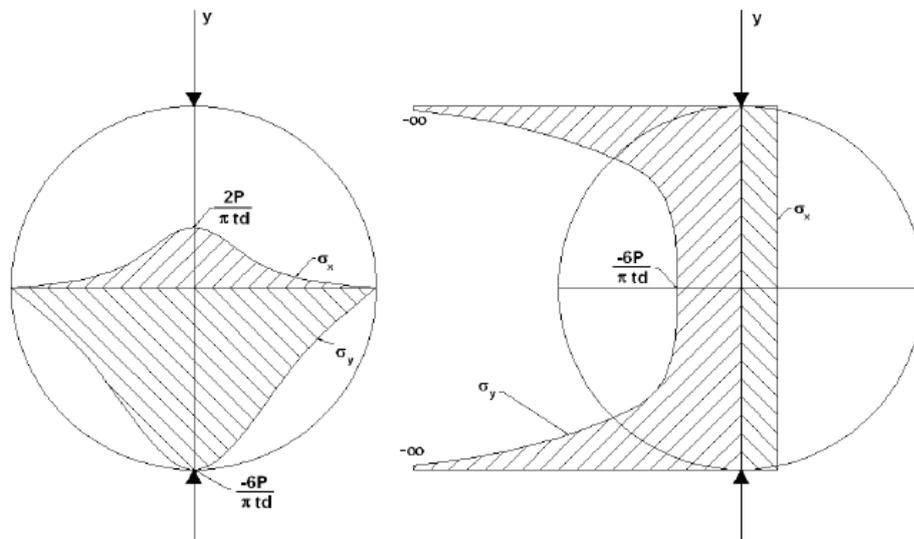


Figura 6.1 Distribución de esfuerzos durante ensayo de tracción indirecta

Fuente: Yoder et al, 1975

Durante los ensayos de tracción indirecta se emplearon 3 briquetas por cada planta y para cada nivel de envejecimiento (0 días y 6 días).

Antes de ensayar las briquetas fueron ambientadas a 20°C durante dos horas y media para asegurar la uniformidad de temperatura en todo el cuerpo del espécimen.

El ensayo se realizó con una prensa de velocidad de recorrido variable (ver figura). La carga se aplicó una velocidad constante de 50.8 mm/min y 1.27 mm/min.



Figura 6.2 Prensa de compresión de la UCSG.

Luego de realizar las primeras pruebas, se decidió implementar el concepto de disipación de energía para las futuras pruebas, para lo cual se implementaron 2 diales adicionales a la prensa. Estos diales midieron los desplazamientos horizontales debidos a la carga vertical aplicada.

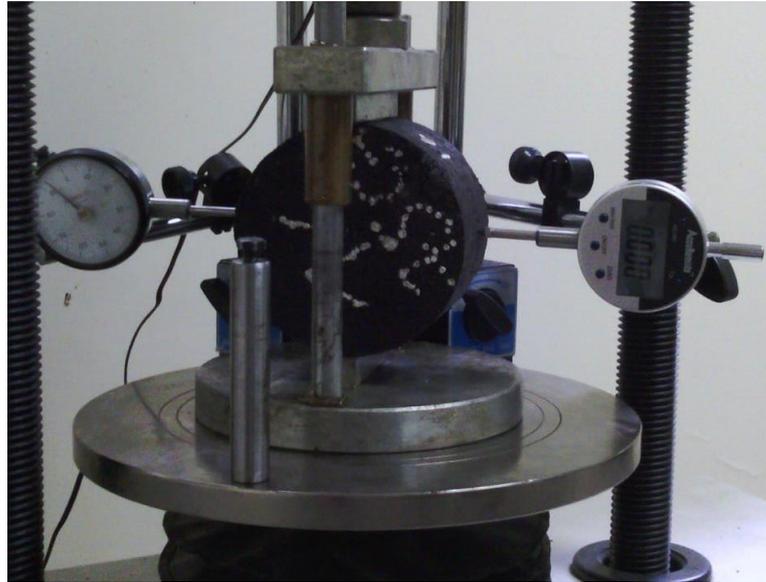


Figura 6.3 Diales para lectura de deformación horizontal en tracción indirecta.

Los ensayos fueron grabados en video para luego poder procesar las deformaciones tanto del anillo de carga como los desplazamientos horizontales. Para estos ensayos se realizaron cortes en las briquetas para conseguir espesores de 50 mm aproximadamente.

6.2 Ensayo de flexión semi-circular (SCB Semi-circular bending)

El ensayo SCB fue utilizado originalmente en rocas, con el tiempo se lo fue adaptando para poder aplicarlo en el diseño y control de calidad de mezclas asfálticas midiendo la resistencia a la tracción.

Esta prueba emplea una muestra semi-circular de espesor variable. Estas muestras pueden ser obtenidas cortando briquetas cilíndricas, las cuales son ubicadas sobre dos apoyos circulares distanciados a $0.8D$, los que le permiten libre rotación durante la prueba hasta que esta alcance su máxima resistencia, y un cabezal circular que se ubica en la parte central superior, por donde se transmite la carga desde la prensa hacia la muestra.

El modo de falla de esta prueba viene dado por un esfuerzo de tracción que se genera en la parte central inferior de la muestra.

En los inicios de este ensayo solo se tendía a cortar la briqueta en forma semi-circular, luego surgió la idea de realizar una pequeña “ranura” en la parte central inferior, la cual induciría un plano de falla. Según estudios (Arabani et al, 2008) la longitud de la ranura es de 6.35mm ($\frac{1}{4}$ ”), ellos también definieron la siguiente ecuación basada en estudios de elementos finitos, la que indica el máximo esfuerzo de tracción que produce el fallo:

$$\sigma_{max} = 4.263 * \frac{P_{max}}{d * t}$$

Donde:

σ_{max} = Resistencia a la tracción (MPa)

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima (N)

t= espesor de la muestra (mm)

d= diámetro de la muestra (mm)

Para las muestras que no tienen ranura la expresión para calcular la resistencia a la tracción es:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 3.564 * \frac{P_{m\acute{a}x}}{d * t}$$

En donde podemos observar que la única variación fue la constante numérica de la expresión mostrada anteriormente.

Es necesario mencionar que en este trabajo las muestras sin ranura se trabajó con una velocidad de 50.8 mm/min (2 in/min), mientras que las muestras ranuradas se empleó 1.27 mm/min (0.05 in/min) tal como lo indica un informe técnico desarrollado en Texas (Walubita et al, 2010)



Figura 6.4 Muestra semi-circular con dial de deformación para ensayo SCB

Los ensayos SCB se llevaron a cabo en la misma prensa de velocidad variable, la cual fue adaptada con el dispositivo adecuado para la colocación de la muestra y aplicación de la carga. (Arabani et al, 2010)

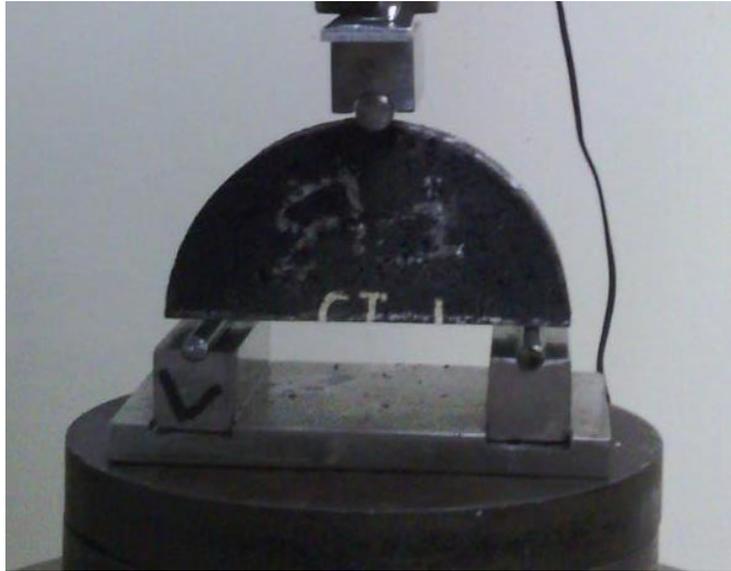


Figura 6.5 Base y cabezal de acero para ensayo SCB.

Para este ensayo se prepararon 40 especímenes semi-circulares de espesor variables. A la mitad de ellos se les ejecuto un corte para crear una ranura de 6.35 mm (1/4") de profundidad. Se trabajó con dos velocidades, las muestras sin ranura se ensayaron a 50.8 mm/min (2 in/min), mientras que las ranuradas se ensayaron a 1.27 mm/min (0.05 in/min).

Los resultados de este ensayo no muestran análisis de energía debido a la gran dificultad de medir con exactitud los desplazamientos horizontales en la zona de falla. Los desplazamientos mostrados son en sentido vertical, el mismo sentido de la carga aplicada.



Figura 6.6 Briquetas para ensayo SCB con diferentes niveles de envejecimiento.



Figura 6.7Proceso de corte de especímenes semi-circulares.



Figura 6.8 Espécimen semi-circular con ranura para ensayo SCB.

6.3 Módulo de rigidez mediante deformación controlada

En el laboratorio de la UCSG contamos con el equipo Nottingham Asphalt Tester modelo NU-10, el cual aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiendo la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. Este equipo utiliza una computadora, junto a un conjunto de programas que permiten desarrollar las distintas pruebas y procesar la información a través de ellos.

Tanto este ensayo de módulo de rigidez como el ensayo de fatiga se realizaron empleando un cabezal de carga de tracción indirecta.

El módulo de rigidez se ensayó a una temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas sinusoidales con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima (tiempo de aplicación de carga) de 0,124 segundos.

