

Agradecimientos

Quisiera aprovechar este espacio para agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado en la culminación de este proyecto.

Primeramente a mis tutores Ramón Botella Nieto y Félix Pérez Jiménez por darme la oportunidad de realizar este trabajo y guiarme en su consecución. A Ramón en especial, por la accesibilidad y amabilidad con la que me dedicó tiempo en las últimas semanas.

Un agradecimiento muy especial a Cris, por estar siempre conmigo, sin ella esto no hubiera sucedido.

A Piti y Nene por una amistad incondicional y por todo el apoyo que nos brindaron para que pudiéramos estar aquí.

A don Bernardo y doña Maneno por toda la ayuda que nos dieron en estos dos años.

A mis padres y hermanos por siempre creer en mí.

Al resto de mi familia y a mis amigos por estar siempre pendientes de mi progreso.

Finalmente a aquellas personas que ya no están aquí, pero siguen estando en mi corazón. Gracias por todo.

Estudio de la propagación de fisuras en mezclas bituminosas mediante el ensayo EBADE.

Autor: Carlos Federico Coronado Dejuk

Tutores: Ramón Botella Nieto y Félix-Edmundo Pérez Jiménez

RESUMEN

La fisuración por fatiga es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos bituminosos. Este fenómeno se da por la repetida acción de cargas de tráfico y por los cambios térmicos a los que se ve sometido el firme durante su vida útil. Es por esto que caracterizar correctamente su comportamiento es de vital importancia para el adecuado dimensionamiento de los firmes.

Existen diversos ensayos de laboratorio que intentan simular el comportamiento de las mezclas bituminosas durante el proceso de fatiga. El ensayo más comúnmente utilizado es el de flexotración en 4 puntos. Este es un ensayo de amplitud de deformación constante, y debido a esto presenta el inconveniente de requerir numerosas pruebas de ensayo de muy extensa duración, para poder definir una ley de fatiga del material.

Debido a esto, el Laboratorio de Caminos de la UPC ha creado un nuevo procedimiento de ensayo de fatiga llamado EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones). Este ensayo evalúa el comportamiento de la mezcla bituminosa mediante la obtención de tres parámetros que la caracterizan: la deformación crítica, el módulo inicial y el endurance limit (límite de resistencia a la fatiga). El ensayo se realiza mediante la aplicación de cargas cíclicas de amplitud de deformación ascendente, de manera que se lleva a la muestra al fallo en mucho menos tiempo que los ensayos de flexotración.

En el presente trabajo se estudió como se propaga la fisuración en una capa de pavimento bituminoso empleando los parámetros obtenidos con el ensayo EBADE. Estos fueron utilizados en un proceso iterativo en que se modeló la capa de pavimento bituminoso como una estructura multicapa. Durante el proceso se aplicaron cargas tipo sobre la estructura para obtener los estados tensionales en varios puntos de la misma. Estos estados fueron relacionados con los parámetros del ensayo EBADE y de esta manera se pudo describir la evolución de la fisura, y del módulo en todo el interior de la mezcla.

El proceso iterativo del presente estudio es apenas una aproximación inicial y cualitativa, sin embargo con este se pudo comparar como se propaga la fisura por mezclas bituminosas de diferentes espesores. También, se pudo obtener un espesor mínimo con el cual la mezcla fallaría de manera casi inmediata.

Palabras Clave: Mezclas bituminosas, Fisuración, Fatiga, Ensayo Barrido de Deformaciones, deformación crítica.

Study of crack propagation in asphalt mixtures using the EBADE test.

Autor: Carlos Federico Coronado Dejuk

Tutores: Ramón Botella Nieto y Félix-Edmundo Pérez Jiménez

ABSTRACT

Fatigue cracking is one of the most common damage mechanisms in asphalt pavements. This phenomenon occurs by the repeated action of traffic loads and thermal changes acting over the pavement during its useful life. This is why a proper characterization of its behavior is vital for the proper sizing of the pavement layers.

There are several laboratory tests that attempt to simulate the performance of asphalt mixtures during fatigue. The most commonly used is the 4 point bending test. It is a constant strain amplitude test and, therefore it has the disadvantage of requiring many a lot of extensive tests, in order to define a fatigue law of the material.

Because of this, the Road Research Laboratory of the Technical University of Catalonia, has created a new fatigue test procedure called EBADE (Ensayo de BArrido de Deformaciones in Spanish). This is a strain sweep test that evaluates the behavior of the asphalt mixture by obtaining three parameters that characterize it: the failure strain, the initial modulus and the endurance limit. The procedure is based on applying increasing strain amplitude cyclic tests, so that the sample goes to failure in much less time than the bending test.

The present thesis studied the crack propagation in a layer of asphalt pavement using the parameters obtained with the EBADE test. These parameters were used in an iterative process where the bituminous pavement layer was modeled as a multilayer structure. During the process, load types were applied over the structure in order to compute the stresses and strains at some points of the structure. These strains were used with the EBADE test parameters in order to describe the modulus and crack evolution throughout the interior of the mixture.

The iterative process used on this study is just a qualitative initial approach, however with it was able to compare how the crack propagates through asphalt mixtures of different thicknesses. Also, it was possible to obtain a minimum thickness value with which the mixture fails almost immediately.

Palabras Clave: Asphalt mixtures, Cracking, Fatigue, strain sweep test, failure strain.

Índice general

Índice de figuras.....	iv
------------------------	----

Índice de tablas.....	vii
-----------------------	-----

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	5
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE FIRMES.....	6
2.2.1 Definición y conceptos generales.....	6
2.2.2 Patologías de los firmes	6
2.2.3 Tipología de firmes.....	7
2.2.3.1 Firmes flexibles (base granular)	8
2.2.3.2 Firmes semiflexibles (base bituminosa)	8
2.2.3.3 Firmes semirrígidos (bases tratadas)	8
2.2.3.4 Firmes rígidos (pavimento de hormigón).....	8
2.3 DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES	9
2.3.1 Introducción	9
2.3.2 Métodos experimentales	9
2.3.3 Métodos analíticos.....	10
2.3.3.1 Método basado en sistemas multicapa	10
2.3.3.2 Método basado en elementos finitos	12
2.3.3.3 Método basado en los elementos discretos	12
2.4 MEZCLAS BITUMINOSAS	13
2.4.1 Definición y generalidades	13
2.4.2 Materiales	13
2.4.2.1 Áridos	13
2.4.2.2 Ligante Bituminoso.....	13
2.4.3 Clasificación de las mezclas bituminosas	14
2.4.3.1 Hormigón asfáltico	15
2.4.4 Comportamiento reológico de las mezclas bituminosas	16
2.5 FISURACION EN FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO	17
2.5.1 Introducción	17
2.5.2 Conceptos generales y tipologías.....	18
2.6 FISURACIÓN POR FATIGA	21
2.6.1 Introducción	21
2.6.2 Fatiga en mezclas bituminosas.....	21
2.6.3 Parametros que afectan la vida en fatiga	22
2.6.4 Determinación de la fatiga	23

2.7	ENFOQUES DE CARACTERIZACIÓN DE LA FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS	27
2.7.1	Enfoque Fenomenológico o clásico	27
2.7.2	Enfoque de la Mecánica de la Fractura	27
2.7.3	Enfoque desde la Mecánica del Medio Continuo	29
2.7.4	Enfoque Energético	30
2.7.4.1	Energía disipada inicial (IDE por sus siglas en inglés)	31
2.7.4.2	Energía disipada acumulada (CDE por sus siglas en inglés)	32
2.7.4.3	Relación o proporción de trabajo (WR por sus siglas en inglés)	32
2.7.4.4	Proporción de cambio de energía disipada (RDEC por sus siglas en inglés)	33
2.8	PROCEDIMIENTOS PARA CARACTERIZAR LA FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS.....	34
2.8.1	Introducción	34
2.8.2	Tipos de ensayo	35
2.8.3	Tipo de carga en los ensayos de fatiga.....	36
2.8.4	Modo de control carga de en los ensayos de fatiga.....	37
2.8.5	Criterios de fallo para la determinación de la fatiga en mezclas bituminosas	39
2.8.5.1	El criterio de falla clásico	39
2.8.5.2	El criterio de falla por daño	40
2.8.5.3	El criterio de falla por deformación crítica.....	40
2.8.5.4	El criterio de falla por ruptura (breakage failure criterion en inglés)	42
2.9	ENSAYOS A FLEXOTRACCIÓN.....	42
2.9.1	Ensayo de Fatiga a dos puntos	43
2.9.2	Ensayo de fatiga a tres puntos	43
2.9.3	Ensayo de fatiga a 4 puntos	43
2.10	ENSAYO EBADE	44
2.10.1	Antecedentes	44
2.10.2	Procedimiento del ensayo EBADE	47
Capítulo 3.	ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	50
3.1	INTRODUCCIÓN	50
3.2	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	50
3.2.1	Descripción	50
3.2.2	Procedimiento experimental.....	52
3.2.2.1	Proceso de obtención de parámetros básicos y curvas de caracterización.....	52
3.2.2.2	Proceso iterativo para estudio de propagación de fisuras.....	53
3.3	MATERIALES EMPLEADOS	55
3.4	ENSAYO FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS.....	57
3.4.1	Introducción	57
3.4.2	Descripción	58
3.4.3	Procedimiento	58
3.5	ENSAYO EBADE	59
3.5.1	Introducción	59
3.5.2	Descripción del ensayo.....	60
3.5.2.1	Montaje de la probeta y equipo.....	60
3.5.2.2	Procedimiento	61
3.6	PROGRAMA BISAR3.0.....	63
3.6.1	Introducción	63
3.6.2	Descripción	64
3.6.3	Entorno de trabajo	64
3.6.3.1	Datos de entrada	64

3.6.3.2	Datos de salida	66
Capítulo 4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
4.1	INTRODUCCIÓN	67
4.2	ENSAYO EBADE.....	67
4.2.1	Introducción	67
4.2.2	Curva de tensiones vs números de ciclos.....	67
4.2.3	Curva de Densidad de Energía Disipada vs números de ciclos.	69
4.2.4	Curva de Módulo vs número de ciclos	72
4.2.5	Curva de Módulo vs deformación	73
4.2.6	Resumen de parámetros obtenidos por el Ensayo EBADE.....	74
4.3	ENSAYO FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS.....	75
4.3.1	Introducción	75
4.3.2	Curva de Módulo vs número de ciclos	75
4.3.3	Ley de Fatiga.....	77
4.3.4	Resumen de parámetros obtenidos con el ensayo de flexotracción.....	78
4.4	PROCESO ITERATIVO PARA ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS.....	78
4.4.1	Introducción	78
4.4.2	Caso 1: Espesor total de la capa de mezcla de bituminosa de 9 cms.	79
4.4.3	Caso 2: Espesor total de la capa de mezcla de bituminosa de 13.5 cms.	82
4.4.3.1	Resultados y análisis para 9 subcapas de 1.5cms	82
4.4.3.2	Resultados y análisis para 8 subcapas de 1.5 cms.....	86
4.4.3.3	Números de ciclos de carga totales para el caso 2 (13.5 cms).....	87
4.4.4	Caso 3: Espesor total de la capa de mezcla de bituminosa de 18 cms	88
4.4.4.1	Resultados para 9 subcapas de 2 cms de espesor cada una.	88
4.4.4.2	Resultados para 8 subcapas de 2 cms de espesor cada una	89
4.4.4.3	Resultados para 7 subcapas de 2 cms de espesor cada una	90
4.4.4.4	Resultados para 6 subcapas de 2 cms de espesor cada una.....	91
4.4.4.5	Número de ciclos de carga totales para el caso 3 (18 cms)	92
4.4.5	Comparación de resultados entre los 3 casos de estudio.....	93
4.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL MÉTODO DE DISEÑO CLÁSICO Y EL PROPUESTO EN ESTE ESTUDIO.....	95
4.5.1	Introducción	95
4.5.2	Resultados por el método clásico	96
4.5.3	Comparación entre el método clásico y el propuesto en este estudio.....	97
Capítulo 5.	CONCLUSIONES	99
5.1	ENSAYO EBADE Y FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS.	100
5.2	PROCESO ITERATIVO PARA ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS.....	102
5.3	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	104
Capítulo 6.	BIBLIOGRAFÍA	105

Índice de figuras

Figura 2-1 Estado tensional de un punto del firme según la teoría multicapa [2].....	10
Figura 2-2 Fallo por deformaciones (izquierda), fallo por fatiga (derecha)	11
Figura 2-3 Comportamiento reológico de las mezclas bituminosas	17
Figura 2-4 Tipología de fisuras por localización y características geométricas.....	18
Figura 2-5 Modos de propagación de fisuras según Irwin	20
Figura 2-6 Curva de Wöhler para aluminio con tensión de fallo de 320 MPa	23
Figura 2-7 Leyes de fatiga del Instituto del Asfalto y de la Shell	25
Figura 2-8 Factor de cambio debido al efecto healing.....	25
Figura 2-9 Ciclo de histéresis para un ensayo cíclico de una mezcla bituminosa	31
Figura 2-10 Típico gráfico de evolución del RDEC [22].....	33
Figura 2-11 Estados tensionales producidos por el paso de vehículos [23]	34
Figura 2-12 Ensayos de tracción directa e indirecta	35
Figura 2-13 Ensayos de flexotracción.....	36
Figura 2-14 Carga tipo sinusoidal.....	36
Figura 2-15 Carga tipo haversine	37
Figura 2-16 Cargas tipo discontinuas	37
Figura 2-17 Ensayo controlado a deformación (izquierda) y a tensión (derecha) [26].....	39
Figura 2-18 Fases del proceso de fisuración por fatiga [28]	40
Figura 2-19 Representación del endurance limit en una curva deformación aplicada vs # de ciclos.....	41
Figura 2-20 Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga [30]	41
Figura 2-21 Evolución de la fuerza en función del número de ciclos [26]	42
Figura 2-22 Configuración de carga del ensayo a flexotracción en 4 puntos [23]	43
Figura 2-23 Comportamiento del material en relación a su deformación y su número de Deborah.....	45
Figura 2-24 Incremento de carga en el ensayo LAS (izquierda) y el Reómetro de Corte Dinámico (derecha) [31].....	46
Figura 2-25 Configuración del ensayo a tensión-compresión de Chailleux et al. con la probeta en forma de diábolo [32]	46
Figura 2-26 Configuración del equipo para realizar el ensayo EBADE [30].....	48
Figura 2-27 Caracterización de la fatiga mediante curvas de evolución de las tensiones y deformaciones con el procedimiento EBADE para dos mezclas diferentes a 20°C (izquierda) y 5° C (derecha) [30].....	48
Figura 3-1 Esquema de los datos de entrada y del Proceso Iterativo para estudio de propagación de fisuras con el programa BISAR 3.0 y los resultados del ensayo EBADE, y la Ley de Fatiga	54
Figura 3-2 Equipo utilizado para ejecutar el ensayo a flexotracción en 4 puntos	58
Figura 3-3 Montaje del Ensayo EBADE	61