En la Figura 6.9 se muestra una salida de resultados.

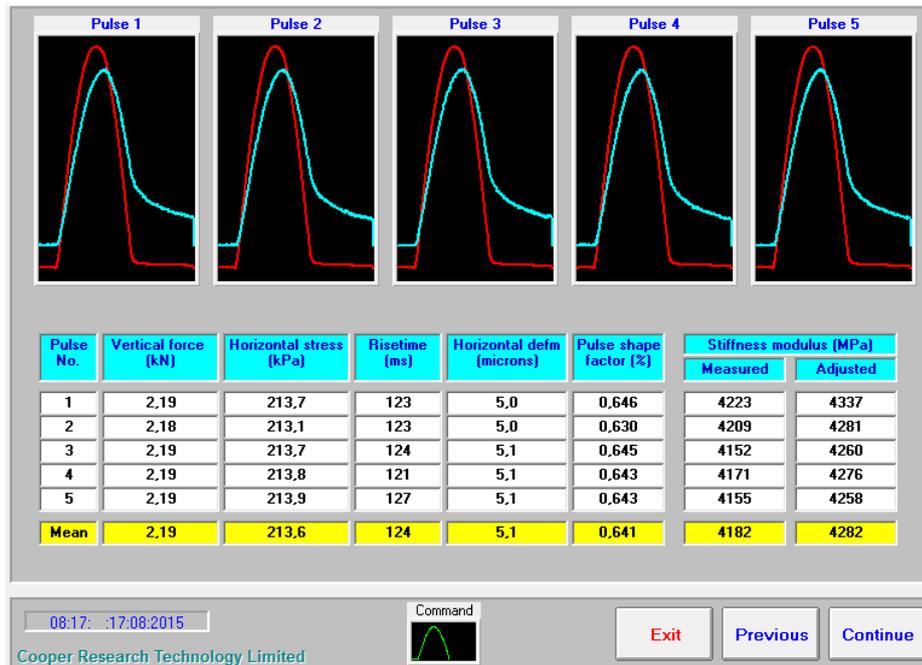


Figura 6.9 Resultado de prueba de módulo de rigidez bajo deformación controlada utilizando el equipo NAT

6.4 Módulo de rigidez mediante carga controlada

Es necesario realizar el ensayo y la determinación del módulo de rigidez mediante el método de carga controlada, antes de ejecutar el ensayo de fatiga, ya que están estrictamente ligados, siendo este módulo un dato para el cálculo de la deformación unitaria que es necesaria para el trazado de los gráficos usuales de “deformación versus número de repeticiones” en las pruebas de fatiga.

6.5 Ensayos de fatiga dinámicos

Para estudiar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se utilizan ensayos de cargas dinámicos, que simulan un estado cercano a la situación a la que estarán sometidos.

Existen algunos factores que afectan el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, que a su vez afectan también la rigidez de la mezcla, tales como los vacíos con aire, tipo y contenido de asfalto, espesor de la capa delgada, propiedades reológicas, características del agregado y granulometría. Es importante también tener en cuenta que ciertos parámetros del ensayo también afectaran los resultados como lo son la magnitud y frecuencia de esfuerzo, periodos de recuperación y temperatura.

Existen dos modalidades de estas pruebas dinámicas, estas son:

Ensayo con desplazamiento controlado

Ensayo con esfuerzo controlado

a.- Ensayo con desplazamiento controlado

En este ensayo la amplitud de desplazamiento o deformación se mantienen constantes, lo que varía durante la ejecución es el esfuerzo aplicado a la muestra. Se determina un nivel de deformación inicial y el esfuerzo ira disminuyendo a lo largo del ensayo, esto se debe a que las repeticiones la muestra se fatigara ofreciendo cada vez menos resistencia para alcanzar el nivel de deformación inicial.

El ensayo termina cuando la muestra falla, o se dice que la muestra llego a su fallo cuando la rigidez es la mitad de la rigidez al inicio del ensayo.

Esta modalidad de ensayo simula muy bien el comportamiento de mezclas asfálticas de espesores menores a 100 mm.

b.- Ensayo con esfuerzo controlado

En esta modalidad de ensayo se define la magnitud del esfuerzo que será aplicado a la muestra, el cual se mantendrá constante durante todo el ensayo. Como resultado las deformaciones irán aumentando, esto se debe a que las constantes repeticiones fatigan la muestra, su resistencia disminuye y ante una misma sollicitación se deformara cada vez más.

El término del ensayo se da cuando la muestra falla o su deformación es el doble de la deformación inicial.

Esta modalidad es más sensible a las variables de la mezcla y representa de mejor el comportamiento de mezclas con espesores mayores a 100 mm.

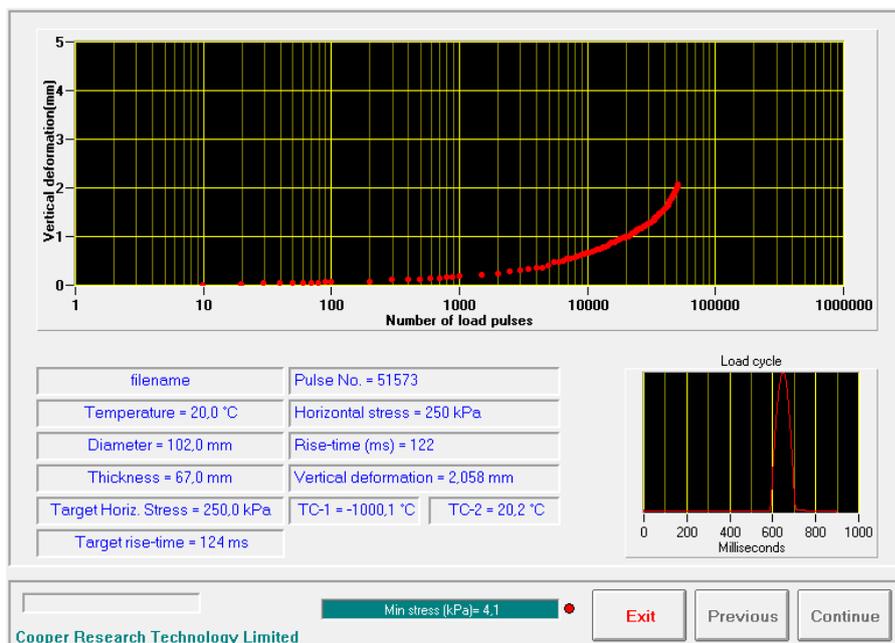


Figura 6.10 Resultado de ensayo de fatiga sobre muestra A15 empleando el equipo NAT

6.5.1 Pruebas de fatiga con el equipo NAT

Los ensayos dinámicos se llevaron en el equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) de la empresa Cooper Research Technology. Ver Figura 7.8



Figura 6.11 Equipo NAT del laboratorio de UCSG

Para llevar a cabo los ensayos de fatiga dinámicos se siguió la “Propuesta de procedimiento de prueba rápida para la evaluación de la tendencia a fatiga” descrita en el trabajo “PROPUESTA DE EXIGENCIAS PARA LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO CON EL EQUIPO NAT EN EL ECUADOR” (Vila et al, 2015), el cual indica que como paso inicial se debe determinar el módulo de rigidez S_m bajo deformación controlada (Ver Figura).

Asumiendo un coeficiente de Poisson de 0.35 y una deformación unitaria de 150 micro – strain calcular el esfuerzo necesario, haciendo uso de la siguiente expresión:

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



Figura 6.12 Ensayo de módulo de rigidez con equipo NAT

El esfuerzo calculado debe aproximarse a valores que el NAT permita (150, 200, 250, etc.), con el esfuerzo aproximado se lleva a cabo una prueba de Modulo de rigidez bajo esfuerzo controlado con el fin de obtener la deformación unitaria correspondiente a dicho modulo y esfuerzo. El ensayo a fatiga se realiza con el esfuerzo aproximado. El comportamiento a fatiga se determinara graficando el nivel de deformación y el número de repeticiones

de carga a la falla, ya sea esta por rotura o por deformación (superior a 5 mm de deformación vertical).

En la Tabla 7.5 se muestran las deformaciones unitarias y el correspondiente número de repeticiones para alcanzar tal nivel de deformación, tanto para mezclas provenientes de plantas como de núcleos recuperados en vías.

Según el criterio expuesto (Vila et al, 2015) si al plotear el resultado de un ensayo, este se ubica encima de la recta (Ver figura) se puede decir que dicha mezcla tendrá un comportamiento bueno ante la fatiga. Si el punto se ubica entre la línea promedio y percentil 15, la mezcla tendrá un comportamiento tolerable. La mezcla tendrá un mal comportamiento si el punto se ubica por debajo de dichas rectas.