Figura 3-4 Señal de entrada esquematizada para dos ciclos por escalón en el ensayo EBADE.....	61
Figura 3-5 Módulo complejo en la elipse de histéresis.....	63
Figura 3-6 Esquema de carga (izquierda) y entorno de la pestaña “loads” en el BISAR 3.0.....	65
Figura 3-7 Ejemplo de introducción de espesores y módulos para 3 capas en el programa BISAR 3.0.....	65
Figura 3-8 Ejemplo de introducción de las posiciones de cálculo para 3 capas en el programa BISAR 3.0	66
Figura 3-9 Ejemplo de datos de salida en el programa BISAR 3.0, para una estructura de 3 capas.....	66
Figura 4-1 Evolución de las tensiones y deformaciones en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70	68
Figura 4-2 Evolución de la Densidad de Energía Disipada y las deformaciones en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70	69
Figura 4-3 Curvas de tendencia de la densidad de energía disipada y de las deformaciones en el escalón de carga 4 (izquierda) y escalón de carga 5 (derecha).....	71
Figura 4-4 Evolución del valor del módulo en el Ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70	72
Figura 4-5 Variación del módulo en relación a la amplitud de deformación aplicada en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70	73
Figura 4-6 Curvas de evolución del módulo con diferentes amplitudes de deformación en el ensayo a flexotracción en 4 puntos	75
Figura 4-7 Ley de fatiga obtenida con el ensayo a flexotracción en 4 puntos a 20°C para la mezcla AC16S B50/70	77
Figura 4-8 Configuración inicial caso 1.....	79
Figura 4-9 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para cada ciclo de carga hasta el fallo en el caso 1.....	81
Figura 4-10 Propagación de la fisura en cada ciclo de carga hasta el fallo para el caso 1.....	82
Figura 4-11 Configuración inicial caso 2.....	83
Figura 4-12 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para los primeros 13 ciclos de carga en el caso 2.....	84
Figura 4-13 Propagación de la fisura en los primeros diez ciclos de carga para el caso 2.....	85
Figura 4-14 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para los 11 ciclos de la segunda serie de carga en el BISAR 3.0 en el caso 2.....	86
Figura 4-15 Propagación de la fisura para los 11 ciclos de la segunda serie de carga en el BISAR 3.0 para el caso 2.....	87
Figura 4-16 Configuración inicial caso 3.....	88
Figura 4-17 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para 6 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 9 subcapas activas	89
Figura 4-18 Propagación de las fisuras en cada subcapa para 7 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 8 subcapas activas	90
Figura 4-19 Evolución de las deformaciones en cada subcapa hasta el fallo en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 6 subcapas activas	91

Figura 4-20 Propagación de las fisuras en cada subcapa para 9 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 6 subcapas activas	92
Figura 4-21 Curva de ajuste entre número de ciclos de carga al fallo y espesor de la capa.....	94
Figura 4-22 Configuración inicial para los 3 casos siguiendo el método clásico	96
Figura 4-23 Error relativo vs número de subcapas utilizadas en el caso 2	98

Índice de tablas

Tabla 2-1 Tipos de clasificación de las mezclas bituminosas	14
Tabla 2-2 Nomenclatura de los hormigones asfálticos	15
Tabla 3-1 Características de la mezcla AC16S en estudio	55
Tabla 3-2 Husos granulométricos de la mezcla AC16S en estudio.....	56
Tabla 3-3 Característcas del ligante B50/70 utilizado en el estudio.	56
Tabla 3-4 Porcentaje de huecos para una mezcla bituminosa tipo AC S	57
Tabla 4-1 Valores de las tensiones máximas y al 50% de su valor con sus deformaciones asociadas	68
Tabla 4-2 Valores de la densidad de energía disipada máxima y al 50% de su valor con sus deformaciones asociadas	70
Tabla 4-3 Valor de la deformación crítica y del endurance limit con su densidad de energía disipada y tensión asociada	71
Tabla 4-4 Valor del módulo inicial con el ensayo EBADE	72
Tabla 4-5 Diferencia entre los valores del módulo con el criterio de fallo clásico y en el momento que se da el descenso abrupto en su valor en la curva de Módulo vs # de ciclos	73
Tabla 4-6 Principales parámetros y resultados obtenidos con el ensayo EBADE	74
Tabla 4-7 Valores del módulo inicial, módulo al 50% y deformación impuesta para cada probeta ensayada junto con el valor del módulo promedio de todo el ensayo a flexotracción en 4 puntos para la mezcla AC16S B50/70	76
Tabla 4-8 Número de ciclos obtenidos con la ley de fatiga en relación a los valores de la deformación crítica y endurance limit.....	77
Tabla 4-9 Resumen de parámetros obtenidos con el ensayo a flexotracción en 4 puntos	78
Tabla 4-10 Parámetros a utilizar en el proceso iterativo	78
Tabla 4-11 Valor de las deformaciones y módulos de los primeros tres ciclos de carga para el caso 1	79
Tabla 4-12 Valor de las deformaciones y módulos de los últimos cuatro ciclos de carga para el caso 1	81
Tabla 4-13 Valor de las deformaciones y módulos de los primeros tres ciclos de carga para el caso 2	83
Tabla 4-14 Valor de las deformaciones y módulos de los ciclos de carga 11, 12, 13 para el caso 2	84
Tabla 4-15 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 9 en el caso 2	85
Tabla 4-16 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga en el caso 2	87
Tabla 4-17 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 9 en el caso 3	89
Tabla 4-18 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 8 en el caso 3	90
Tabla 4-19 Valor de las deformaciones y módulos de los ciclos de carga 7, 8, 9 para el caso 3 con 7 subcapas activas.....	91

Tabla 4-20 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 7 en el caso 3	91
Tabla 4-21 Total de ciclos de carga para llegar al fallo de toda la capa en el caso 3	93
Tabla 4-22 Número de ciclos obtenidos con la ley de fatiga en relación a los valores de la deformación crítica y ϵ_q	94
Tabla 4-23 Espesor mínimo para que la capa de mezcla no falle de manera instantánea	95
Tabla 4-24 Datos de entrada al BISAR 3.0 para la predicción de ciclos por el método clásico.....	96
Tabla 4-25 Número de ciclos totales para los tres casos por el método clásico.....	96
Tabla 4-26 Número de ciclos totales para los tres casos por los dos métodos	97
Tabla 4-27 Convergencia del método utilizado en el estudio con el incremento del número de subcapas en el caso 2	97

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

1.1 INTRODUCCIÓN

El transporte por carreteras es el medio más utilizado en España y el resto de Europa para el transporte y movilidad de viajeros y mercancías. Según datos del Ministerio de Fomento, las carreteras es el modo de transporte en el que más se invierte en España, tanto en obra nueva como en conservación. Gracias a esta inversión, actualmente España presenta una red de carreteras (al menos lo que se refiere a vías principales), que presenta índices de estado por encima de la mayoría de países europeos, sin embargo, la conservación de las mismas consume aproximadamente un 25% del presupuesto anual que se tiene asignado para la inversión total en carreteras (construcción, conservación, investigación, etc). Por lo tanto, la reducción del monto dedicado a la conservación es de vital importancia, pues así parte de este presupuesto se puede dedicar a atender otras necesidades, como nuevas obras de infraestructura u otras actividades prioritarias del Estado.

Uno de los elementos más importantes que conforman las carreteras y que consume la mayor cantidad de recursos monetarios en conservación y construcción, es el firme. El mismo es una estructura compuesta por capas horizontales de diferentes materiales, cuyo propósito fundamental es el de proveer una superficie cómoda y segura a la circulación de vehículos y al mismo tiempo ser capaz de resistir las cargas que generan estos.

Los firmes empiezan a deteriorarse (estructuralmente y funcionalmente), en el momento mismo en que comienza su vida de servicio, debido a agentes externos como cargas de tráfico, cambios de temperatura y humedad.

Se pueden distinguir en el estado del firme y con relación a su conservación, cinco niveles de deterioro: nivel inicial, nivel de alerta, nivel de intervención óptima, nivel de intervención efectiva y nivel legal. El nivel de intervención óptimo, es aquel en el que se consigue eliminar los costes de totales de conservación a lo largo de la vida del firme. Para poder predecir este nivel óptimo y la correspondiente vida del firme, es necesario el conocimiento de las características estructurales y funcionales de los firmes que conforman las carreteras durante su tiempo de servicio. Un adecuado control de estos aspectos, nos llevaría a poder predecir vidas de servicio reales para los firmes y también los mecanismos en que el mismo se deteriora con el tiempo, con el fin de poder intervenirlos en el nivel óptimo.

El comportamiento de un firme durante su vida de servicio y el modo en que se ve deteriorado por agentes externos, varía dependiendo de los materiales y espesores que componen sus capas. A los firmes con pavimentos de hormigón se les conoce como rígidos y los que tienen pavimento bituminoso, se les llama flexibles.

En España, la mayor parte de las carreteras están construidas con firmes flexibles. El uso extendido de este tipo de firmes en relación a los firmes rígidos, es principalmente debido a que los mismos

presentan un coste relativamente bajo, facilidad de ejecución y reparación, y la capacidad de obtener una superficie lisa, cómoda y menos ruidosa.

Estas características en los firmes flexibles se consiguen gracias a las propiedades de las mezclas bituminosas que forman su pavimento. Las mezclas bituminosas están compuestas principalmente por un esqueleto mineral (áridos) unidos por un ligante hidrocarbonado (betún). Esta combinación les da características reológicas, comportándose como un sólido viscoelástico a bajas temperaturas y a velocidades de carga rápidas, y como un fluido de baja viscosidad en temperaturas altas y a velocidades de cargas lentas, por lo que se comporta de manera adecuada en muchos escenarios de tráfico y clima.

Es precisamente debido al extendido uso de este tipo de firmes, que se vuelve de capital importancia el estudio de las propiedades, mecanismos de acción, y modos de deterioro de las mezclas bituminosas. De esta manera se establecerían metodologías de diseño y control, para poder predecir la vida de servicio del firme y estimar sus tiempos de intervención.

Actualmente, la metodología de diseño de firmes más utilizada es la que se basa en el método multicapa, en el cual se modela este como un conjunto de diferentes capas (p.e: explanada, base, pavimento) que se comportan elásticamente, y en el que se pueden calcular estados de tensión-deformación en distintos puntos del firme. En este método se consideran dos mecanismos de falla: por deformaciones plásticas producidas por el deterioro progresivo que presenta la explanada debido a tensiones verticales producidas por el tráfico y por fisuración por fatiga producida por tensiones tangenciales en la parte inferior del pavimento bituminoso. La resistencia a la fatiga del pavimento (medida en ciclos de carga que soportaría) es definida entonces por leyes de fatiga obtenidas previamente en el laboratorio, en relación a estos estados de deformación/tensión.

Por lo tanto, en base a la metodología de diseño multicapas, el principal modo de deterioro en el pavimento bituminoso es el de la fisuración por fatiga, y su estudio es vital para un correcto diseño del firme.

La fisuración por fatiga es aquella que se da al formarse macrofisuras debido a la unión de microfisuras generadas por las tensiones producidas por la aplicación de cargas vehiculares de manera repetida (cargas dinámicas) y por cambios de temperatura. Estas tensiones son menores a aquellas con las que fallaría la mezcla con la aplicación de cargas estáticas, sin embargo su repetida aplicación terminan causando la fisura. A este fenómeno se le llama fatiga y ocurre en muchos materiales.

La caracterización de la fatiga en mezclas es un aspecto esencial para la predicción del deterioro que se produce en las mismas. La fatiga se ha tratado de simular en laboratorio y caracterizar por modelos matemáticos, sin embargo, es un proceso difícil y complejo, pues las características viscoelásticas de las mezclas genera diferentes comportamientos de las mismas para distintos escenarios de velocidades y frecuencias de aplicación de cargas, periodos de reposo, cambios térmicos, modos de aplicación de cargas, tipos de carga, entre otros.

El modelo más clásico para caracterizar la fatiga es por medio de leyes de fatiga que relacionan el estado tensional o de deformaciones de un espécimen de mezcla bituminosa, con un número de ciclos de carga, hasta su fallo. Generalmente, estas leyes se obtienen por repetidos ensayos de laboratorio a flexotracción con diferentes condiciones de carga y temperatura, y normalmente su criterio de fallo es la reducción del módulo en un 50% de su valor inicial. Su uso es muy extendido, por la sencillez en su comprensión, y además porque los métodos de diseño de firmes más clásicos (utilizando el método multicapa) hacen uso de estas leyes. Sin embargo, este modelo clásico no toma en cuenta las características reológicas de las mezclas, por lo que la mayoría de las veces su vida a la fatiga en la vida real es inferior a la que se estimó en el diseño, con el consecuente problema en la conservación del mismo.

En los últimos años se han dado renovados enfoque a la caracterización de la fatiga (p.e: mecánica de la fractura, mecánica del medio continuo, energía), algunos con resultados prometedores, sin embargo, sigue siendo difícil modelar toda la variabilidad de tensiones que se pueden producir en la vida real, además que la escogencia de un criterio de fallo estandarizado aún se encuentra en debate.

Existen muchos ensayos de laboratorio que intentan simular la fatiga en las mezclas bituminosas, sin embargo, el de flexotracción en 4 puntos, es el único normalizado en Europa para obtener la fatiga en mezclas bituminosas a 20°C (temperatura promedio en España). Este ensayo intenta simular precisamente los esfuerzos de tracción en la fibra inferior a los que se ve sometido el pavimento bituminoso. Es un ensayo a deformación controlada y de barrido de tiempo (es decir, la deformación no aumenta en cada ciclo de carga), por lo que presenta el inconveniente que generalmente es un ensayo muy largo y que para mezclas blandas, con ligantes modificados o muy flexibles puede presentar resultados erróneos dependiendo del criterio de fallo o no llegar a romper nunca.

Debido a las desventajas del ensayo a 4 puntos y la no uniformidad en los criterios para caracterizar las mezclas, el Laboratorio de Caminos de la Univesidad Politècnica de Catalunya creó un nuevo ensayo llamado EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones), con el que se caracteriza la fatiga en las mezclas a partir de la determinación de dos deformaciones umbrales: la primera deformación es la llamada *endurance limit* (límite de resistencia a la fatiga) que es la deformación máxima bajo la cual la mezcla se comporta de manera elástica, osea, "no se fatiga"; y la segunda deformación es la deformación crítica, la cual es el punto a partir del cual la mezcla se fisura y deteriora de manera muy acelerada y se toma como criterio de fallo. Estas deformaciones son características de cada mezcla independientemente del estado tensional o de deformación al que sea sometida la mezcla, lo que muestra la importancia de este ensayo. Además, al ser un barrido de deformaciones, las mismas van aumentando cada 5000 ciclos de carga, lo que produce un ensayo veloz y que lleva a la muestra a la ruptura.

Al día de hoy, el ensayo EBADE se utiliza únicamente para diferenciar comportamientos entre muestras de mezclas a diferentes, pero aún se está trabajando en la generación de leyes de fatiga con el mismo.

La propuesta de este estudio, es utilizar los resultados y parámetros obtenidos del ensayo EBADE y la ley de fatiga del ensayo a flexotracción, y aplicarlos a la metodología multicapa de diseño de firmes, solo que esta vez se considerará únicamente una capa de pavimento bituminoso discretizada en subcapas. Se estudiará como se propaga la fisura subcapa a subcapa dentro de una mezcla y cuantos ciclos de carga resistiría la misma si se considera como criterio de fallo de cada subcapa la deformación crítica, y además el módulo de cada subcapa varía con la deformación que presenta en cada ciclo de carga.

Este estudio es una primera aproximación, en la que no se considera la dependencia viscoelástica de las mezclas a las cargas y temperatura, pues únicamente pretende describir la propagación de la fisura si se toma en cuenta las deformaciones para cada subcapa de la mezcla, a diferencia del enfoque clásico donde únicamente se considera la deformación en la fibra inferior de toda la capa de pavimento bituminoso.

De esta manera y solo siendo un estudio inicial, se espera que los resultados de vida de servicio de la capa de pavimento bituminoso del firme sean más realistas que los que se consideran actualmente en los métodos clásicos de diseño y por tanto sea el inicio de la creación de un procedimiento futuro que sea sencillo y que considere los efectos viscoelásticos de la capa de mezcla bituminosa para el diseño de los pavimentos, y la conservación adecuada y a tiempo de los mismos.

1.2 OBJETIVOS

El primer objetivo de este trabajo es el dar un repaso importante al estado del arte del dimensionamiento de firmes, del fenómeno de la fisuración en firmes flexibles, y principalmente reseñar los últimos estudios y enfoques de caracterización de la fisuración por fatiga en mezclas bituminosas, dando a conocer los conceptos detrás de ellos, sus ventajas y limitaciones en relación a los métodos clásicos y futuras aplicaciones de los mismos. Así mismo se darán a conocer los ensayos de laboratorio clásicamente utilizados para la obtención de leyes de fatiga, dándole especial énfasis al de flexotracción en 4 puntos, por ser el que actualmente se encuentra normalizado y porque será utilizado en la consecución del tercer objetivo.

El segundo objetivo es dar a conocer el ensayo EBADE, el cual utiliza una metodología recientemente creada por el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura de Transporte y del Territorio de la Universidad Politècnica de Catalunya para caracterizar la fatiga en mezclas bituminosas. Se darán a conocer los conceptos de densidad de energía disipada y su relación con la variación del módulo de rigidez, con la deformación crítica y del endurance limit del material, los cuales son la base detrás de este ensayo. De este ensayo se describirá el equipo utilizado para realizarlo, su metodología, los primeros resultados y conclusiones obtenidos de él, sus beneficios en relación a los ensayos actuales de flexotracción y futuras líneas de estudio. Se compararán las metodologías y resultados obtenidos entre los ensayos EBADE y de flexotracción a 4 puntos y cual describe de mejor manera el comportamiento de la fatiga.

Finalmente, el tercer objetivo de esta tesina es realizar un estudio inicial y de primera aproximación de cómo se propaga una fisura debido a la fatiga en mezclas bituminosas utilizando el método multicapa de dimensionamiento de firmes, solo que únicamente enfocándose en el pavimento bituminoso. De esta manera, se discretiza la capa de pavimento bituminoso en subcapas y se obtienen los estados tensionales y de deformación en cada una de ellas mediante el uso del programa multicapa BISAR 3.0. En base a estos estados y con la ayuda de resultados obtenidos en el ensayo EBADE y las leyes de fatiga, se espera poder describir la evolución de la fisura causada por la fatiga de cada subcapa por todo el espesor de la mezcla bituminosa. Así, se podrá dar una predicción aproximada del número de ciclos de carga que soportará un firme de determinado espesor.

Se espera que este enfoque simule de manera más real el comportamiento de la capa de mezcla bituminosa, y que de esta manera se pueda considerar dentro del diseño de firmes, y poder determinar de manera más realista la vida de servicio del mismo.

Así mismo, debido a que el presente es una primera aproximación a esta metodología, se estudiarán las posibles mejoras que se le pueden hacer a futuro.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento se encuentra estructurado en seis capítulos, con un máximo de cuatro niveles, quedando ordenados de la siguiente manera:

- Capítulo 1: se dedica esencialmente a la introducción a la problemática por la cual se realiza el estudio y los objetivos que esperan obtenerse del mismo.
- Capítulo 2: se desarrolla el estado del arte de los conceptos en que se involucra la problemática del estudio. Se da un repaso rápido a la teoría de firmes, para luego entrar en la problemática de la fisuración por fatiga en mezclas bituminosas, donde se repasan los últimos conceptos, ensayos y enfoques desarrollados por la comunidad científica en cuanto a este tema.
- Capítulo 3: Se explica la metodología del estudio, y se describen los materiales y procedimientos de los ensayos empleados. Se describe brevemente el uso del programa BISAR 3.0.
- Capítulo 4: Se muestran y analizan los resultados obtenidos en los ensayos y por el estudio, comparándolos con el enfoque tradicional de fatiga en mezclas bituminosas.
- Capítulo 5: Se dedica a las conclusiones que se pueden obtener a partir del análisis de resultados y sus líneas de acción a futuro.
- Capítulo 6: Se dedica a la bibliografía consultada en el resto de los capítulos.

Adicionalmente, al final del documento se encuentra la sección de anejos, donde se muestran los todos los resultados obtenidos por el programa BISAR 3.0 y por el ensayo EBADE, que son mostrados de manera resumida en el capítulo 4.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta de manera resumida el marco teórico en base a estudios publicados sobre la teoría general de firmes, las mezclas bituminosas, la fisuración por fatiga y ensayos para caracterizarla. Sobre la teoría general de firmes se reseñará brevemente, sus generalidades, tipologías y patologías, con especial mención en los firmes con pavimentos bituminosos. Se describirán las distintas metodologías de diseños de firmes que se utilizan actualmente. Seguidamente se describirán las principales características de las mezclas bituminosas, su definición, composición, clasificación, nomenclatura y características reológicas. Después, se hará un breve repaso de la fisuración, su definición, tipología y mecanismos de acción, para finalmente terminar con un estudio más detallado de la fatiga en mezclas bituminosas, desde que fue descubierta hasta sus enfoques de caracterización más actuales, describiendo los distintos ensayos que tratan de modelarla actualmente.

2.2 PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE FIRMES

2.2.1 DEFINICIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

El firme de una calle o carretera está constituido por un conjunto de capas de distintos materiales y de variado espesor, debidamente compactadas, colocadas horizontalmente sobre el terreno, con el fin de brindar a los vehículos, en todo tiempo, una superficie segura y cómoda, transmitiendo las solicitaciones de tráfico suficientemente amortiguadas a la explanada, de manera que puedan ser soportadas por esta.

La resistencia del firme está directamente relacionada con los materiales y espesores de las distintas capas, mientras que su funcionalidad está definida por la textura y acabado de las capas superiores. El deterioro de un firme comienza en el momento de su puesta en servicio debido inicialmente a factores climatológicos (lluvia, hielo, sol, aire etc.) y a partir de ahí se ve potenciado por la acción del tráfico.

A partir de lo anterior, seguidamente se mencionará de manera breve las distintas patologías padecidas por los firmes y la tipología de los mismos.

2.2.2 PATOLOGÍAS DE LOS FIRMES

Se dice que el fallo de un firme se produce cuando la calidad de rodadura se ubica por debajo de unos umbrales mínimos, donde la conducción de los vehículos no se realiza de una forma cómoda y segura. A continuación se describen las patologías más frecuentes en los firmes de las carreteras:

- **Fisuraciones superficiales:** Se observan a simple vista, pudiendo tener su origen en cualquier capa del firme.

- **Roderas:** Deformaciones longitudinales en la capa de rodadura producidas por el paso de cargas elevadas asociadas con elevadas temperaturas, generando una deformación permanente a corto plazo y una posterior fluencia lateral del material bituminoso.
- **Deformaciones superficiales:** Se producen asentos diferenciales de alguna de las capas granulares o de la propia explanada, debidos a la incapacidad mecánica para absorber las solitaciones verticales o horizontales expuestas. Pueden afectar en zonas concretas o a un tramo de una carretera.
- **Pulimento:** Se produce por el continuo proceso de abrasión que se someten los áridos que están en contacto con el neumático, influenciados también por el agua presente superficialmente.

Dependiendo del gradiente térmico diario y estacional, de las temperaturas extremas, el grado de humedad de los materiales y explanada, y del efecto de las heladas, los principales deterioros causados por los agentes atmosféricos al firme son:

- Desenvuelta de mezclas bituminosas
- Degradaciones superficiales por hielo
- Pérdida de capacidad portante de la explanada
- Fisuración por esfuerzos térmicos

El tráfico transmite al pavimento (capa superficial del firme) una solitación vertical y otra horizontal. La vertical induce esfuerzos de tracción en la base del firme, mientras que la horizontal produce esfuerzos de tracción-compresión en la superficie. Dependiendo del número de ejes equivalentes, la carga por eje, velocidad de circulación, regularidad superficial, entre otros, los principales deterioros causados por el tráfico al firme son:

- Pulimento
- Desprendimiento de gravillas
- Hundimiento de gravillas
- Fisuración
- Deformaciones

2.2.3 TIPOLOGÍA DE FIRMES

El firme de una carretera puede estar compuesto por materiales muy diferentes, diversificándolos éstos en varios tipos de firmes. Esta tipología viene determinada por unas propiedades funcionales y de comportamiento frente a distintos agentes de deterioro.

La tipología más utilizada es la que clasifica los firmes en relación a los materiales en cada capa, clasificándolos en 4 tipos: flexibles, semiflexibles, semirrígidos y rígidos. Los tres primeros presentan pavimentos bituminosos, mientras que el último presenta pavimento hidráulico y es por esto que en la literatura muchas veces se suele agrupar a los firmes flexibles, semiflexibles y semirrígidos bajo una sola clasificación de firmes flexibles, que los diferencie de los rígidos con pavimento hidráulico.

2.2.3.1 Firmes flexibles (base granular)

Están constituidos por capas de base y subbase de material granular, recubiertas por un tratamiento superficial por un tratamiento superficial o una capa de mezcla bituminosa. Las capas granulares son las que fundamentalmente resisten las cargas de tráfico, mientras que la capa de rodadura, tiene una función impermeabilizante del firme, además de soportar los efectos abrasivos del tráfico. Generalmente su fallo estructural se da por deformaciones excesivas en la capa de rodadura debido a las cargas de tráfico y en menor medida el fallo por fisuración de la capa de rodadura.

2.2.3.2 Firmes semiflexibles (base bituminosa)

Están constituidos generalmente por una capa de base de mezcla bituminosa, recubierta por un pavimento también de mezcla bituminosa constituido por una capa de rodadura y otra intermedia. La subbase suele ser de material granular o tratada con algún ligante hidráulico. La capa de base trabaja a flexotracción, la cual dependiendo de su rigidez, aumenta o disminuye las tensiones que se transmiten a la explanada. Su fallo estructural se da generalmente por la fisuración de sus capas bituminosas por fatiga y en menor medida por deformaciones excesivas. Este tipo de firme es el más utilizado en España.

2.2.3.3 Firmes semirrígidos (bases tratadas)

Se caracterizan por una mayor rigidez de sus capas, en relación a los dos firmes anteriores, especialmente en la capa de base. Generalmente, esta capa base, suele ser tratada con ligantes hidráulicos o puzolánicos. El pavimento también es de mezcla bituminosa constituido por una capa de rodadura y otra intermedia. La subbase suele ser de material granular, algunas veces estabilizado. Debido a la mayor rigidez de su capa base, la misma absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales que llegan a la explanada. Debido a que la capa base trabaja a flexotracción, y a la magnitud de los mismo, este firme falla generalmente debido a la fisuración por fatiga en su capa base, reflejando estas fisuras en forma de malla fina en la superficie de rodadura. En menor medida, también presenta fisuración en malla gruesa (debido a falta de cohesión del material tratado) y fisuración por retracción.

2.2.3.4 Firmes rígidos (pavimento de hormigón)

Un firme rígido está constituido por una losa de hormigón que puede ser colocada directamente sobre la explanada o bien intercalada con una capa soporte que puede estar tratada o no (no tiene función estructural, únicamente facilita la construcción de la losa de hormigón). La losa de hormigón actúa al mismo tiempo como capa de rodadura y como capa de base. La falla estructural de este tipo de firme es por rotura de la losa debido a las tensiones de tráfico y los gradientes térmicos y por pérdida de apoyo de la losa por surgencia de finos y erosión de los materiales de apoyo de la capa de apoyo. Aún así, generalmente este tipo de firme suele presentar fallas de carácter funcional en la superficie antes que estructurales.

2.3 DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES

2.3.1 INTRODUCCIÓN

La gran diferencia entre los firmes flexibles (pavimento bituminoso) y los rígidos (pavimento hidráulico) consiste en la forma como reparten las cargas. Desde el punto de vista de diseño, los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas y la distribución de la carga está determinada por las características propias del sistema de capas. Los rígidos tienen un gran módulo de elasticidad y distribuyen las cargas sobre un área grande, y por lo tanto, la consideración más importante es la resistencia estructural del concreto hidráulico.

Para dimensionarlos, la selección de materiales y espesores de las diferentes capas del firme deben fijarse en función del tráfico que ha de soportar, de la explanada sobre la cual se apoya y de las condiciones climatológicas. Se han creado métodos experimentales y analíticos que tratan de tomar en cuenta estas variables para dimensionar la estructura del firme.