REPETI- CIONES	VÍAS		PLANTAS	
	PERCENTIL	PROMEDIO	PERCENTIL	PROMEDIO
DEFORMACIONES UNITARIAS (microstrain)				
500	230	353	386	507
1000	207	298	337	403
5000	154	202	184	239
10000	135	171	147	191
25000	110	138	105	143
50000	89	118	79	115
100000	70	101	59	93
COEFICIENTES DE LAS LEYES DE FATIGA				
a	947,53	1523,73	3850,08	3687,49
b	0,218	0,237	0,359	0,320

Tabla 6.1 Deformaciones correspondientes a los promedios y percentiles 15

Fuente: Propuesta de exigencias de para pruebas de desempeño con el equipo NAT en el Ecuador. (Vila et al 2015)

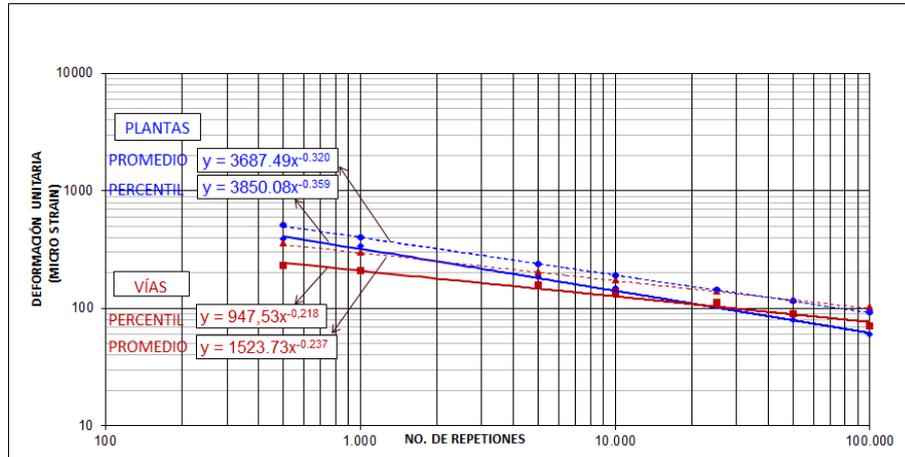


Figura 6.13 Relaciones Nf vs ϵ correspondientes a promedios y percentiles 15

Fuente: Propuesta de exigencias de para pruebas de desempeño con el equipo NAT en el Ecuador. (Vila et al 2015)

CAPITULO 7: TRABAJO BÁSICO EXPERIMENTAL

7.1 Mezclas estudiadas

Para el trabajo experimental se utilizaron cinco mezclas procedentes de cinco diferentes plantas de la región costa, las cuales para este trabajo se denominan las letras A, B, C, D y E, por cada mezcla se confeccionaron 15 briquetas tipo Marshall.

Cada mezcla está compuesta con agregado de diferente naturaleza. El agregado mineral de la mezcla A es basáltico, la mezcla B está compuesta por agregados de tipo pirita, la mezcla C posee un aluvial triturado, la mezcla D es un canto rodado triturado y E está compuesto por calizas.

El asfalto utilizado en las mezclas proviene de la refinería de Esmeraldas, clasificado como un AC-20, que cumple con las normas dispuestas por el MTOP.

7.2 Ensayos rutinarios

7.2.1 Granulometría

Se realizaron ensayos granulométricos a los agregados de cada mezcla. Se utilizaron los siguientes tamices: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #4, #8, #16, #30, #50, #100, #200. Se utilizaron más tamices de los usados normalmente en granulometrías de mezclas asfálticas, esto se realizó con el fin de analizar los contenidos de arena gruesa y fina, y como esto afecta al comportamiento.



Figura 7.1 Juego de tamices para ensayo granulométrico.

TAMIZ		A		B		C		D		E	
ASTM	mm	Pasante (gr)	%								
3/4"	19.1	577.7	100.0	567.4	100.0	531.6	100.0	489.4	100.0	564.6	100.0
1/2"	12.5	559.9	96.9	567.4	100.0	456.6	85.9	471.7	96.4	554.3	98.2
3/8"	9.51	539.6	93.4	530.2	93.4	418.5	78.7	441.6	90.2	515.3	91.3
#4	4.76	365.0	63.2	380.3	67.0	280.5	52.8	311.2	63.6	383.8	68.0
#8	2.36	263.9	45.7	279.6	49.3	199.8	37.6	212.3	43.4	261.6	46.3
#16	1.18	204.0	35.3	219.1	38.6	152.8	28.7	149.2	30.5	192.6	34.1
#30	0.6	159.2	27.6	173.1	30.5	114.9	21.6	100.6	20.6	81.2	14.4
#50	0.3	103.6	17.9	123.4	21.7	66.6	12.5	60.3	12.3	46.8	8.3
#100	0.15	39.1	6.8	76.7	13.5	21.6	4.1	31.8	6.5	21.1	3.7
#200	0.075	15.5	2.7	12.9	2.3	8.5	1.6	16.4	3.4	9.0	1.6
FONDO	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 7.1 Granulometría de las diferentes mezclas en estudio

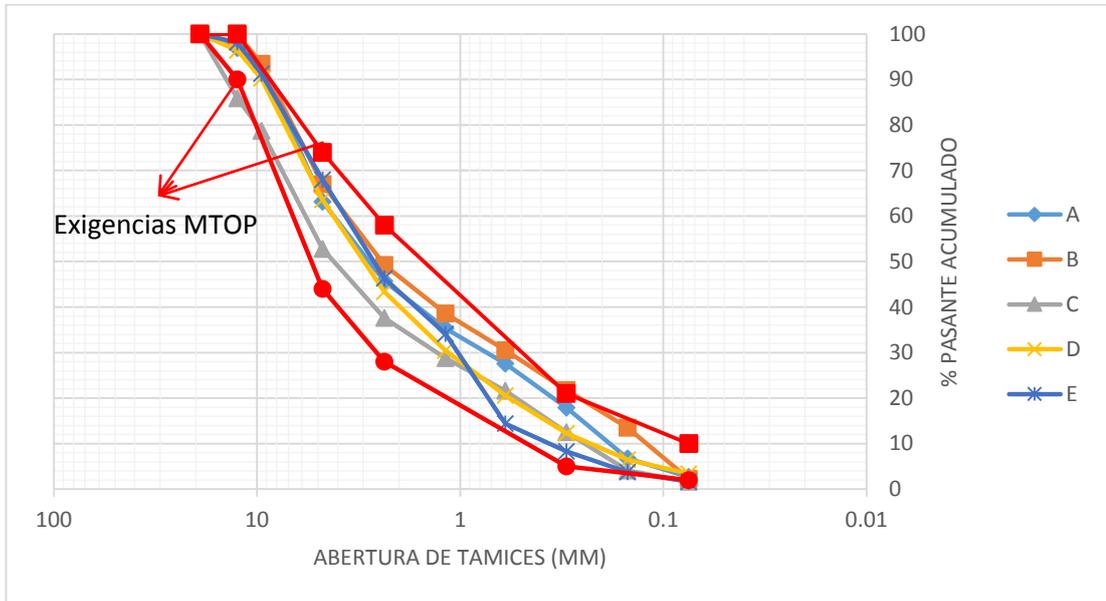


Figura 7.2 Curvas granulométricas de las diferentes mezclas.

7.2.2 Determinación del contenido de asfalto por medio de centrifugación

Se tomaron muestras de cada mezcla de asfalto, las cuales fueron cuarteadas, evitando que los agregados se segreguen, de manera que las cuatro porciones sean lo más similar posible, de lo contrario no sería una muestra representativa de la mezcla. La muestra cuarteada tuvo un peso aproximado de 600 gr.



Figura 7.3 Cuarteo de mezcla para extracción de asfalto.

Para llevar a cabo las extracciones de asfalto se utilizó una centrifuga. Cada lavado se realizó con 500 ml de disolvente. El procedimiento fue el siguiente: se pesó la muestra antes de ensayar, junto con el filtro que se ubica dentro de la centrifuga para evitar fuga de finos lo cual provocara errores. Se ubica la muestra en el plato del equipo, y se vierten los 500 ml de disolvente, procurando que la muestra quede totalmente sumergida. Se dejó reposar 15 minutos. Pasados los 15 minutos se encendió el equipo utilizando una velocidad máxima de 3000 revoluciones por minuto. El procedimiento se realizó 5 veces por muestra (o hasta que el agregado se considere como “limpio” por el encargado del ensayo).



Figura 7.4 Extractor centrifuga HUMBOLDT de la UCSG.

En la siguiente tabla se detallan los resultados de las extracciones de asfalto realizadas:

PLANTA	CONT. ASF.
A	6.2
B	7.0
C	6.0
E	6.4
F	6.5

Tabla 7.2 Contenidos de asfalto de las diferentes mezclas

7.2.3 Densidades y porcentajes de vacíos

Las briquetas fueron medidas para determinar sus espesores respectivos, luego fueron pesadas al aire, saturadas de agua y saturadas

superficialmente secas, todo esto para poder determinar los volúmenes respectivos.

Con ayuda del ensayo RICE se determinaron las gravedades específicas máximas de las mezclas respectivamente. En la tabla 7. Se muestra un resumen de las características promedio como densidad bulk, densidad máxima, porcentaje de vacíos de aire y porcentaje del contenido de asfalto correspondiente a las distintas mezclas estudiadas

PLANTA	RICE	BULK	VACIO (%)	CONT. ASF. (%)
A	2.582	2.486	3.73	6.2
B	2.242	2.153	3.99	7.0
C	2.534	2.429	4.15	6.0
D	2.449	2.327	4.98	6.4
E	2.372	2.259	4.78	6.5

Tabla 7.3 Características volumétricas y contenido de asfalto de las mezclas en estudio

7.3 Determinación de temperatura y nivel de envejecimiento para el estudio

Como punto de partida se decidió buscar una temperatura óptima para llevar a cabo los ensayos, y un envejecimiento representativo basado en el método de envejecimiento en horno según lo indicado en el informe presentado en el SHPR-A-390, el cual indica que un envejecimiento en horno a 85 °C representa aproximadamente 6 a 9 años de mezcla puesta en obra.