2.3.2 MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los métodos experimentales fueron los que se desarrollaron primeramente y se basan en la observación del comportamiento de distintas secciones experimentales, ensayadas en carreteras en servicio, o en circuitos experimentales con tráfico controlado. Existen varios métodos experimentales desarrollados por grandes organizaciones, y entre los más utilizados por su difusión se encuentran los siguientes:

- **Método CBR (California Bearing Ratio Method)**: Fue el primer método experimental y fue desarrollado por la División de Carretera de California (California Division of Highways) y utilizado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial para el diseño de aeropuertos. En esencia este método consiste en relacionar por medio de una curva el espesor del firme con la capacidad de soporte de la explanada, medida a través del CBR del suelo. Por lo tanto cuanto mayor sea el valor del CBR, menor será el espesor del firme que habrá que colocar. No considera que el tráfico es mixto, si no únicamente la carga de los vehículos más pesados, que va evolucionando con el tiempo.
- **Método AASHO (American Association of State Highway Officials)**: Método en el cual mediante una serie de factores de equivalencia se obtiene un número equivalente de aplicaciones de carga de un eje estándar de 18000 libras. Luego mediante un ábaco que relaciona la capacidad de soporte de la explanada con el número de aplicaciones de cargas, se obtiene un índice estructural del firme que mediante coeficientes de equivalencia es transformado en espesores de cada capa de material.
- **Método AI (Asphalt Institut Method)**: Es muy similar al de la AASHO, pues también se crean ábacos que generan un factor de equivalencia entre tipos de ejes. Además existe un monograma que relaciona el número de ejes tipo con la resistencia de la explanada, para obtener el espesor de mezclas bituminosas. Este espesor de mezcla bituminosa, puede ser

cambiado por proporciones de otros tipos de capas (granulares, tratadas con cementos, etc) dados por unos coeficientes de equivalencia entre materiales.

El problema que tienen los métodos experimentales es que su aplicación está limitada a situaciones similares a las del ensayo y que por desgracia, éstas cambian al poco tiempo de terminar los ensayos y obtener los resultados, como por ejemplo los cambios en los tipos de ejes, introducción de nuevos materiales, variaciones climatológicas, etc. De esta manera, el uso de este tipo de método ha quedado reducido, a pesar del enorme gasto económico que supuso su ejecución.

2.3.3 MÉTODOS ANALÍTICOS

Posteriormente a los métodos experimentales y como consecuencia de la aparición de los ordenadores, se introdujeron los métodos analíticos en el dimensionamiento de firmes. Estos métodos consideran características propias de cada capa del firme, y tratan de modelarlas en ordenadores, de manera que relacionan estados tensionales en cada una de ellas con sus comportamientos característicos. Inicialmente se desarrollaron los métodos multicapas, y en los últimos 15 años con la evolución de la potencia en los ordenadores, se ha comenzado a introducir los métodos de elementos finitos y discretos. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

2.3.3.1 Método basado en sistemas multicapa

En general, los programas de dimensionamiento de firmes basados en métodos analíticos, consideran que el firme está constituido por una serie de capas horizontales apoyadas sobre la explanada. Este tipo de programas consideran que todas las capas del firme se comportan de manera elástica, basándose en la teoría multicapa elástico lineal de Burmister [1], y las soluciones para sistemas de n-capas de Schiffman [2], de manera que se pueda llegar a conocer el estado de esfuerzos y deformaciones en las capas del firme, como se muestra en la figura 2-1.

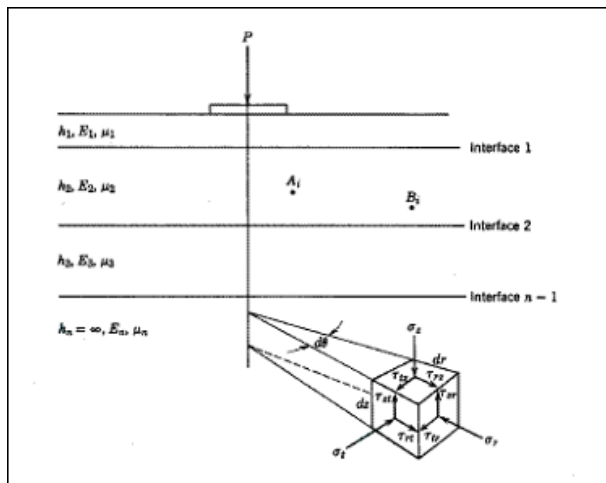


Figura 2-1 Estado tensional de un punto del firme según la teoría multicapa [2].

En este método, los mecanismos de deterioro están relacionados con la tensión vertical que llega a la coronación de la explanada y con la tensión tangencial en la fibra inferior del pavimento.

Analizan básicamente dos mecanismos de deterioro:

- Fallo por deformaciones excesivas, por acumulación de las deformaciones plásticas producidas en las diferentes capas del firme y de la explanada en cada aplicación de carga.
- Fallo por fisuración por fatiga de las capas cohesivas del firme: capas tratadas con cementos hidráulicos y capas de mezcla bituminosa.

En los firmes con pavimentos bituminosos, para el caso de las deformaciones plásticas, la deformación considerada es la que se produce en la dirección de la aplicación de la carga, mientras que en el caso del fallo por fatiga la deformación considerada es la deformación horizontal en la base de la capa de mezcla bituminosa.

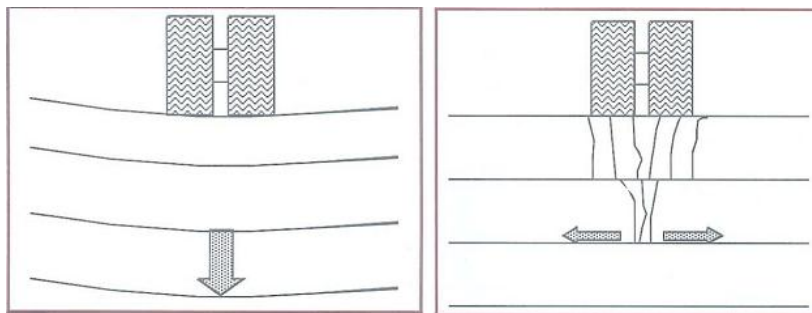


Figura 2-2 Fallo por deformaciones (izquierda), fallo por fatiga (derecha).

Algunos de los programas de cálculo desarrollados que utilizan la Teoría Multicapa Elástica son: ALIZE (LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ELSYM5 (Chevron Oil), BISAR 3.0 (SHELL), KENLAYER (University of Kentucky) y DEPAV (Universidad del Cauca).

En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo elástico y el coeficiente de Poisson) y el espesor de las capas del pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación.

Una vez calculados estos estados, se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada (según leyes de fatiga para cada material), y en un procedimiento de ensayo y error (aumentando disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento.

En general, la principal desventaja de esta metodología radica en que el cálculo de los estados de esfuerzo y deformación se realiza por lo general suponiendo que el firme flexible es un sistema multicapa elástico lineal, por lo que no considera la naturaleza visco-elástica del pavimento bituminoso, ni las características inelásticas y no lineales de las capas granulares. Así mismo, estos programas suponen que los materiales de cada capa son isotrópicos y homogéneos, y consideran que cada capa tiene extensión infinita en el sentido horizontal. Sin embargo, en la gran mayoría de las oportunidades, las cargas inducidas del tránsito a la estructura de firme son tan bajas y al

mismo tiempo considerando que en muchos lugares existen gradientes térmicos pequeños, el modelo utilizado por estos programas sigue siendo bastante aceptado.

2.3.3.2 Método basado en elementos finitos

En los últimos 15 años como consecuencia del aumento en la capacidad de los ordenadores y la implementación de los programas de cálculo basados en los elementos finitos, se pueden llegar a modelar comportamientos más complejos de los materiales del firme y pavimento, como lo es, viscoelasticidad, no linealidad, plasticidad, entre otros. Estos programas emplean ecuaciones constitutivas para el cálculo de esfuerzos y deformaciones las cuales suponen que el material es un continuo (no se tiene en cuenta el comportamiento individual de los componentes del material, sino su comportamiento global a nivel macromecánico). Para el caso de las capas de mezclas bituminosas por lo general los modelos empleados son los elásticos lineales y los viscoelásticos. En el mercado existen diversos programas de elementos finitos como el Abaqus, Plaxys y Ansys, pero algunos que se especializan en pavimentos son el SENOL (University of Nottingham), FENLAP (University of Nottingham), ILLI-PAVE (University of Illinois), GT-PAVE (Georgia Institute of Technology) y el NOEL (Université de Nantes), y códigos como el DIANA (Delft University of technology) y el CESAR (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). La principal desventaja de estos modelos, es el consumo de recursos computacionales, la complejidad en el desarrollo de ecuaciones constitutivas (principalmente en las capas granulares) y la dificultad en su entendimiento.

2.3.3.3 Método basado en los elementos discretos

Una metodología más reciente y que se está empezando a implementar en firmes, es la de los Elementos Discretos, los cuales utilizan modelos numéricos para el cálculo de fuerzas y desplazamientos entre las partículas de un esqueleto granular. El fin de esta metodología es intentar describir fenómenos físicos del comportamiento de los materiales a nivel micromecánico para poder entender el comportamiento a nivel macro. Algunos parámetros a nivel micro son la fricción, cohesión, geometría, densidad y rigidez de partículas (normal y tangencial). Existen todavía muy pocos estudios relacionados con esta metodología, pero se espera que la misma presente una mejor representación que los Elementos Finitos, de las capas granulares del firme, sin embargo, también presenta la desventaja de consumir muchos recursos computacionales y la complejidad en su entendimiento.

En la actualidad, los programas multicapa elásticos siguen sido preferidos con respecto a los elementos finitos debido a su simplicidad en el manejo y en el entendimiento de las ecuaciones con las que se obtienen los estados de esfuerzo y deformación. Además, requieren menos tiempo computacional y memoria. Pero en general, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de los materiales que conforman un firme. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras, sin embargo, el desarrollo de estas ecuaciones muchas veces es complejo.

2.4 MEZCLAS BITUMINOSAS

2.4.1 DEFINICIÓN Y GENERALIDADES

Una mezcla bituminosa es la combinación de un ligante hidrocarbonado y áridos, de manera que todas las partículas de los áridos queden recubiertas por una película de ligante. Este tipo de mezcla constituye el material más utilizado en las capas de rodadura de los firmes europeos, debido a su bajo coste en relación al hormigón hidráulico y sus propiedades viscoelásticas que hacen que se comporte como un sólido a bajas temperaturas y como un fluido de baja viscosidad a temperaturas altas.

Se fabrican de forma mecánica, tanto en centrales fijas o móviles, para luego ser llevadas a la obra, donde son extendidas y luego compactadas. Para su fabricación los áridos son clasificados en relación a una granulometría específica de cada tipo de mezcla, mientras que la proporción del ligante suele ser del 3%-10% de la masa de los áridos. Dependiendo del tipo de mezcla que se quiera formular, así cambia la granulometría y tipo de ligante, sin embargo, generalmente, como ligantes se utilizan betunes asfálticos con penetraciones intermedias (40/50 y 60/70) y últimamente betunes modificados con polímeros.

2.4.2 MATERIALES

2.4.2.1 Áridos

Los áridos son las partículas que constituyen el esqueleto mineral de las mezclas. Constituyen cerca de un 95% del total de la mezcla e inciden de manera directa en la compactación, ángulo de rozamiento interno, textura, manejabilidad, la resistencia a la acción del agua y en la calidad del mástico bituminoso. Los áridos pueden ser gruesos, finos o filler. El porcentaje de cada fracción de árido viene determinado según el tipo de mezcla.

El comportamiento de un árido depende de las propiedades físicas y químicas de las partículas, así como de su granulometría. Las propiedades físico-químicas de los áridos dependen de la roca de origen, y aunque difícilmente se puede actuar sobre ellas, la composición de un árido con materiales procedentes de distintas rocas y los procesos de trituración pueden proporcionar áridos adecuados. Respecto a la granulometría, ésta debe componerse o corregirse en cada caso.

2.4.2.2 Ligante Bituminoso

El ligante bituminoso es el principal componente de la mezcla bituminosa ya que es el que aglomera los áridos y da cohesión y estabilidad a la mezcla. El ligante bituminoso tiene unas cualidades y características que lo hacen muy diferente a los otros tipos de agentes cohesivos utilizados en carreteras, como por ejemplo el conglomerante hidráulico. A diferencia del cemento hidráulico, que proporciona una alta rigidez y resistencia a los materiales tratados, los ligantes bituminosos proporcionan uniones tenaces y flexibles. Esto se debe a las propiedades viscoelásticas de los betunes, que varían con la temperatura y velocidad de carga, lo que le permite comportarse de manera flexible, con un bajo módulo de rigidez y alta deformabilidad,

permitiéndole absorber tensiones térmicas sin fisurarse (el pavimento bituminosos no requiere de juntas expansivas) y al mismo tiempo comportarse de manera más rígida y estable, con un mayor módulo y de respuesta elástica frente a las cargas de tráfico.

Existen varios tipos de ligantes, dentro de los que se encuentran: los betunes asfálticos, betunes fluidificados o fluxados, emulsiones bituminosas y ligantes modificados. En carreteras el principal tipo de ligante son los betunes asfálticos.

- **Los betunes asfálticos** son subproductos de las refinerías de petróleo. Es un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, con lo cual requiere un calentamiento previo.
- **Los betunes fluidificados o fluxados** son una disolución de betún asfáltico en un fluidificante. En el caso de los betunes fluidificados la disolución es en aceite o en un fluidificante derivado del petróleo. En los betunes fluxados el fluidificante no es derivado del petróleo, sino que procede de la destilación de la hulla.
- **Las emulsiones bituminosas** son dispersiones coloidales de betún asfáltico en agua. A temperatura ambiente es líquido.
- **Los ligantes modificados** son ligantes hidrocarbonados a los que se añaden aditivos para modificar la reología de la mezcla.

2.4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar de acuerdo a diferentes parámetros (tabla 2-1), entre ellos: fracciones de árido en mezcla, estructura y tamaño máximo del árido, granulometría de la mezcla, densidad de la mezcla (proporción de huecos) y temperatura de puesta en obra.

Mezclas bituminosas	Fracción de áridos	Masilla bituminosa (polvo mineral + ligante)
		Mortero bituminoso (árido fino + masilla)
		Hormigón bituminoso (árido grueso + mortero)
	Temperatura de puesta en obra	Mezclas en frío
		Mezclas en caliente
	Proporción de huecos en la mezcla	Densas o cerradas (D) (huecos <6%)
		Abiertas (A) (huecos >12%)
		Semicerradas (S) (6% < huecos <12%)
		Porosas (P) (huecos >20%)
	Tamaño máximo del árido	Gruesas (G) (tamaño máximo >10mm)
		Finas o microaglomerados
	Estructura interna del árido	Mezclas con esqueleto mineral
		Mezclas sin esqueleto mineral
	Granulometría	Continuas
		Discontinuas

Tabla 2-1 Tipos de clasificación de las mezclas bituminosas.

Con relación a la clasificación por la temperatura, las mezclas en caliente son actualmente las más usadas tanto en España como en Europa y se utilizan sobretudo en capas de rodadura e

intermedias del firme. Dentro de las mezclas bituminosas en caliente existen diferentes tipos de mezcla cuya composición y propiedades varían en relación a su ubicación y función dentro del firme (capas de rodadura, intermedia y base).