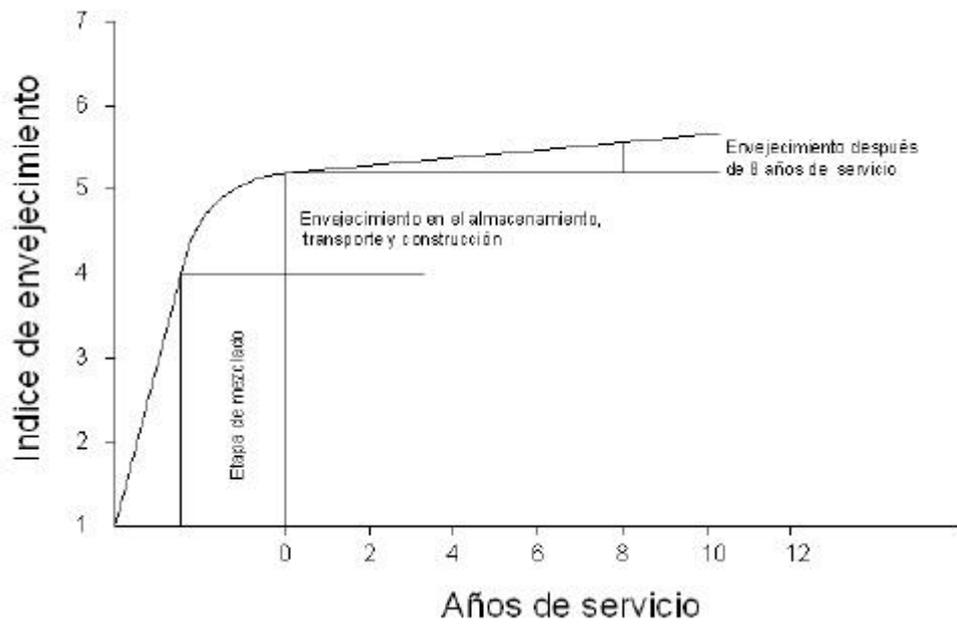


Figura 7.5 Etapas en el proceso de envejecimiento

Fuente: Read et al, 2003

Para llevar a cabo lo antes mencionado se trabajó con un lote adicional de 12 briquetas. Las cuales fueron ensayadas a 20 °C y 5 °C. De la misma forma se definieron tres niveles de envejecimiento en horno a 85 °C, 0, 3 y 6 días de envejecimiento.

CAPITULO 8: RESULTADOS OBTENIDOS.

8.1 Variación de la resistencia a la tracción indirecta con el envejecimiento y temperatura

A continuación se detallan los resultados de los ensayos de tracción indirecta realizados:

Muestra	Espesor (cm)	CARGA (kg)	T.I. (kg/cm ²)	T.I. (MPa)	envejecimiento	TEMP °C
1	6.2	526	5.3	0.52	0	20
2	6.5	513	4.9	0.48	0	20
3	6.3	613	6.1	0.60	3	20
4	6.4	613	6.0	0.59	3	20
5	6.2	609	6.2	0.60	6	20
6	6.4	704	6.9	0.68	6	20
7	6.3	1297	12.9	1.27	0	5
8	6.4	1276	12.5	1.23	0	5
9	6.4	1211	11.9	1.16	3	5
10	6.4	1246	12.2	1.20	3	5
11	6.4	1250	12.2	1.20	6	5
12	6.4	1289	12.6	1.24	6	5

Tabla 8.1 Resultados de ensayo de tracción indirecta a 5°C y 20°C.

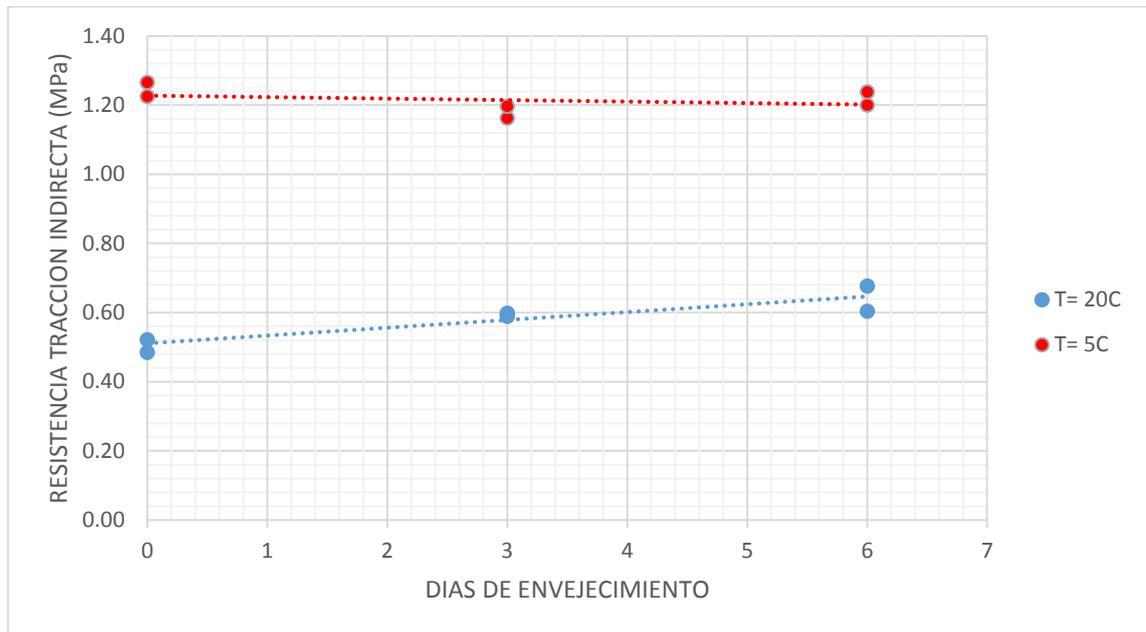


Figura 8.1 Grafico resistencia a tracción indirecta a distintas temperaturas vs. Nivel de envejecimiento

En el grafico se puede apreciar que las briquetas ensayadas a 5°C tuvieron una resistencia bastante uniforme (prácticamente una recta horizontal), lo que se da a entender que la rigidez ganada por la baja temperatura supera a la rigidez por envejecimiento. A partir de tal conclusión se decidió continuar con la investigación utilizando una sola temperatura de 20°C.

Con respecto al nivel de envejecimiento se optó por trabajar con 2 niveles, 0 y 6 días de envejecimiento.

8.2 Resultados de tracción indirecta (T.I.)

Durante los primeros ensayos llevados a cabo solo se reportó el máximo de carga que cada espécimen soportaba.

Los resultados de la resistencia a tracción indirecta se reportan en la tabla 8.1 y tabla 8.2.

Planta	Espe sor	Carga (Kg)	Carga (N)	T.I. (kg/cm ²)	TI (Mpa)	Promedio (MPa)	Des. Estándar	Coef. Variación
A	6.6	583	5718	5.5	0.54	0.54	0.01	1.06
	6.7	591	5802	5.6	0.55			
	6.5	583	5718	5.5	0.54			
B	6.4	587	5758	5.6	0.55	0.54	0.02	2.85
	6.4	561	5504	5.3	0.52			
	6.4	578	5673	5.5	0.54			
C	6.3	535	5246	5.1	0.50	0.53	0.03	4.99
	6.4	587	5758	5.6	0.55			
	6.9	578	5673	5.5	0.54			
D	6.6	387	3796	3.7	0.36	0.35	0.01	3.27
	6.5	365	3582	3.5	0.34			
	6.4	383	3756	3.6	0.36			
E	6.7	622	6101	5.9	0.58	0.53	0.05	8.65
	6.5	561	5504	5.3	0.52			
	6.1	522	5117	5.0	0.49			

**Tabla 8.2 Resultados de ensayo de tracción indirecta sobre briquetas;
v= 50.8 mm/min; sin envejecimiento.**

Plan ta	Espesor (cm)	Carga(Kg)	Carga (N)	T.I. (kg/cm ²)	TI (Mpa)	Promedio (MPa)	Des. Estándar	Coef. Variación
A	6.4	500	4908	4.90	0.48	0.57	0.08	14.13
	6.5	665	6528	6.51	0.64			
	6.5	600	5887	5.88	0.58			
B	6.2	856	8401	8.38	0.82	0.79	0.03	3.90
	6.5	809	7934	7.92	0.78			
	6.2	796	7805	7.79	0.76			
C	6.4	661	6483	6.47	0.63	0.59	0.04	6.81
	6.5	583	5718	5.71	0.56			
	6.4	596	5847	5.84	0.57			
D	6.2	526	5162	5.15	0.51	0.53	0.02	3.47
	6.5	561	5504	5.49	0.54			
	6.5	557	5460	5.45	0.53			
E	6.1	718	7039	7.03	0.69	0.68	0.02	2.88
	6.0	726	7124	7.11	0.70			
	6.2	687	6741	6.73	0.66			

**Tabla 8.3 Resultados de ensayo de tracción indirecta sobre briquetas;
v=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento**

Luego de realizar las primeras pruebas se implementó el concepto de disipación de energía durante el ensayo.

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Hztal (mm) (*)	T.I. (MPa)	EPmáx (N*m)
A	102	50	5117	0.13	0.64	0.50
B			5033	0.08	0.63	0.24
C			4735	0.17	0.47	0.33
D			3582	0.17	0.45	0.40
E			4864	0.18	0.61	0.69

(*) Desplazamiento horizontal a la falla medido en milímetros.