En España, se distinguen tres tipos de mezclas bituminosas en caliente:

- **Hormigones asfálticos (AC):** mezclas de granulometría continua, tipo densa (D), semidensa (S) o gruesa (G), las cuales se utilizan en las tres capas anteriormente mencionadas, según el artículo 542 de la Orden Circular 24/2008 de la Orden Circular 24/2008 del PG-3 [3]
- **Mezclas Bituminosas Discontinuas (BBTM):** son aquellas cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso. y se utiliza específicamente capas de rodaduras, según el art. 543 de la Orden Circular 24/2008 del PG-3 [3].
- **Mezclas Bituminosas Drenantes (PM):** son aquellas que por su baja proporción de árido fino, presentan un contenido muy alto de huecos interconectados que le proporcionan características drenantes y se utiliza específicamente capas de rodaduras, según el art. 543 del PG-3 de la Orden Circular 24/2008 [3].

Los hormigones asfálticos son los más utilizados en España, pues se utilizan tanto en la capa de rodadura, como en la intermedia y de base, por lo que su uso es muy extendido en vías urbanas, autopistas, carreteras convencionales y aeropuertos. En el presente estudio se estudiará este tipo de mezcla bituminosa.

2.4.3.1 HORMIGÓN ASFÁLTICO

Según el art. 543 del PG-3 de la Orden Circular 24/2008 se define como mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón asfáltico la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) con granulometría continua y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

De la definición anterior, se puede decir que este tipo de mezcla (hormigón asfáltico), presenta especificaciones similares en cuanto a los materiales que la componen y su proceso de fabricación, sin embargo, dependiendo de su función en el firme, la graduación, cantidad y propiedades específicas de cada material, serán clasificadas diferentes. Para designar el tipo de hormigón asfáltico a utilizar, la nomenclatura adoptada en el PG-3 es la siguiente:

AC	D	surf/bin/base	ligante	granulometría
----	---	---------------	---------	---------------

Tabla 2-2 Nomenclatura de los hormigones asfálticos.

Donde:

- **AC:** indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso.
- **D:** es el tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por cien (90% y 100%) del total del árido.
- **surf/bin/base:** se indicará con estas abreviaturas si la mezcla se va a emplear en capa de rodadura, intermedia o base, respectivamente.
- **ligante:** se debe incluir la designación del tipo de ligante hidrocarbonado utilizado. La designación del tipo de betún va relacionada con su consistencia por medio del ensayo de penetración, que nos indica que tan rígido o blando es el betún a ciertas temperaturas.
- **granulometría:** se indicará con la letra D, S o G si el tipo de granulometría corresponde a una mezcla densa (D), semidensa (S) o gruesa (G) respectivamente. En el caso de mezclas de alto módulo se añadirán además las letras MAM.

2.4.4 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Debido a las características del betún, las mezclas bituminosas tienen un comportamiento mecánico complejo que depende de:

- La magnitud de las tensiones soportadas
- La temperatura a la que se aplican estas tensiones
- La velocidad de aplicación de las tensiones

En general, los áridos de la mezcla tienen un comportamiento elastoplástico, mientras que el ligante bituminoso, presenta un comportamiento viscoelástico. La combinación de estas dos características hace que en todo su conjunto las mezclas bituminosas tengan un comportamiento viscoelastoplástico, aunque el efecto plástico de los agregados no es tan determinante en capas de mezclas bituminosas como en capas únicamente granulares. En estudios realizados por Little [4] se demostró que en condiciones de carga y temperatura similares a las condiciones de servicio del pavimento, cualquier ensayo se puede considerar con un comportamiento viscoelástico lineal.

El comportamiento viscoelástico se puede aproximar por la variación del módulo de rigidez en función de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga. El valor del módulo de rigidez se da por una relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante. Según las condiciones de temperatura y de aplicación de las cargas, este módulo se aproximará más a un módulo de elasticidad o viscosidad.

Para temperaturas bajas y tiempos de aplicación cortos (como suele suceder con las cargas de tráfico), el comportamiento de las mezclas es casi elástico y por tanto el módulo casi no varía. En cuanto se comienza a aumentar la temperatura y el tiempo de aplicación de las cargas, el mismo empieza a disminuir, y la mezcla se comienza a comportar de manera más viscosa que elástica. En la figura 2-3 se puede observar el comportamiento reológico de las mezclas caracterizado por la variación del módulo de rigidez con respecto a la temperatura y el tiempo de aplicación de carga.

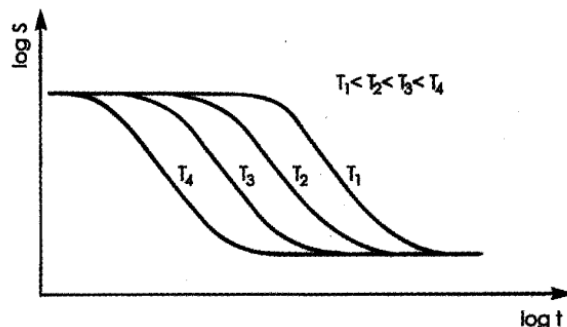


Figura 2-3 Comportamiento reológico de las mezclas bituminosas.

Es claro que este comportamiento de las mezclas vuelve muy complicado la caracterización y estudio de los comportamientos de ellas para diversos escenarios y por eso se trabaja en la modelación de ella tanto por modelos matemáticos como por ensayos de laboratorio.

Los hormigones asfálticos más habitualmente utilizadas en pavimentos en España, para velocidades de los vehículos de 70 km/h, tienen los siguientes módulos de rigidez en función de la temperatura, pudiéndose considerar un valor medio en torno a 6.000 MPa.

- Invierno: 10.000 – 12.500 MPa
- Primavera-otoño: 5.000 – 7.500 MPa
- Verano: 1.000 – 2.500 MPa

En el comportamiento reológico de una mezcla bituminosa intervienen muchas variables. Las investigaciones realizadas en este campo se dirigen por dos vías diferentes como son los modelos físico-matemáticos, en los que se incluyen los estudios teóricos basados en relacionar este comportamiento con esquemas físicos que dan una representación del estado tensión-deformación del material mediante unos modelos sencillos; y los métodos experimentales, que incluyen las investigaciones experimentales llevadas a cabo mediante ensayos de laboratorio.

2.5 FISURACION EN FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO

2.5.1 INTRODUCCIÓN

Anteriormente se mencionó que en relación a las propiedades y comportamiento de los firmes, los mismos se podían dividir en 4 tipos. Sin embargo, también los firmes se pueden catalogar en dos grandes grupos, en función del tipo de pavimento (capa superior del firme) que presenten, ya sea, pavimentos de hormigón o pavimentos bituminosos. Como se comentó antes, el comportamiento y patologías de ambos tipos de pavimentos son muy diferentes y además la respuesta que presente cada pavimento incide de manera directa en las capas inferiores del firme.

En el caso de los pavimentos bituminosos, el tipo de fallos que presentan generalmente son:

- Deformaciones excesivas y la consecuente pérdida de la regularidad.

- Peladuras, desintegración y pérdidas de áridos.
- Exudaciones.
- Fisuraciones: por tensiones térmicas, por reflexión de grietas de las capas inferiores y por la aplicación de cargas repetidas (fatiga).

2.5.2 CONCEPTOS GENERALES Y TIPOLOGÍAS

La fisuración de los pavimentos bituminosos es una de las causas más frecuentes de deterioro. La fisuración es la aparición de discontinuidades superficiales y profundas en la estructura del firme y se pueden clasificar de distinta manera, según su localización en el firme y a sus características geométricas. Según su localización las mismas pueden encontrarse aisladas, con un trazado lineal, agrupadas o en forma de mallas cuadrangulares o poligonales. Con respecto a sus características geométricas, se pueden diferenciar en relación a su longitud, disposición en planta respecto al eje de la calzada (perpendiculares, paralelas, oblicuas, etc.), su forma (recta, curva, irregular) y la abertura (extrafina $x < 1\text{mm}$, fina $1\text{mm} < x < 2\text{mm}$ y gruesas). De esta manera se pueden distinguir cuatro categorías, basadas en los criterios mencionados:

- **Agrietamiento longitudinal (central y lateral):** ocasionado por los efectos térmicos, aunque el factor preponderante son las cargas del tráfico. Los vehículos generan un cortante horizontal debajo del neumático en la zona de rodadura, creándose grandes esfuerzos y deformación a tracción en la superficie.
- **Agrietamiento transversal:** originado por contracciones y alargamientos de la base tratada con cemento al estar sometida a cambios de temperatura. También se puede producir por flexión inducida por las cargas del tráfico. Se propagan de abajo hacia arriba, iniciándose en la base.
- **Agrietamiento en bloque:** tiene su origen en las contracciones y alargamientos de la base tratada.
- **Agrietamiento tipo piel de cocodrilo:** Desarrolla deformaciones por tracción en la capa inferior, reflejándolas luego en la capa superior. Las grietas crecen en dirección transversal al tráfico hasta el límite de influencia de las cargas.

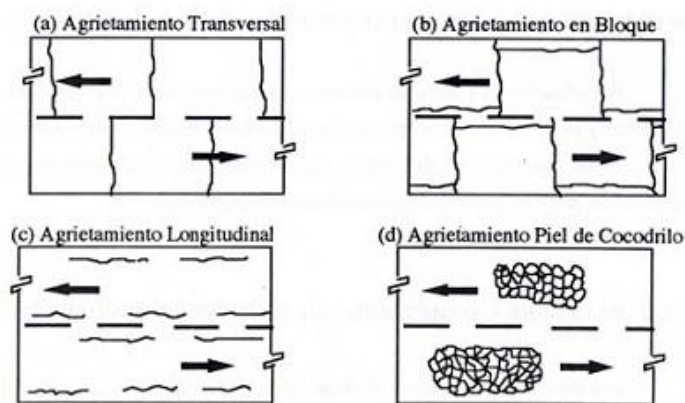


Figura 2-4 Tipología de fisuras por localización y características geométricas.

En cuanto a su origen, las fisuras se pueden catalogar como estructurales o no estructurales, a saber:

- **Fisuras estructurales:** se originan por una calidad deficiente de las capas integrantes del firme, desde el diseño o durante su vida de servicio.
- **Fisuras no estructurales:** se originan por falta de adherencia en las juntas constructivas (en los pavimentos rígidos), o por retracción en alguna de las capas que integran el firme (por gradientes importantes de temperatura, por el curado de las capas bases tratadas con ligantes hidráulicos, entre otros).

Dependiendo donde se origine la fisura, se dice que existen dos tipos de fisuras:

- Fisuración ascendente (bottom-up cracking).
- Fisuración descendente (top-down cracking)

Tradicionalmente, se pensaba que la fisuración en pavimentos asfálticos iniciaba en el fondo de la capa de pavimento, debido al fenómeno de fatiga o bien a la reflexión de capas inferiores, progresando la misma hacia la superficie. Esta es la llamada fisuración ascendente.

Sin embargo, estudios recientes (del año 2000 en adelante) han puesto de manifiesto que con frecuencia las fisuras se originan en la superficie del pavimento progresando de manera gradual hacia abajo. Esta es la llamada fisuración descendente. Dicha fisuración se trata de un deterioro de la mezcla bituminosa, probablemente como consecuencia del efecto conjunto de los elevados esfuerzos superficiales aplicados por los neumáticos de los vehículos y las tensiones originadas por los diferenciales térmicos existentes.

En el proceso de formación de las fisuras se pueden identificar tres etapas según Oller [5], a saber:

- I. **Iniciación:** de carácter microestructural y posterior formación de microfisuras (microgrietas) debido a las sollicitaciones de carga
- II. **Propagación:** generación de macrofisuras debido a la unión de microfisuras.
- III. **Fractura completa:** fallo total del material debido a la unión de macrofisuras existentes.

En 1957, Irwin [6] propuso una clasificación de los mecanismos de fisuración en tres modos de propagación:

- **Modo I:** Modo de apertura de la fisura a tracción, en el cual las caras de la fisura se ven separadas de manera paralela. En firmes generalmente se da por el paso de una carga de tránsito (rueda o eje equivalente) sobre una fisura transversal o longitudinal, también por tensiones térmicas en la superficie del pavimento o en capas rígidas bajo pavimentos asfálticos.
- **Modo II:** Modo de corte, donde las caras de la fisura se deslizan en direcciones opuestas una sobre otra. En firmes generalmente se da por el acercamiento de una carga de

tránsito (rueda o eje equivalente) a una fisura transversal o cuando se desplaza sobre el borde de una fisura longitudinal.

- **Modo III:** Modo de desgarro, donde las caras de la fisura se deslizan lateralmente en direcciones opuestas, una con respecto a la otra. En firmes generalmente se da por el paso de una carga de tránsito (rueda o eje equivalente) cerca del final de la fisura longitudinal.

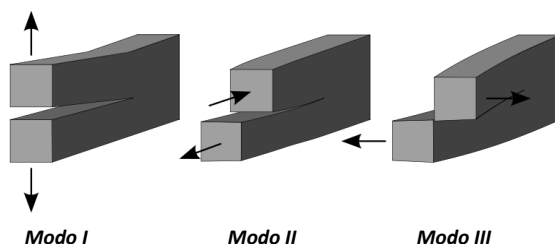


Figura 2-5 Modos de propagación de fisuras según Irwin.

Estudios de Koh et al. [7] han demostrado que tanto para el caso de la fisuración por fatiga ascendente (bottom-up), como para los casos de fisuración descendente (top-down) y fisuración térmica, el modo predominante en las mezclas bituminosas de un firme flexible es el Modo I.

Ahora bien, aunque inicialmente las fisuras presentan solamente un efecto estético, su estudio es importante, pues su aparición constituye la primera etapa en el deterioro del firme, pues a través de ellas se producen filtraciones de elementos extraños que deterioran las aristas de la estructura del firme, se da la filtración de agua que provoca disminución en la resistencia a cortante en las capas inferiores y además se produce una redistribución de esfuerzos en todas las capas del firme debido a la pérdida de continuidad en la rasante.

Actualmente el punto interés principal en los estudios de la fisuración es la capa de rodadura o capas superiores. Debido a esto, las soluciones que se le están dando a este fenómeno hoy en día van enfocadas en esta capa, por ejemplo: aumento de espesores de capa de pavimentos, modificación de las características mecánicas de los materiales de estas capas para que puedan soportar mayores deformaciones, colocación de capas antifisuras, entre las capas agrietadas y la de rodadura, entre otros.

En general, los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes con pavimento bituminoso, tienen en cuenta como principales mecanismos de deterioro las deformaciones excesivas en la zona de rodadura producidas por la acumulación de pequeñas deformaciones en las diferentes capas del firme y la fisuración por fatiga del pavimento bituminoso, ambos fallos generados por la repetida aplicación de cargas (paso de vehículos). Sin embargo, su análisis es complicado debido a las características reológicas de las mezclas bituminosas y a los distintos factores que contribuyen a la formación de fisuras y a su propagación (cargas del tráfico, cambios de temperatura, hidrología y el envejecimiento de los materiales).

Debido a que es una de las causas más importantes de deterioro en el presente documento se estudia la propagación de las fisuras por el fenómeno de fatiga.

2.6 FISURACIÓN POR FATIGA

2.6.1 INTRODUCCIÓN

En la ciencia de los materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Según la norma europea EN 12697-24 [8] la fatiga es la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga.

A pesar que era un fenómeno que era reconocido desde la antigüedad, no había sido definido de manera formal, ni había sido de interés científico, hasta que llegada la Revolución Industrial, se realizaron los primeros estudios en los ejes de acero las ruedas de los ferrocarriles, pues estaban presentando rupturas de manera misteriosa.

A partir de estos estudios, se corroboró que la rotura de con cargas dinámicas son muy inferiores a las necesarias en el caso estático; y a desarrollar métodos de cálculo para el diseño de elementos industriales más seguros.

Años más tarde, se empezó a relacionar las fisuras encontradas en los pavimentos, con la aplicación de cargas cíclicas (tráfico) sobre el mismo. A partir de ahí, se empezó a estudiar el fenómeno de la fatiga en mezclas bituminosas.

2.6.2 FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS

Como se ha mencionado con anterioridad, la fisuración por fatiga del pavimento bituminoso es uno de los principales mecanismos de deterioro que sufren los pavimentos a lo largo de su vida de servicio y es ocasionada principalmente por la aplicación de carga cíclicas debidas al tráfico y los esfuerzos y deformaciones provocados por los cambios de temperatura y humedad en la mezcla.

En los pavimentos bituminosos, la resistencia a la fatiga es la resistencia a la flexión bajo las cargas repetidas del tráfico, manifestada por una pérdida de rigidez y posteriormente por una fisuración generalizada conocida como piel de cocodrilo. Este deterioro se debe al comportamiento fundamentalmente elástico de las mezclas cuando las cargas pasan a velocidades elevadas y a bajas temperaturas. Estas cargas (normalmente muy inferiores a la de rotura) producen un agrietamiento progresivo del material. Esta consideración (cargas cortas y rápidas), se puede describir de la siguiente manera: Los componentes de la tensión en un punto dado de la carretera aumentan cuando la rueda se aproxima, llega a su punto máximo cuando la rueda la tiene encima, y decrece a medida que la rueda pasa adelante. La componente horizontal de compresión en la parte superior de la capa de rodadura se convierte en tensión en la parte inferior. Así, el tráfico vehicular consiste en cargas cortas y rápidas seguidas de periodos de reposo.

La fatiga que produce esta aplicación cíclica de carga en conjunto con cambios de temperatura en la mezcla, produce envejecimiento del ligante y consecuentemente, esto se traduce en la

disminución del módulo dinámico (rigidez) de la mezcla, lo que conlleva a la fisuración de la capa de pavimento.

2.6.3 PARAMETROS QUE AFECTAN LA VIDA EN FATIGA

La fatiga en materiales bituminosos se puede ver afectada tanto por variables en la formulación y composición de la mezcla como por agentes externos que afecten las características de esta.

Dentro de la formulación de la mezcla, existen varios factores que pueden influir en la resistencia a la fatiga, a saber:

- a) **Contenido de betún:** Aumentando ligeramente el contenido de betún, incrementa la resistencia a la fatiga, aunque un aumento muy grande, puede llegar a disminuir el módulo dinámico de la mezcla y por tanto reducir su periodo de vida.
- b) **Dureza del betún:** Un betún blando acentúa el carácter viscoelástico de la mezcla bituminosa, la mezcla pierde su resistencia en pequeñas deformaciones adquiriendo su alargamiento límite a la rotura. Un betún duro, es menos susceptible a las condiciones de temperatura y de tiempo, tendrá un alargamiento límite inferior y una mayor resistencia a las pequeñas deformaciones.
- c) **Contenido de vacíos:** En general las mezclas con alto contenido de huecos, presentan valores bajos de módulos dinámicos y poca resistencia a la fatiga, manifestada inicialmente por el rápido envejecimiento del betún, seguido por el agrietamiento por fatiga. En relación estrecha se encuentra la compacidad de la mezcla, pues dependiendo de esta, será el porcentaje de huecos en la mezcla.
- d) **Granulometría y forma de los áridos:** Las mezclas con fórmulas granulométricas continuas suelen tener una mayor resistencia a la fatiga que aquellas con fórmulas discontinuas. Así mismo el uso de áridos angulosos (preferiblemente cúbicos) y rugosos, suelen tener mayor resistencia a la fatiga que los áridos lisos y redondeados, siempre y cuando tengan una granulometría adecuada.
- e) **Naturaleza mineralógica de los áridos:** Los áridos de naturaleza básica suelen presentar mejor adhesividad con el betún, lo que conlleva a un mejor comportamiento a la fatiga.
- f) **Contenido de filler:** El papel principal que tiene el filler es el de rellenar el esqueleto mineral, obteniendo así un aumento de la compacidad, y por tanto, una subida de los valores del módulo de rigidez. Así, la incorporación del filler disminuye la cantidad de vacíos intergranulares. Para un porcentaje de betún dado, a partir de una cierta cantidad de contenido de finos, se obtiene una caída de las características mecánicas debido a una mala mezcla. Debido a su gran superficie específica, la cantidad de filler es el factor que fija el grueso de la película de betún y del cual depende la rigidez de la mezcla bituminosa.

- g) **Aditivos:** La adición de asfaltenos o látex en polvo a los betunes, mejora la resistencia de la mezcla a la fatiga. Por otro lado, la adición de alquitrán, presenta el efecto adverso, empeorando su comportamiento a este tipo de fallo.

Por otro lado, existen agentes externos a la formulación que pueden llevar a las mezclas a presentar procesos de fatiga (además de las cargas de tráfico), a saber:

- **Temperatura:** La temperatura afecta al valor del módulo de rigidez, aumentándolo cuando la temperatura es baja y disminuyéndolo cuando es alta. El aumento de módulo a temperaturas bajas no significa que la mezcla sea mejor o más resistente que a temperaturas altas, pues la respuesta de la mezcla no depende únicamente del módulo, pero lo que si se puede asegurar, es que el comportamiento varía en relación a la temperatura, pues a mayor temperatura se la respuesta es más viscoelástica y a menor más elástica.
- **Humedad:** La humedad es un agente nefasto en las mezclas bituminosas, pues puede deteriorarlas de varias maneras, entre ellas: por pérdida de cohesión entre partículas, fisura por adhesión entre betún y áridos, y producir degradación por fractura de partículas de agregado debido a las heladas.

2.6.4 DETERMINACIÓN DE LA FATIGA

Como se ha citado anteriormente, el fenómeno de la fatiga de los materiales fue estudiado por primera vez durante la segunda mitad del siglo XIX. August Wöhler [9], ingeniero alemán, fue el primer investigador en estudiar el problema. En el año de 1852 se le asignó investigar las causas de la fractura de los ejes de acero de las locomotoras de la época. Para ello Wöhler desarrolló ensayos en los que los ejes se veían sometidos a un gran número ciclos de carga, muy por debajo de la carga de rotura del material. Como consecuencia de estos estudios Wöhler desarrolló lo que se conocería más tarde como *Curvas S-N* o *Curvas de Wöhler*.

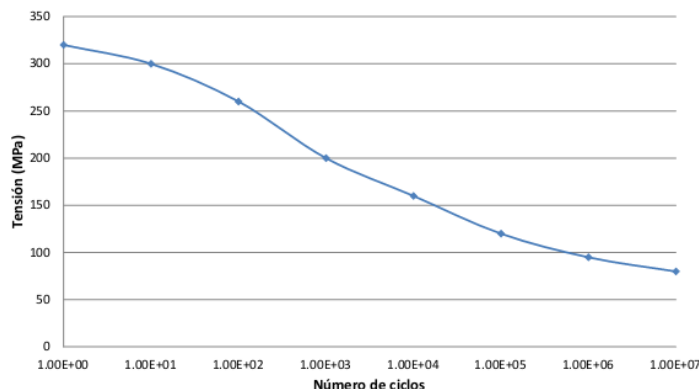


Figura 2-6 Curva de Wöhler para un aluminio frágil con tensión de fallo de 320 MPa.

Estas curvas representan el esfuerzo aplicado al material frente al número de ciclos hasta fallo en escala logarítmica, y se describen de manera matemática por la ecuación 2.1.

$$\sigma = a \cdot N^{-b} \quad (2.1)$$

donde σ es la tensión impuesta, a y b los parámetros de la regresión que se ajustan mediante los datos experimentales y N el número de ciclos hasta fallo.

Este descubrimiento ha sido utilizado desde entonces para representar las leyes de fatiga de cualquier tipo de material, sin embargo no fue sino hasta el año 1961 que a raíz de los ensayos de fatiga llevados a cabo por Pell et al. [10], tanto en betunes como en mezclas asfálticas, que se empezó a emplear las curvas S-N en mezclas bituminosas, observándose que la deformación es un factor más importante que las tensiones en el proceso de fatiga de las mezclas.

Antes que se realizara esta investigación, el diseño de los firmes y pavimentos en general se basaba en métodos experimentales basados en el comportamiento de diferentes tipos de firmes ensayados (p.e: ensayo AASHO) en modelos a escala reales, lo cual limitaba el número de casos a estudiar y su extrapolación a otros casos. Sin embargo, a partir de 1961 y principalmente después de la aparición de los ordenadores, se han intensificado los estudios de la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas, dando lugar a la aparición de métodos analíticos que relacionan la fatiga en pavimentos bituminosos con el estado tensional y de deformaciones inducido por la aplicación de cargas a diferentes frecuencias y temperaturas.

Los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes más conocidos y utilizados, asumen que la estructura de firme está compuesta por capas horizontales de semiancho infinito a las que se les da ciertas características mecánicas (módulo de rigidez y coeficiente de Poisson) y geométricas (espesor) y se basan en la solución de un sistema multicapa elástico lineal.

Estos métodos relacionan a los estados tensionales y de deformación de las capas del firme con la resistencia a la fatiga, expresada ésta en números de aplicaciones de carga que resistiría cada capa con el estado de deformaciones que presenta en su fibra inferior.

Para el caso de las capas de mezcla bituminosa, mediante el ensayo de varias muestras del mismo material a diferentes estados de formación y tensión, y determinando un criterio de falla (valor de algún parámetro del material con el cual se considera que la muestra ha fallado, generalmente el 50% del módulo inicial), se comenzaron a generar las conocidas leyes de fatiga de los materiales de cada capa del firme, cuyo ejemplo se observa en la Figura 2-7.

Siguiendo el enfoque más clásico, y por medio del ajuste de los datos obtenidos para cada muestra, las leyes de fatiga presentan la siguiente expresión:

$$N = k_1 \cdot \varepsilon^{k_2} \quad (2.2)$$

Donde:

N = número de aplicaciones de carga hasta producir el fallo por fatiga del material.

ε = deformación unitaria a tracción del material en microdeformaciones.

k_1, k_2 = constantes que describen el comportamiento a fatiga del material.

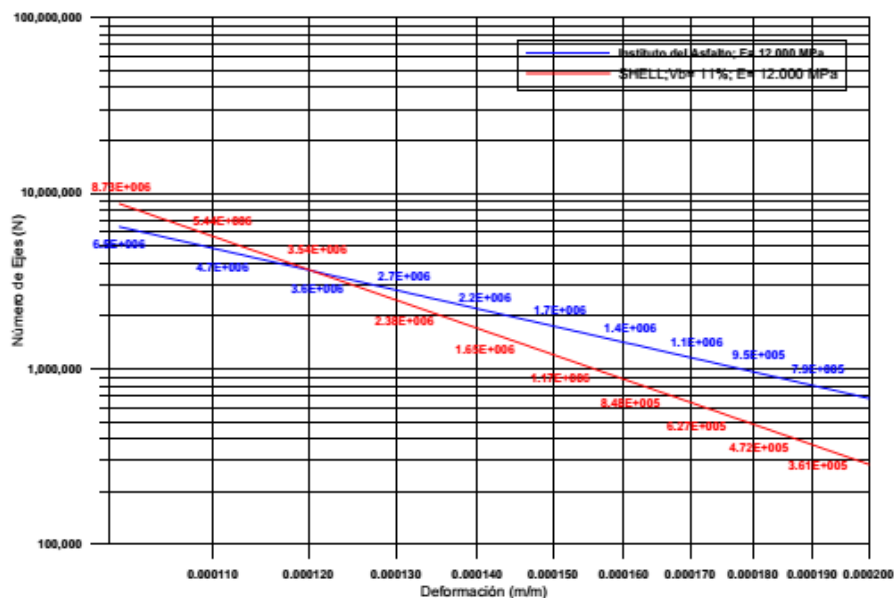


Figura 2-7 Leyes de fatiga del Instituto del Asfalto y de la Shell.

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos y costosos ensayos de laboratorio y calibraciones posteriores del modelo in situ, que tomen en cuenta el efecto *healing* de los pavimentos bituminosos, debido a periodos de reposos o cargas muy bajas, y el nivel de severidad con que se define la falla. Para obtener esta calibración, se recurre a los llamados factores de cambio (shift factors en inglés).

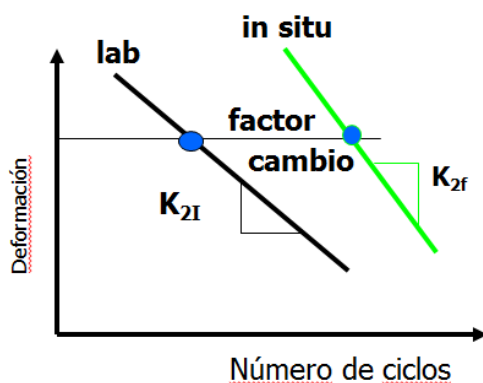


Figura 2-8 Factor de cambio debido al efecto healing.

Estos factores pueden tomar valores muy diversos (con valores que pueden ir desde 3 hasta 100 [11]), por ello, muchas veces se suele recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos. Dos de estas grandes organizaciones, a manera de ejemplo, son la SHELL y el Instituto del Asfalto (AI). Cada uno de ellos ha desarrollado una expresión genérica simplificada de la ley de fatiga de las mezclas bituminosas, las cuales se muestran graficadas en la Figura 2-7 y se expresan con las siguientes ecuaciones [12]:

- **Ley de Fatiga de la Shell**

$$N = ((0.856V_b + 1.08) \cdot (10^6 \cdot E)^{-0.36})^5 \cdot \epsilon^{-5} \quad (2.3)$$

Donde V_b es el % de betún en volumen y E es el módulo de la mezcla en Megapascals.