**Tabla 8.4 Resumen de resultados de pruebas T.I; V=50.8 mm/min;
Sin envejecimiento**

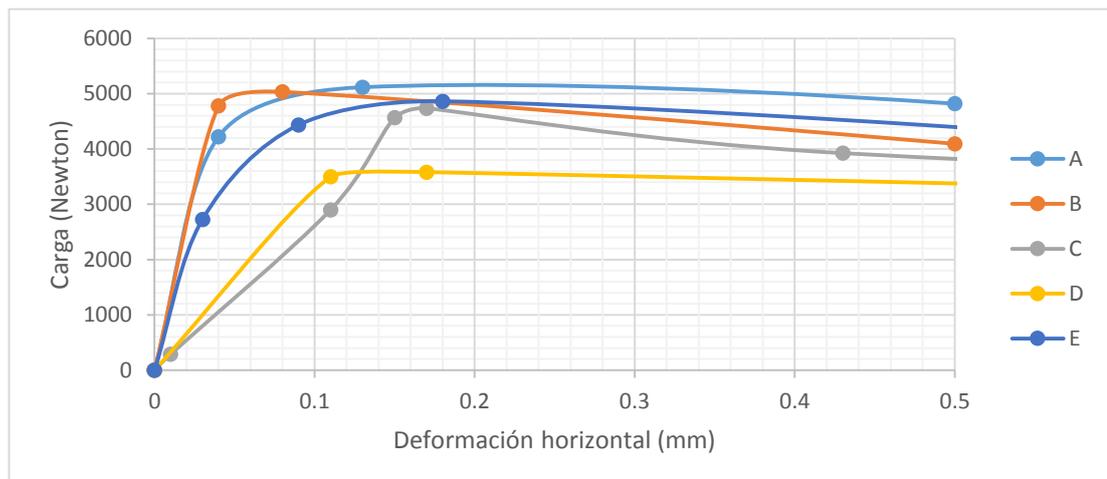


Figura 8.2 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; V=50.8 mm/min; Sin envejecimiento

A		B		C		D		E	
EPmáx	ETotal								
0.50	10.26	0.24	8.24	0.33	7.64	0.40	9.72	0.69	9.92

*Unidades N.m

Tabla 8.5 Energías disipadas a carga máxima (EPmáx) y energías totales (ETotal) durante las pruebas T.I; V=50.8 mm/min; Sin envejecimiento

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Hztal (mm) (*)	T.I. (Mpa)	EPmáx (N*m)
A	102	50	5887	0.17	0.74	0.43
B			7209	0.03	0.90	0.11
C			3925	0.13	0.49	0.40
D			4481	0.13	0.56	0.52
E			5932	0.08	0.74	0.10

(*) Desplazamiento horizontal a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.6 Resumen de resultados de pruebas T.I.; V=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento

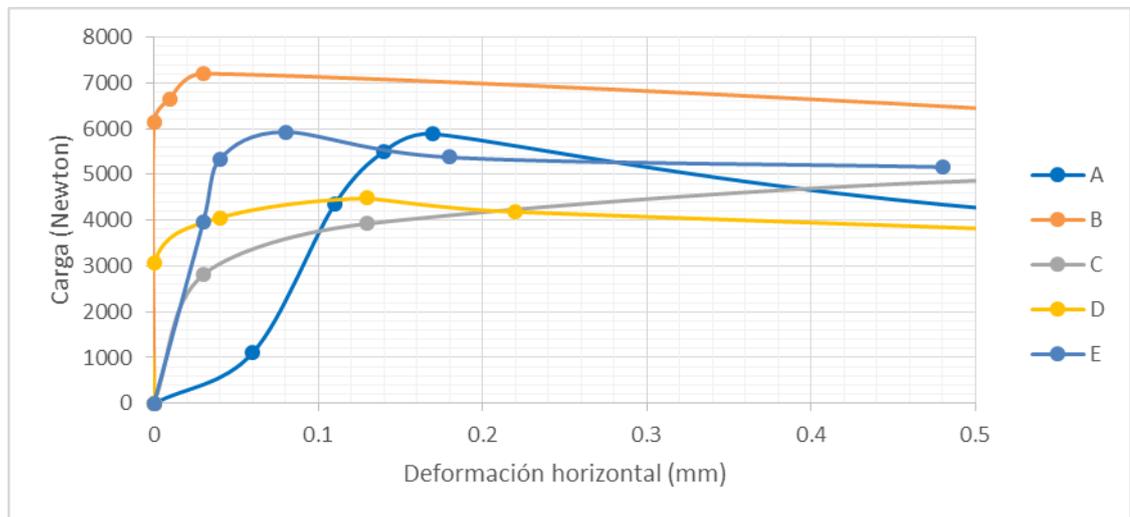


Figura 8.3 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; V=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento.

A		B		C		D		E	
EPmáx	ETotal								
0.43	8.61	0.17	13.27	0.39	10.10	0.52	9.06	0.10	10.23

*Unidades N.m

Tabla 8.7 Energías disipadas a carga máxima (EPmáx) y energías totales (ETotal) durante las pruebas T.I.; V=50.8 mm/min; 6 días de envejecimiento

Por motivos investigativos, se realizaron ensayos de tracción indirecta a una velocidad diferente de 1.27 mm/min, equivalentes a 0.05 in/min.

De la misma manera, se ubicaron dos diales para medir las deformaciones en el sentido horizontal y se grabó en video todo el ensayo hasta que las briquetas fallaron. Luego se procedió a anotar las deformaciones y con ayuda de una hoja de Excel se graficaron los diagramas carga vs. Deformación. Lo que fue útil para los cálculos de energía disipada durante el ensayo.

Cabe mencionar que los resultados que se mostraran a continuación son realizados sobre briquetas sin envejecimiento en horno.

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Hztal (mm) (*)	T.I. (Mpa)	EPmáx (N*m)
A	102	50	2964	0.06	0.29	0.10
B			3115	0.05	0.31	0.07
C			2345	0.15	0.21	0.22
D			2065	0.18	0.21	0.27
E			2363	0.09	0.23	0.13

(*) Desplazamiento horizontal a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.8 Resumen de resultados de pruebas T.I; V=1.27 mm/min; Sin envejecimiento

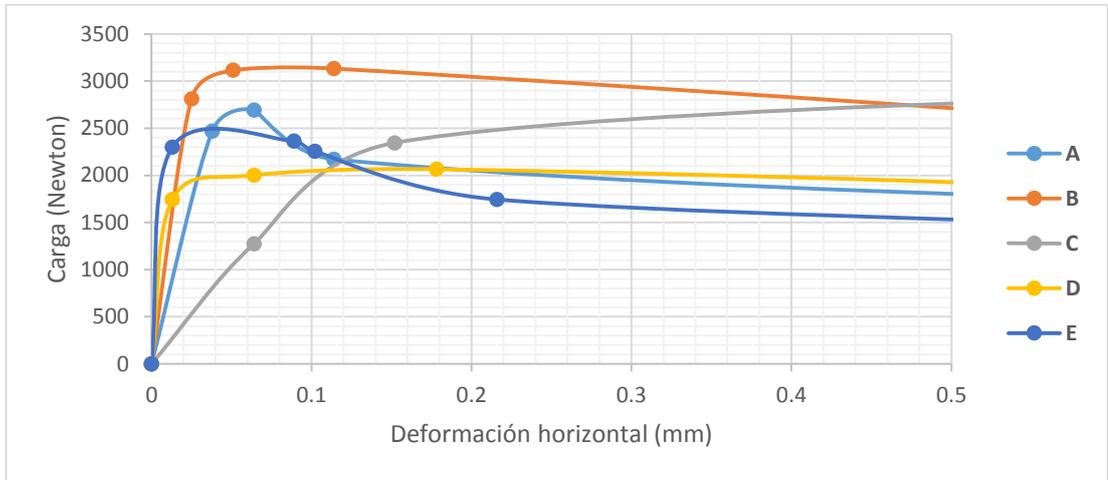


Figura 8.4 Diagrama de carga versus deformación horizontal de pruebas T.I.; V=1.27 mm/min; Sin envejecimiento.

A		B		C		D		E	
EP _{máx}	ET _{total}								
0.10	6.19	0.31	5.83	0.22	7.94	0.27	5.85	0.13	5.46

*Unidades N.m.

Tabla 8.9 Energías disipadas a carga máxima (EP_{máx}) y energías totales (ET_{total}) durante las pruebas T.I.; V=1.27 mm/min; Sin envejecimiento

8.3 Resultados de Flexión semi-circular (SCB Semi-circular bending)

Los resultados de los ensayos se encuentran tabulados en la tabla 8.7:

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Vertical (mm)(*)	Tracción (MPa)
A	102	32	2065	0.93	2.25
B		29	1615	0.08	2.33
C		30	1486	0.44	2.07
D		30	1015	0.89	1.41
E		29	952	0.86	1.37

(*) Desplazamiento vertical a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.10 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; Sin envejecimiento

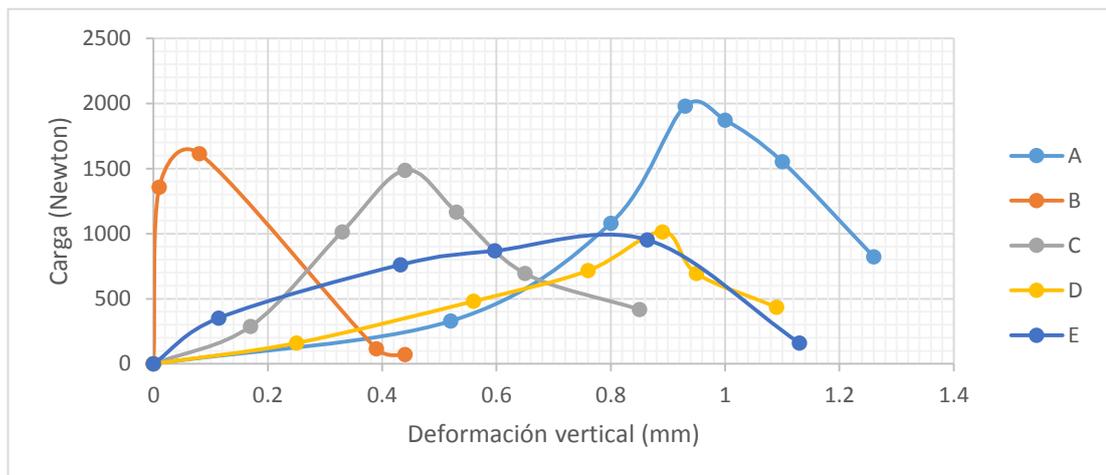


Figura 8.5 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; Sin envejecimiento