- **Ley de Fatiga del Instituto del Asfalto**

$$N = (0.0796 \cdot C) \cdot 0.145 \cdot E^{-0.854} \cdot \epsilon^{-3.291} \quad (2.4)$$

$$C = 10^M \quad (2.5)$$

$$M = 4.84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right) \quad (2.6)$$

Donde V_a es el volumen de huecos, V_b es el volumen de betún y E es el módulo de la mezcla en Megapascals.

Sin embargo, el uso de estas leyes queda limitado a las condiciones climáticas, carga y de materiales con las que fueron generadas, por lo que su uso en diferentes latitudes y tráfico conllevaría a la introducción de errores en el diseño.

Es por esto que a finales de la década de los 80 se comenzó a estudiar más a fondo el comportamiento de los betunes, pues son la base de las características reológicas de las mezclas bituminosas. De esta manera se implementó en los Estados Unidos de América el programa SHRP (Strategic Highway Research Program), dentro del cual se implementó el procedimiento SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements), donde se introdujo el uso del reómetro dinámico de corte (DSR por sus siglas en inglés), instrumento utilizado para determinar el módulo complejo (G^*) y el ángulo de desfase (δ) en los betunes. Gracias a este procedimiento, se permitió conocer y explicar comportamientos mecánicos distintos para mezclas de similar composición volumétrica, dependiendo de la respuesta de la interacción entre el filler-betún, naturaleza y forma de los áridos, absorción de los áridos, etc.

Como consecuencia de los resultados obtenidos dentro del SHRP, la AASHTO estableció a partir del año 2002 unos límites para los valores del módulo complejo y del ángulo de desfase, para garantizar un buen comportamiento a la fatiga del ligante, y por tanto de la mezcla, dentro de los rangos de temperatura a la que estaría sometida en su vida de servicio. Aún así, se ha logrado comprobar que estos límites, no garantizan hoy en día un buen comportamiento de la mezcla a la fatiga.

Más recientemente, se ha hecho uso del concepto de ratio de energía disipada (EDR por sus siglas en inglés) en materiales al estudio de fatiga en betunes en el DSR. La EDR es el área de bucle generada en los diagramas esfuerzos-deformación a raíz de los ciclos de histéresis generados por la aplicación de cargas cíclicas en algún material viscoelástico (en este caso el betún). La histéresis se genera por el retraso que hay entre el momento de la aplicación de carga y el momento en que reacciona el material.

2.7 ENFOQUES DE CARACTERIZACIÓN DE LA FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS

A partir de la creación de las leyes de fatiga y con el paso de los años se ha enfocado la caracterización a la fatiga de las mezclas bituminosas desde diferentes conceptos, que se pueden describir y resumir de la siguiente manera:

2.7.1 ENFOQUE FENOMENOLÓGICO O CLÁSICO

Es el que se había descrito con anterioridad, el cual relaciona las tensiones o las deformaciones con un número de repeticiones de carga que causan el fallo del espécimen. Dependiendo de su modo de carga su formulación general es la siguiente:

$$N = a \cdot \varepsilon^b \quad (2.7)$$

$$N = c \cdot \sigma^d \quad (2.8)$$

donde:

N = número de aplicaciones de carga hasta el fallo.

ε, σ = tensión o deformación aplicada de manera repetida.

a, b, c, d = constantes que describen el comportamiento a fatiga del material

Por su simplicidad es la más vastamente utilizada para el diseño de pavimentos bituminosos, sin embargo, con este modelo no se puede representar de manera real los diferentes y complejos mecanismos de carga a los que se encuentra sometido el pavimento, ni tampoco puede representar un mecanismo de acumulación de daño en las mezclas bajo estas cargas, al ser cada relación dependiente del modo y velocidad de carga.

2.7.2 ENFOQUE DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

Caracteriza la fisuración por fatiga en tres etapas, siendo la primera el inicio de la fisura, la segunda es la propagación estable de la fisura y la tercera la fractura inestable del material. Como parámetro principal, establece el uso de un factor de intensidad de tensiones en la punta de la fisura K , el cual relaciona el tamaño de una grieta o fisura con el nivel de esfuerzos al que se somete el material.

El modelo mas utilizado para este tipo de enfoque es el de la Ley de Paris [13], el cual es propuesto específicamente para la segunda etapa (propagación), en la cual se produce la mayor parte de la fatiga del material. Con este modelo se puede representar la velocidad de propagación de la fisura en función del factor intensidad de tensiones K , de manera que el estado tensional queda totalmente definido por este factor en este punto, asumiendo que el material es elástico lineal.

$$\frac{\partial a}{\partial N} = C(\Delta K)^m \quad (2.9)$$

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (2.10)$$

donde:

$$\frac{\partial a}{\partial N} = \text{velocidad de crecimiento de la fisura}$$

a = longitud de la fisura

N = número de ciclos de carga

C, m = parámetros de la regresión para cada material.

$\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ = tensión máxima y mínima en un ciclo

Y = factor geométrico (adimensional e independiente del material)

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$

ΔK = valor máximo y mínimo del factor intensidad de tensiones en un ciclo.

El anterior modelo, es el que más se utiliza en cuanto a conceptos de mecánica de la fractura, sin embargo al asumir un comportamiento elástico de las mezclas bituminosas, no es capaz de modelar de manera certera el comportamiento de las mezclas para distintas velocidades de carga y temperatura.

Tiempo después con el desarrollo de la J-integral por Schapery [14], se dio un avance importante en la mecánica de la fractura elasto-plástica, de manera que se pudiera tomar en cuenta la viscoelasticidad de las mezclas. Esta teoría trata de unas integrales de contorno independientes del camino tomado y coinciden con el ratio de energía liberada en un material elástico no-lineal que contiene una fisura para cada aplicación de carga. El cálculo de esta energía para una material elástico con una fisura depende del módulo del material y del valor del factor intensidad de tensiones en la punta de la fisura.

$$J = G = \frac{K_1^2}{E'} \quad (2.11)$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu} \quad (2.12)$$

donde:

- J = J-Integral
- G = energía liberada en cada aplicación de carga
- E' = módulo en tensión plana
- K_1 = factor de intensidades en modo I
- E = Módulo de rigidez
- ν = Módulo de Poisson

De esta manera, para materiales viscoelásticos, en lugar de emplear el factor intensidad de tensiones en la ecuación 2.11, se puede emplear el incremento de la J-integral que proporciona un método más adecuado en estos casos:

$$\frac{\partial a}{\partial N} = A(\Delta J)^n \quad (2.13)$$

donde:

C, m = parámetros de la regresión para cada muestra

$$\Delta J = J_{max} - J_{min}$$

ΔJ = diferencia entre los valores máximos y mínimos de J en cada ciclo

De esta forma, obteniendo las J-integrales y registrando la longitud de fisura a diferente número de ciclos se puede obtener la regresión que relaciona el incremento de la J-integral con la velocidad de propagación de fisuras en el material.

Con este tipo de caracterización, aunque reciente, Lytton et al [15] han logrado modelar de manera adecuada la propagación de microfisuras por fatiga en las mezclas bituminosas. Sin embargo, al ser relativamente joven, se necesitan más ensayos de laboratorio, con diferentes tipos de muestras, cargas y temperaturas, para poder ser normalizada.

2.7.3 ENFOQUE DESDE LA MECÁNICA DEL MEDIO CONTINUO

Se basa en la generación de un modelo constitutivo de daño. Estos relacionan mediante un modelo matemático propiedades del material (mezcla bituminosa) con parámetros del modelo mediante principios mecánicos. Este tipo de modelo tiene la habilidad de utilizar únicamente una variable para describir el daño en la mezcla, pues no distingue si el mismo proviene de mecanismos de fractura o como consecuencia de otras formas de daño, como por ejemplo deformaciones plásticas. La variable de daño utilizada entonces es una variable de estado interna S_m .

Los modelos viscoelásticos continuos de daño (VECD por sus siglas en inglés) más recientes, se basan en el principio de correspondencia elástico-viscoelástico desarrollado por Schapery [14] y la teoría del potencial de trabajo desarrollada por Schapery et al. [16]. El principio de correspondencia elástico-viscoelástico hace uso de las llamadas pseudo-deformaciones, con el fin de simplificar el comportamiento visco-elástico en una solución elástica lineal en el modelo matemático.

Para el caso de un modelo VECD uniaxial, las pseudo-deformaciones se definen de esta manera:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E^R} \int E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (2.14)$$

donde:

- E^R = módulo de referencia, usualmente con valor 1.
- ε^R = pseudo-deformación
- $E(t)$ = módulo de relajación viscoelástico lineal
- t = tiempo
- τ = variable de integración (tiempo)

En el mismo modelo uniaxial, el comportamiento no lineal causado por la distribución de microfisuras es tomado en cuenta por las variable de estado interna, la cual define el crecimiento del daño dentro del espécimen. Las siguientes ecuaciones definen el comportamiento tensión-deformación de un sólido viscoelástico, con una función de daño dependiente del tiempo.

$$\sigma = \sigma(\varepsilon^R, S_m) \quad (2.15)$$

$$W^R = \frac{I}{2} C(S_m) \varepsilon^R{}^2 \quad (2.16)$$

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} C(S_m) \varepsilon^R \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} \right)^\alpha \quad (2.18)$$

donde:

σ = tensión.

ε^R , = pseudo-deformación.

S_m = variable de estado interna de daño.

$C(S_m)$ = pseudorigidez, la cual es una función interna de daño

W^R = función de densidad de energía

I = parámetro de rigidez inicial para eliminar variabilidad entre muestras

t = tiempo

α = constante del material relacionada con el ratio de crecimiento del daño

Con el desarrollo de las anteriores ecuaciones diferenciales en modelos de elementos finitos o de diferencias finitas, se ha visto que los modelos VECD, presentan un gran potencial en la predicción de la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas bajo condiciones de carga reales, sin embargo, los mismos únicamente consideran el efecto de las microfisuras y asumen que las fisuras crecen de manera continuada, por lo que fallan en describir el comportamiento de la propagación de la fisura después que empiezan las macrofisuras., las cuales muchas veces crecen de manera discontinua. Además para modelos en 3 dimensiones, el trato de las ecuaciones diferenciales que se generan en la resolución de las funciones descriptivas, se vuelve más complejo.

2.7.4 ENFOQUE ENERGÉTICO

Cuando un material se ve sometido a cargas externas, el área bajo la curva tensión-deformación, representa la energía impuesta al material. En materiales puramente no elásticos, un proceso de carga y descarga siempre va asociado con disipación de energía, debido a que los trayectos de carga y descarga no se sobreponen. Este fenómeno es llamado histéresis y el área dentro del bucle de histéresis para un proceso de carga y descarga, representa la energía disipada para un ciclo de carga. Debido a la naturaleza visco-elástica de las mezclas bituminosas, relacionar la energía disipada a la rotura con la fatiga, se ha considerado prometedor. En la Figura 2-9 se observa un ejemplo de histéresis en una gráfica tensión -deformación.

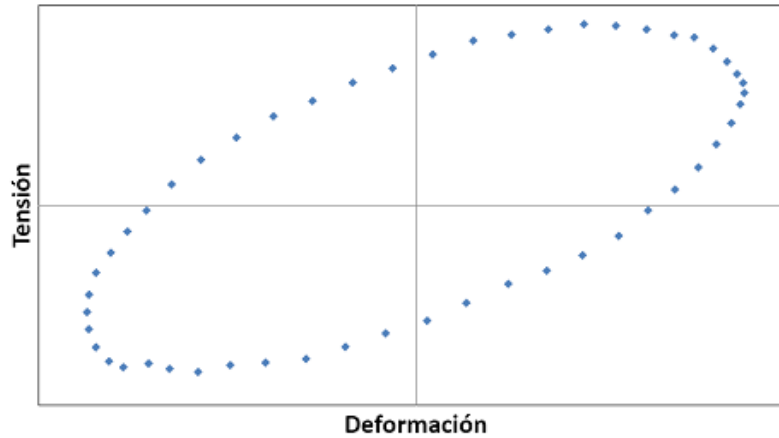


Figura 2-9 Ciclo de histéresis para un ensayo cíclico de una mezcla bituminosa.

Para materiales viscosos, la densidad de energía local W_i producida por disipación viscosa en el ciclo i , es dada por la siguiente expresión:

$$W_i = \pi \cdot \varepsilon_i \cdot \sigma_i \cdot \sin \varphi_i \quad (2.19)$$

donde:

W_i = densidad de energía en el ciclo i

ε_i = amplitud de la deformación en el ciclo i

σ_i = amplitud de la tensión en el ciclo i

φ_i = ángulo de desfase entre tensión y deformación en el ciclo i

Se han dado diferentes enfoques al concepto de energía disipada para caracterizar la fatiga, entre ellos: energía disipada inicial, energía disipada acumulada, relación de trabajo y proporción de cambio de energía disipada.

2.7.4.1 Energía disipada inicial (IDE por sus siglas en inglés):

Energía disipada inicial (IDE por sus siglas en inglés):

La IDE es la energía disipada medida en los primeros ciclos de carga. En este caso la energía disipada en el ciclo 50 es considerada como la IDE. La SHRP-A-404 [17], utiliza el siguiente modelo para relacionar la IDE con los ciclos de carga a la fatiga:

$$N_f = 6.72e^{0.049VFB}(w_0)^{-2.047} \quad (2.20)$$

donde:

N_f = número de ciclos a fatiga

VFB = porcentaje de huecos llenos de betún

w_0 = IDE

Baburamani y Porter [18] han encontrado una buena correlación entre este parámetro (IDE) y la caracterización de la fatiga, sin embargo estudios de Shen y Carpenter [19] hacen ver que presenta la desventaja que este enfoque no es adecuado cuando se trabaja con niveles de deformación/daño bajos.

2.7.4.2 Energía disipada acumulada (CDE por sus siglas en inglés):

Es la sumatoria de la energía disipada durante todo el proceso de fatiga, que relaciona el comportamiento a fatiga al inicio y al final de los ensayos. Una relación entre CDE y número de ciclos a la fatiga es la siguiente:

$$W_N = A(N_f)^z \quad (2.21)$$

donde:

W_N = CDE hasta el fallo

N_f = número de ciclos a fatiga

A, z = coeficientes derivados de la regresión

Estudios de la SHRP-A-404 [17] encontró que la relación entre la CDE y el número de ciclos a la fatiga es independiente del modo de carga (tensión o deformación) y de periodos de reposo recurrentes. Sin embargo, también se demostró que la relación era dependiente del material y la temperatura.

2.7.4.3 Relación o proporción de trabajo (WR por sus siglas en inglés):

Se define como la relación de la IDE en el ciclo 1 y la CDE, como se muestra en la ecuación 2.22.

$$\Psi_{N1} = \frac{w_0(N1)}{W_{N1}} \quad (2.22)$$

donde:

Ψ_{N1} = WR

$N1$ = número de ciclos para el inicio de la fisuración

w_0 = IDE

W_{N1} = CDE hasta el ciclo $N1$

Rowe [20] propone que el número de ciclos se calcule para el inicio de la fisuración. El parámetro $N1$, corresponde al punto donde se da una brusca variación de la curva en una gráfica WR vs número de ciclos en una prueba de deformación controlada.