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Vertical (mm)(*)	Tracción (MPa)
A	102	32	1744	1.38	2.28
B		27	1357	0.98	1.96
C		31	1486	0.05	2.07
D		31	1104	0.43	1.59
E		28	1357	0.25	2.03

(*) Desplazamiento vertical a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.11 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; 6 días de envejecimiento

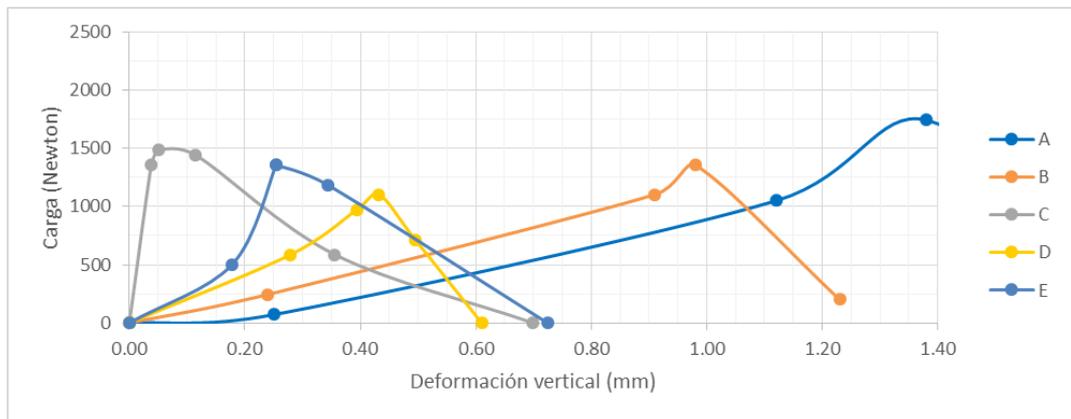


Figura 8.6 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; V=50.8 mm/min; Sin ranura; 6 días de envejecimiento

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Vertical (mm) (*)	Tracción (MPa)
A	102	34	610	0.91	0.75
B		29	441	0.24	0.63
C		30	525	0.42	0.73
D		31	418	0.72	0.56
E		29	610	0.42	0.85

(*) Desplazamiento vertical a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.12 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; Sin envejecimiento

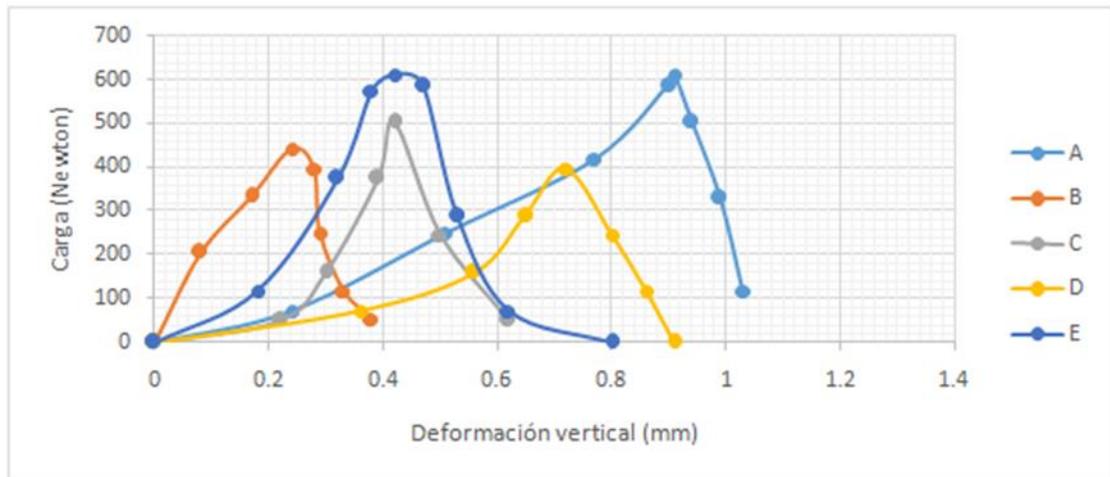


Figura 8.7 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; Sin envejecimiento

Planta	ϕ (mm)	t (mm)	Carga máx (N)	Desp. Vertical (mm) (*)	Tracción (MPa)
A	102	32	610	0.15	0.77
B		30	481	0.19	0.69
C		31	458	0.34	0.64
D		32	374	0.08	0.5
E		30	458	0.34	0.64

(*) Desplazamiento vertical a la falla medido en milímetros.

Tabla 8.13 Resumen de resultados de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; 6 días de envejecimiento

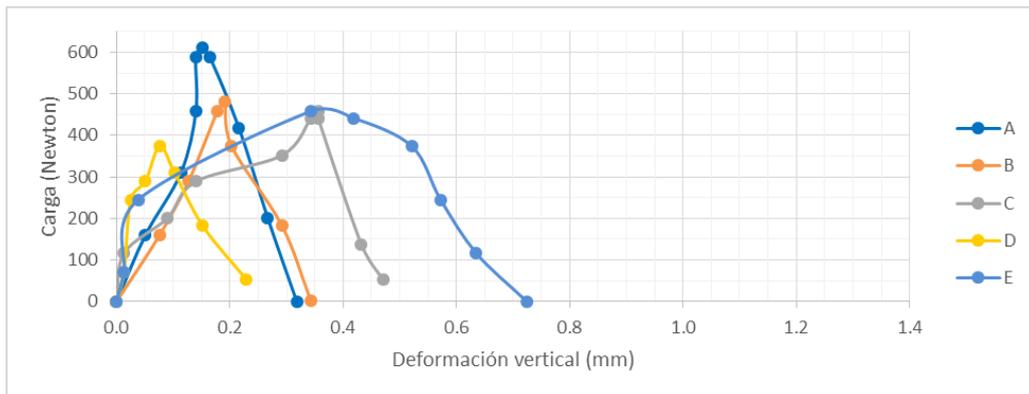


Figura 8.8 Diagrama de carga versus deformación vertical de pruebas SCB; V=1.27 mm/min; Con ranura; 6 días de envejecimiento

8.4 Resultados de las pruebas de módulos de rigidez bajo deformación controlada

Planta	Módulo 1 (MPa)	Módulo 2 (MPa)	Módulo Promedio (MPa)
A	3377	3059	3218
B	4282	4259	4271
C	2606	2465	2536
D	1911	2395	2153
E	2957	2918	2938

Tabla 8.14 Resultados de módulos de rigidez

8.5 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos

Siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 7 se ensayaron 2 briquetas por planta, con la finalidad de poder graficar dos puntos que describan la tendencia de la mezcla. Apegándose al criterio descrito se calificara a la mezclas como satisfactoria, tolerable e inadecuada.

Los resultados de los ensayos se pueden observar en la tabla 8.9:

PLANTA	σ (KPa)	μ (micro strain)	Def. vert (mm)	MDC (Mpa)	MEC (Mpa)	Repeticiones
A	250	157	2.058	3377	3269	51573
B	350	183	FALLO ROTU.	4282	3928	9421
C	200	119	1.989	2606	3458	26821
D	150	149	1.285	1911	2068	18000
E	250	137	1.339	2957	3733	16219

PLANTA	σ (KPa)	μ (micro strain)	Def. vert (mm)	MDC (Mpa)	MEC (Mpa)	Repeticiones
A	400	157	5.085	3059	3381	6091
B	450	199	FALLO ROTU.	4259	4637	3571
C	350	266	5.331	2465	2693	4961
D	350	253	5.134	2395	2841	2201
E	400	264	5.341	2918	3110	3151

*MDC: Modulo bajo deformación controlada

*MEC: Modulo bajo esfuerzo controlado

Tabla 8.15 Resultados de las pruebas de fatiga a baja y alta tensión

Nota: Las flechas presentes en los gráficos representan pruebas que fueron detenidas antes de que ocurriera el fallo, dado a que las repeticiones eran muy altas y los tiempos de ensayo muy prolongados.

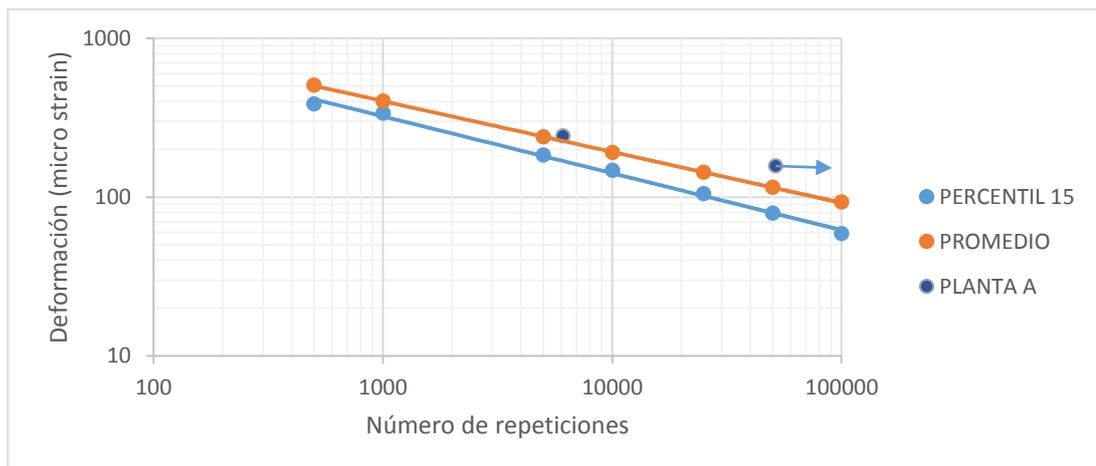


Figura 8.9 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta A

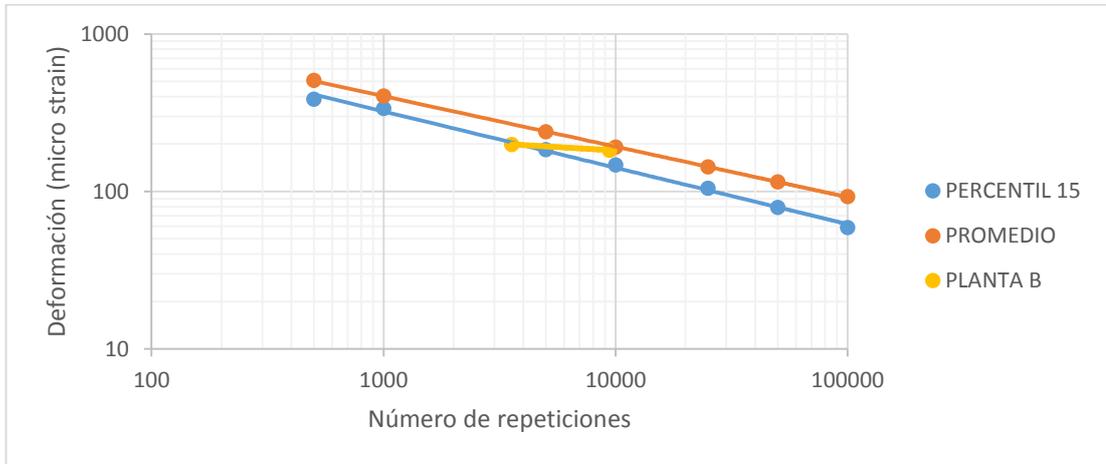


Figura 8.10 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta B

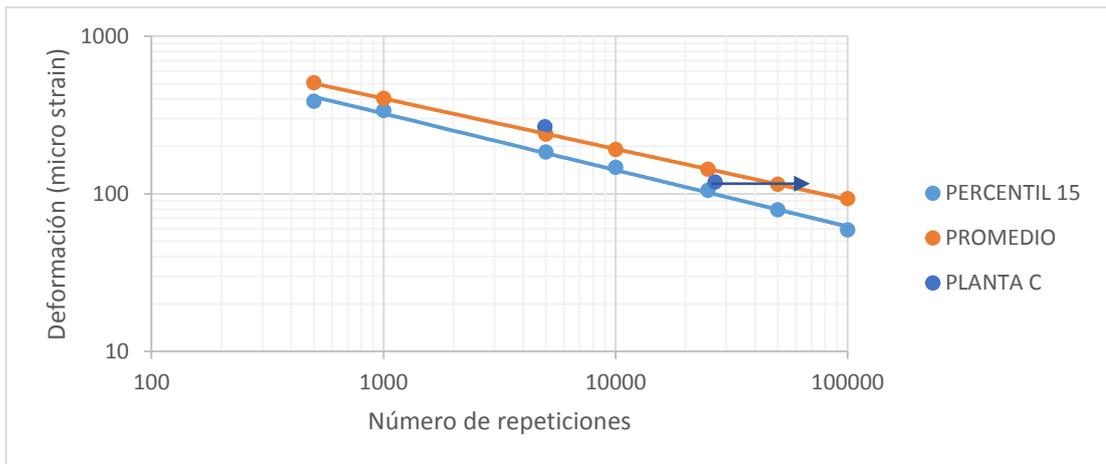


Figura 8.11 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta C

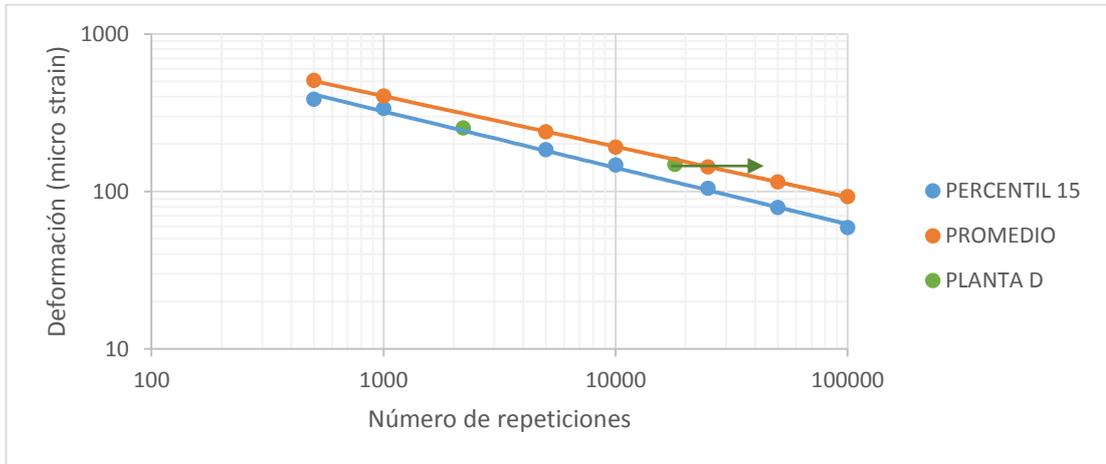


Figura 8.12 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta D



Figura 8.13 Resultados de ensayos de fatiga dinámicos en mezcla de Planta E

CAPITULO 9: ANALISIS DE RESULTADOS.

1.- Como se puede apreciar en la Tabla 8.2, de las cinco plantas estudiadas, el valor más bajo corresponde a la planta D, con un promedio de 0.35 MPa. En las otras cuatro plantas los valores de resistencia no tuvieron una variación significativa.

En la misma tabla se observa que los coeficientes de variación obtenidos son buenos, estando en las plantas A, B, C y D por debajo de 5%. Solo en la planta E el coeficiente de variación es un poco elevado, siendo 8.65%.

2.- En la Tabla 8.3 se observa que los valores de T.I. en todos los casos se elevaron, siendo el más evidente el valor que pertenece a la planta B.

En cuanto a los valores de coeficientes de variación el valor más elevado es 14.13 %, perteneciente a la planta A.

3.- En la Tabla 8.4 se observa que los datos de T.I. ensayados con una velocidad de 50.8 mm/min el valor más bajo corresponde, al igual que en la Tabla 8.2 a la planta D, en este caso con un valor de 0.45 MPa. No obstante, en todos los casos los valores de T.I son ligeramente superiores a los mostrados en la Tabla 8.2.

4.- En la Figura 8.2 se puede apreciar la importancia de graficar y analizar los valores de carga y deformación horizontal que se originan en estos ensayos.

Pueden distinguirse comportamientos desde el origen hasta la carga máxima ($P_{\text{máx}}$) casi lineales en algunos casos y con deformaciones muy pequeñas (caso de la planta B). Este tipo de comportamientos corresponde a mezclas poco dúctiles. Se generan además energías disipadas muy pequeñas, al ser el área bajo la curva igualmente reducidas.

5.- En la Tabla 8.4 se aprecia que las mayores energías disipadas se dan en las mezclas de las plantas A y E, por lo que tienen un comportamiento más dúctil.

Nótese que una mayor $P_{m\acute{a}x}$ o un elevado T.I. no necesariamente implican un buen comportamiento a la fatiga. Pero habría que investigar el peso ponderado de la $P_{m\acute{a}x}$, la deformación horizontal y por ende la energía en dicho comportamiento.

6.- En la Tabla 8.5 puede observarse que no existe una relación general entre los valores de $E_{P_{m\acute{a}x}}$ y E_{Total} . Por ejemplo, la mayor $E_{P_{m\acute{a}x}}$ es de 0.69 perteneciente a la planta E, la misma que presenta un E_{Total} de 9.92 N.m. Sin embargo la E_{Total} mayor obtenida es de 10.26 N.m que pertenece a la planta A, la misma que presenta un $E_{P_{m\acute{a}x}}$ de 0.50 N.m.

7.- En la Tabla 8.8 se muestran los resultados de T.I. bajo velocidad de ensayo de 1.27 mm/min (0.05 in/min). Los valores más altos corresponden a las mezclas de las plantas A, B y C, variando los valores entre 0.25 y 0.31 MPa.

Las plantas E y D ofrecen los valores más bajos: 0.21 y 0.23 MPa respectivamente. Sin embargo, los valores de energía calculados para las plantas A y B son los más bajos, siendo de 0.10 y 0.07 N.m respectivamente. En general los valores obtenidos a esta velocidad son mucho menores a los medidos a velocidades más altas ($v=50.8$ mm/min) que se muestran en la Tabla 8.4.

8.- En la Figura 8.4 se observa que para una velocidad de 1.27 mm/min las pendientes obtenidas entre la carga cero y la máxima son muy grandes comparándolas con las correspondientes en la Figura 8.2. Esta situación implica $E_{P_{m\acute{a}x}}$ menores, lo cual se refleja en los valores mostrados en la Tabla 8.8.

9.- En la Tabla 8.9 no puede establecerse una relación válida entre los valores de $E_{Pmáx}$ y E_{Total} , similar a lo mostrado en la Tabla 8.5 y lo expresado en el numeral 6 de esta sección.

10.- Lo que corresponde a análisis de briquetas envejecidas, en los ensayos de tracción indirecta se observó en la Tabla 8.6 un incremento en la resistencia y un decremento en los desplazamientos, lo que se puede interpretar como una rigidización de la mezcla debido a la oxidación del ligante asfáltico. Se pudo apreciar que aun con la rigidización generada por el envejecimiento las mezclas de las plantas A, C y D fueron las que disiparon mayor energía, y tal como se observó en la Tabla 8.2 la planta B presenta buenas resistencias pero no logra un buen nivel de deformación.

11.- En la Tabla 8.10 y en la Figura 8.5 se observa que la resistencia a la tracción en los ensayos SCB a una velocidad de 50.8 mm/min y sobre muestras sin ranura, los valores más altos pertenecen a las plantas A, B y C. Pero en la figura mencionada se aprecia la gran diferencia entre los comportamientos siendo el mejor el perteneciente a la planta A, que admite deformaciones de 0.93mm.

12.- En la Tabla 8.12 y Figura 8.7 se muestran los resultados de las pruebas SCB con ranura a velocidad de 1.27 mm/min. Los valores obtenidos son menores a los correspondientes a la Tabla 8.10. Si bien las 3 primeras plantas tienen buenos resultados, el valor máximo de resistencia a la tracción lo ofrece la planta E, justo la que ofreció menor resistencia en la Tabla 8.10. Precisamente el comportamiento de la planta E es el que origina las mayores diferencias de comportamiento mostrados en las Figuras 8.5 y 8.7.

13.- En cuanto al análisis de las briquetas envejecidas para el ensayo SCB (Tabla 8.11 y 8.13), se puede decir que no está bien definido. Posiblemente debido al modo de envejecimiento, y a la densidad de las briquetas.

14.- Analizando los módulos de rigidez de las distintas mezclas que se observan en la Tabla 8.14 se pudo confirmar que la mezcla proveniente de la planta B es la de mayor rigidez, dicha mezcla presento en general grandes resistencias tanto en T.I. como en SCB pero admite poca deformación antes de alcanzar la falla.

15.- Según el criterio mostrado en la “Propuesta de exigencias para las pruebas de desempeño con equipo NAT” (Vila et al, 2015) se confirma que módulos entre 2500 y 4000 MPa producirán buenos comportamientos a fatiga.

De acuerdo a la calificación de las mezclas según su comportamiento a la fatiga en fase de prueba por el MTOP del Ecuador (Vila et al, 2015) los resultados obtenidos en las pruebas de fatiga que aparecen graficados desde la Figura 8.9 hasta 8.13, pueden calificarse como:

Planta	σ bajo (MPa)	σ alto (MPa)	Calificación general
A	Bueno	Bueno	Bueno
B	Tolerable	Malo	Tolerable a malo
C	Tolerable a bueno	Bueno	Tolerable a bueno
D	Tolerable a bueno	Tolerable	Tolerable a bueno
E	Tolerable a bueno	Tolerable	Tolerable a bueno

Tabla 9.1 Calificación del comportamiento de las mezclas a la fatiga

A partir de la calificación general obtenidas por las pruebas de fatiga, la cual se tomará como referencia pudiera estimarse de manera aproximada la calificación que ofrecería para cada planta los diferentes ensayos realizados. Esta comparación solo es válida para mezclas sin envejecimiento.

Las comparaciones se muestran en las tablas a continuación:

T.I. V= 50 mm/min. Sin envejecimiento.				
Planta	T.I.	EP _{máx}	CALIF. GRAL	COINCIDENCIA
A	B	B	B	SI
B	B	M	T-M	SI
C	T	T	T-B	SI
D	T	T	T-B	SI
E	B	B	T-B	SI

Tabla 9.2 Comparación de comportamientos a fatiga y a T.I. con v=50.8mm/min, sin envejecimiento

T.I. V= 1.27 mm/min. Sin envejecimiento.				
Planta	T.I.	EP _{máx}	CALIF. GRAL	COINCIDENCIA
A	B	M	B	NO
B	B	M	T-M	NO
C	T	T	T-B	SI
D	T	B	T-B	SI
E	T	T	T-B	SI

Tabla 9.3 Comparación de comportamientos a fatiga y a T.I. con v=1.27mm/min, sin envejecimiento

SCB V= 50 mm/min. Sin envejecimiento. Sin ranura.				
Plantas	Tracción	Curva	CALIF. GRAL	COINCIDENCIA
A	B	B	B	SI
B	B	M	T-M	NO
C	T	T	T-B	SI
D	M	B	T-B	NO
E	M	B	T-B	NO

Tabla 9.4 Comparación de comportamientos a fatiga y SCB con v=50.8mm/min, sin envejecimiento, sin ranura

SCB $v=1,27$ mm/min. Sin envejecimiento. Con ranura.				
Plantas	Tracción	Curva	CALIF. GRAL	COINCIDENCIA
A	B	B	B	SI
B	T	M	T-M	SI
C	B	T	T-B	SI
D	T	B	T-B	SI
E	B	T	T-B	SI

Tabla 9.5 Comparación de comportamientos a fatiga y SCB con $v=1.27$ mm/min, sin envejecimiento, con ranura

16.- La revisión bibliográfica realizada nos permitió conocer resultados de investigaciones con las pruebas empleadas (Walubita et al, 2010). Al respecto es importante comentar que a pesar de que dichas pruebas se hicieron a 25 °C, los resultados obtenidos por estos investigadores tanto en T.I. como en SCB, son mayores a los nuestros.

TEXAS				
Ensayo	T (°C)	v (mm/min)	Desp. Falla (mm)	Tracción (MPa)
T.I.	25	50.8	0.38 - 0.51	0.69
SCB		1.27	2.54 - 3.05	0.83

UCSG				
Ensayo	T (°C)	v (mm/min)	Desp. Falla (mm)	Tracción (MPa)
T.I.	20	50.8	0.08 - 0.18	0.64
SCB		1.27	0.42 - 0.91	0.85

Tabla 9.6 Cuadro comparativo con estudios similares

CAPITULO 10: CONCLUSIONES

1.- En las pruebas realizadas para la evaluación de la resistencia a la tracción en las mezclas asfálticas, tanto por tracción indirecta (T.I.) como por flexión semi circular (SCB), queda mostrado la especial importancia que tienen el graficar y analizar la curva carga versus deformación.

Una elevada resistencia a la tracción puede ser una condición necesaria pero no suficiente para el buen comportamiento a la fatiga, incluso mezclas con menor resistencia pero que admiten mayores deformaciones, es decir: más dúctiles, pueden ser preferibles.

En el caso de la prueba de T.I. el área bajo la curva de carga versus deformación se asocia a la energía disipada para la fractura.

No obstante, el establecimiento de exigencias respecto a la carga o resistencia y a la deformación debe corresponder a futuras investigaciones.

2.- Se confirmó que existen relaciones entre los ensayos monotónicos estudiados y el ensayo dinámico de fatiga tomado como referente con el quipo NAT, que pudieran permitir estimar el comportamiento a la fatiga en las mezclas.

Sin embargo, estas relaciones pudieran ser más o menos precisas, en función de las condiciones de ensayos empleadas. En las variantes de ensayos monotónicos consideradas, las mejores predicciones del comportamiento a la fatiga lo darían las pruebas de T.I. a 50.8 mm/min, y en el caso del SCB a 1.27 mm/min con muestras ranuradas, ambas pruebas a 20°C y graficando los diagramas carga versus deformación.

3.- Comparando los valores de deformaciones en la Tabla 9.6 se observa un bajo nivel de deformación por parte de las mezclas estudiadas en este trabajo antes de alcanzar la falla. Esto afecta directamente a la vida a fatiga

de las mezclas, exponiendo un posible problema de los asfaltos a nivel nacional.

CAPITULO 12: BIBLIOGRAFÍA

ASEFMA. IV Jornada Nacional. Madrid. 2009. - Asphalt Institute. "MIX DESIGN METHODS FOR ASPHALT CONCRETE" MS-2. Sixth Edition.

E.R.Brown, P.S.Kandhal. "PERFORMANCE TESTING FOR HOT MIX ASPHALT". Auburn University. NCAT Report 01-05. 2001.

T.W.Kennedy. "TENSILE CHARACTERIZATION OF HIGHWAY PAVEMENT MATERIALS". University of Texas at Austin. 1983.

TRB. "NEW SIMPLE PERFORMANCE TEST FOR ASPHALT MIXES". Transportation Research Circular. 2004.

R. Vila. "CRITERIOS PARA MEJORAR LOS CONTROLES RUTINARIOS DE CALIDAD A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS". XIV CILA. 2007.

H. Yang "PAVEMENT ANALYSIS AND SYSTEMS". Mc Graw-Hill. 1995.

Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes. Quito. Ecuador.

NCAT. (2009). "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction". Third Edition. U.S.A.

Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; González; L.A.; Vázquez S. E. (2012). Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas. Bogotá – Colombia: Editorial UD. Primera Edición.

Arabani, M., & Ferdowsi, B. (2008). Evaluating the semi-circular bendign test for HMA mixtrues.

Eselfl, M. A., Mohammad, L. N., Yung, H., & Cooper, S. I. (2008). Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures.

Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. B., & Chavez, J. M. (2012). Efecto of temperature on indirect tensile strength test of asphalt mixtures. Brasil.

Walubita, L. F., Umashankar, V., Hu, X., Jamison, B., Zhou, F., Sculhon, T., . . . Dessouky, S. (2010). New generation mix designs: Laboratory testing and construction of the APT test sections.

Vila R., R., & García C., G. P. "Propuesta de exigencias para las pruebas de desempeño con equipo NAT en el Ecuador" 9no Congreso Mexicano del Asfalto. Agosto 2015. Cancún, México.

Garnica A., P., Delgado A., H., José, G. L., Romero, S., & Alarcón O., H. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Querétaro.