Este método es bastante atractivo, pues relaciona dos conceptos de energía disipada, sin embargo muchas veces es difícil o laborioso poder encontrar el punto de inflexión (N1) en las gráficas antes citadas.

2.7.4.4 Proporción de cambio de energía disipada (RDEC por sus siglas en inglés):

Se basa en el concepto en el cual para que un material presente daño, debe haber un cambio en la energía disipada entre cada ciclo de carga [21]. La formulación general se representa de la siguiente manera:

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad (2.23)$$

donde:

$RDEC$ = Proporción de cambio de energía disipada

DE_n = energía disipada producida en el ciclo n

DE_{n+1} = energía disipada producida en el ciclo $n+1$

RDEC, elimina la energía que es disipada en otras formas sin producir daño (p.e: plasticidad). Esto permite tener un buen indicador del daño que ocurre a la mezcla entre un ciclo y otro. La evolución del RDEC vs el número de ciclos de carga en los ensayos de fatiga generan el siguiente tipo de curvas:

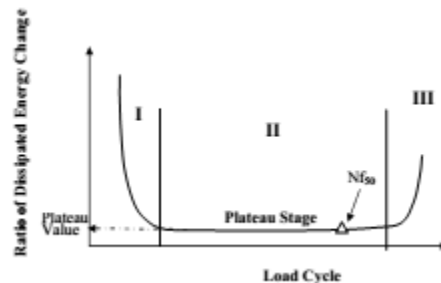


Figura 2-10 Típico gráfico de evolución del RDEC [22].

De la Figura 2-10 se observa claramente como el daño representado por el RDEC se desarrolla en tres fases, desarrollando una larga meseta (plateau stage) en la segunda fase, indicando que en este caso existe un periodo relativamente constante y continuo de energía transformada en daño, hasta un punto donde se da un cambio brusco de pendiente (inicio de fase III), que sería el punto de ruptura. Así mismo, se observa un punto llamado "plateau value" (valor de meseta, PV por sus siglas inglés) relacionado con el Nf_{50} el cual se propone como criterio de fallo, siendo este el número de ciclos con el que se llega al 50% de la reducción en el módulo inicial.

Estudios de Shen y Carpenter [22] han demostrado que existe una relación fundamental entre el PV y el Nf_{50} , la cual es independiente del tipo de mezcla, de modo de control de carga, condiciones de ensayo (frecuencia, periodos de descanso, etc) y en general todo el rango de aplicación deformación/daño. Por lo tanto, el valor PV se puede considerar como un parámetro de daño que

incluye los efectos de las propiedades de la mezcla y las condiciones de carga, siendo por tanto un indicador de energía fundamental en la caracterización de la fatiga en mezclas bituminosas.

Este enfoque energético relativamente nuevo, es esperanzador, sin embargo la graficación de la curva RDEC vs número de ciclos, presenta mucha dispersión de puntos que es necesario ajustar para poder obtener el valor PV.

2.8 **PROCEDIMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN DE LEYES DE FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS**

2.8.1 **INTRODUCCIÓN**

Debido a la naturaleza visco-elasto-plástica de las mezclas bituminosas, es muy difícil poder conseguir un modelo y ensayo que permita reproducir de manera fiel la fatiga producida en las mezclas al ser sometidas a cambios térmicos y diversas velocidades, tiempos y magnitud de cargas. Además, un ensayo ideal, sería aquel que pueda reproducir un estado tensional similar al que produce en la realidad una carga simple sobre la estructura de pavimento, en donde se distinguen 4 casos [23]:

- *Caso 1:* Compresión triaxial en la superficie inmediata bajo la rueda.
- *Caso 2:* Tracción longitudinal y transversal combinada con compresión vertical en la parte inferior de la capa bituminosa bajo la rueda.
- *Caso 3:* Tracción longitudinal o transversal en la superficie a una cierta distancia de la carga.
- *Caso 4:* Compresión longitudinal o transversal en el fondo de la capa bituminosa a una cierta distancia de la carga.

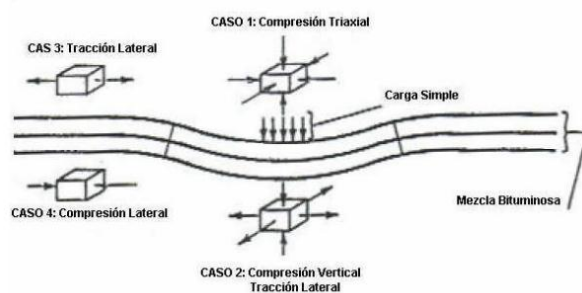


Figura 2-11 Estados tensionales producidos por el paso de vehículos [23].

Existen ensayos que representan cada uno de estos estados tensionales, sin embargo, no hay ninguno aún que represente los cuatro a la vez, aunque según diversos investigadores, se ha determinado que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa y que por ello no es necesario representar los cuatro casos simultáneamente.

En base a ello, durante los últimos 40 años se han desarrollado diferentes ensayos para simular la fatiga en mezclas bituminosas. Algunas de las metodologías de ensayo más utilizadas se detallan a continuación.

2.8.2 TIPOS DE ENSAYO

- **Ensayo de flexo-tracción:** Se da una relación entre el comportamiento a la fatiga de las mezclas y el estado de tensiones/deformación, mediante la aplicación de distintas magnitudes y configuraciones de cargas (sinusoidales, triangulares, rectangulares, etc) en distintos puntos de una viga prismática (en los tercios, cuartos o medios de la longitud de la misma).
- **Ensayos de tracción directa:** Se da una relación entre el comportamiento a la fatiga de las mezclas y el estado de tensiones/deformación, mediante la aplicación de cargas de tracción a un espécimen cilíndrico o prismático.
- **Ensayos de tracción indirecta:** Se da una relación entre el comportamiento a la fatiga de las mezclas y el estado de tensiones/deformación, mediante la aplicación de carga en la dirección diametral de un espécimen cilíndrico.
- **Ensayos triaxiales:** Se da una relación entre el comportamiento a la fatiga de las mezclas y el estado de tensiones/deformación, mediante la aplicación a una probeta cilíndrica de una tensión axial sinusoidal de compresión, de amplitud y frecuencias constantes y una tensión lateral de compresión usualmente fija.
- **Ensayos de máquina de pista:** Incluye ensayos de laboratorio y a escala real, que relacionan la fisuración, el número de aplicaciones de carga y el estado de tensión/deformación calculados. La configuración de la pista puede ser circular o lineal en ensayos a escala real.
- **Ensayo BArrido de DEformaciones (EBADE):** Se da una relación entre el comportamiento a la fatiga de las mezclas y el estado de tensiones/deformación, mediante la aplicación a una probeta prismática de ciclos de tracción-compresión a deformación controlada y frecuencia constante en el que cada cierto número de ciclos se aumenta el nivel de deformación hasta la rotura de la probeta.

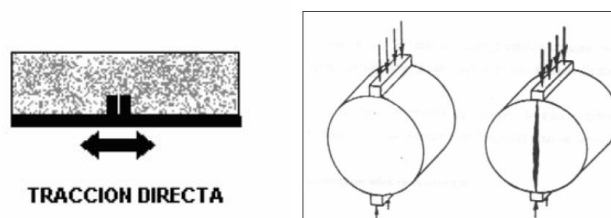


Figura 2-12 Ensayos de tracción directa e indirecta.



Figura 2-13 Ensayos de flexotracción.

De todos los anteriores tipos de ensayo se puede generar modelos que representen el comportamiento a fatiga de la mezcla, sin embargo como ya se ha mencionado, debido a la compleja naturaleza de las mezclas bituminosas, en realidad, estos modelos son simple aproximaciones a la vida real de la mezcla y por lo tanto deberían ser utilizados únicamente como una herramienta para comparar comportamiento entre las mezclas y no para predecir la vida de una mezcla específica.

2.8.3 TIPO DE CARGA EN LOS ENSAYOS DE FATIGA

Como ya se mencionó, es muy difícil representar en laboratorio el tipo de carga a las que se ven sometidas las mezclas in situ. Con el propósito de poder generar un tipo de carga similar a la realidad, en los ensayos de fatiga se suele trabajar con tres tipos de carga, a saber:

- **Carga sinusoidal:** onda de carga que sigue la función del seno para definir la amplitud de la carga en el tiempo o con el número de aplicaciones de carga.

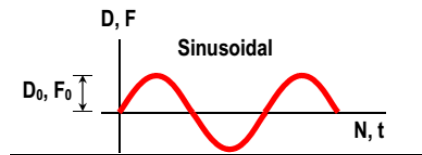


Figura 2-14 Carga tipo sinusoidal.

- **Carga Haversine:** onda de carga que sigue la función del haversine para definir la amplitud de carga en el tiempo o con el número de aplicaciones de carga. El haversine se define como:

$$hav(z) = \sin^2\left(\frac{z}{2}\right) \quad (2.24)$$

donde:

z = variable independiente (tiempo o número de ciclos)

$hav(z)$ = haversine de z

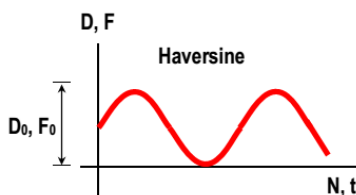


Figura 2-15 Carga tipo haversine.

- **Cargas cíclicas o discontinuas:** intercala periodos de carga con periodos de tiempo de reposo, de manera periódica. La carga puede ser constante o variable, pero siempre tiene que haber un periodo de carga y otro de reposo intercalados.

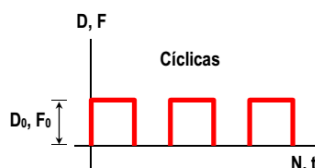


Figura 2-16 Cargas tipo discontinuas.

Se puede observar que las cargas haversine tienen una forma sinusoidal, solamente que estas se mueven únicamente en el rango positivo, mientras que las sinusoidales en los dos (positivo y negativo).

El uso de las cargas cíclicas o discontinuas, es útil para simular la respuesta de las mezclas en los tiempos de reposo en la vida real. A raíz de este tipo de aplicación de carga, se pudo observar que el pavimento tiende a recuperar un porcentaje de sus propiedades mecánicas, debido al fenómeno de tixotropía (recuperación viscoelástica del cemento bituminoso) y a la reformación de fuerzas confinantes en el material después de eliminada la carga. Por esto, se ha concluido que la vida a fatiga de las mezclas aumenta en ensayos discontinuos y cuanto más largo sean los tiempos de reposo.

Sin embargo, como ya se mencionó, para simular correctamente el comportamiento in situ, se debería hacer una combinación de estas tres, pero esto es muy difícil de lograr en el laboratorio, por lo que en la mayoría de las veces se utiliza únicamente uno de ellos. La escogencia de esta, irá relacionada con los parámetros que se quieran medir en el ensayo

2.8.4 MODO DE CONTROL CARGA DE EN LOS ENSAYOS DE FATIGA

La gran mayoría de las mezclas bituminosas trabajan en temperaturas donde su comportamiento generalmente es dúctil, lo que provoca que al llevarse a cabo los ensayos de fatiga para sus temperaturas de servicio, estas no fallen de manera brusca, sino que se van fisurando poco a poco, con un progresivo daño del material, sin que se llegue a fisurar de manera completa la probeta. Debido a este comportamiento, para cualquier ensayo de fatiga en mezclas bituminosas, se deben establecer con anterioridad criterios de fallo, donde generalmente el valor de algún parámetro medido o calculado durante el ensayo es acotado hasta cierto límite. Dependiendo del

modo de control de carga con el que se ensaye el espécimen, así será el valor del parámetro con el que se considera que la muestra ha fallado. Generalmente el parámetro considerado es el módulo de la mezcla.

Existen dos tipos de modos de control de carga en los ensayos de fatiga, a saber:

- Ensayos por tensión controlada
- Ensayos por deformación controlada

En los ensayos de tensión controlada, la tensión es mantenida constante durante los ciclos de carga y la deformación aumenta con los ciclos de carga. Normalmente se va registrando la deformación producida y la resistencia a fatiga del material se asocia al ciclo en que se produce la rotura del material y la carga se hace cero o en otros casos, cuando el módulo de la mezcla se reduce a su 10%.

En los ensayos de deformación controlada, la deformación es mantenida constante durante todos los ciclos de carga y la tensión disminuye con cada ciclo de carga. Se considera que se ha producido el fallo por fatiga cuando la carga o el módulo del material ensayado se reduce a la mitad. Estudios por parte de Monismith y Deacon [24] la resistencia a la fatiga obtenida con los ensayos de tensión controlada es menor que la obtenida con los ensayos a deformación controlada.

En la vida real, las condiciones de carga son más complejas y generalmente combinan ambos tipos de modos de carga. Se ha sugerido por Huang [25] que ensayos de deformación controlada sean utilizados en pavimentos bituminosos relativamente delgados (2 pulgadas) apoyados sobre bases rígidas, pues la deformación en la capa de mezcla bituminosa es dependiente de las capas inferiores y no se ve afectada por su disminución en la rigidez, mientras que ensayos de tensión controlada son sugeridos para espesores de pavimentos asfálticos relativamente grandes (mayores a 6 pulgadas) que presentan una rigidez relativamente alta y el cual si es componente que soporta por si mismo gran parte de las cargas de servicio. Para pavimentos bituminosos con espesores intermedios se han sugerido una combinación de los dos métodos de control de carga. Para estos pavimentos de espesores intermedios, se ha sugerido el uso de un factor de modo, basado en el porcentaje de cambio en las tensiones y deformaciones debido a la reducción en el módulo de la mezcla al tomar en cuenta el tipo de modo de carga. Este factor de modo se definió de la siguiente manera:

$$MF = \frac{|A|-|B|}{|A|+|B|} \quad (2.25)$$

donde,

MF = factor de modo

A = porcentaje de cambio de las tensiones debido a la disminución del módulo en un porcentaje C.

B = porcentaje de cambio de las deformaciones debido a la disminución del módulo en un porcentaje C.

C = un valor arbitrario pero fijo de la reducción del módulo, como resultado de la acumulación de daño por fatiga bajo cargas cíclicas y repetitivas.

Se asumía que MF era -1 para ensayos de tensión controlada, +1 para ensayos de deformación controlada y $-1 < MF < +1$ para modos de control intermedios. Utilizando este factor de modo es posible estimar la relación entre la curva de control por deformaciones y la curva de control por tensiones.

Sin embargo, la escogencia del tipo de modo de control llegar a utilizar, sigue siendo una cuestión particular de cada situación en la que se encuentra en servicio la mezcla bituminosa.

2.8.5 CRITERIOS DE FALLO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FATIGA EN MEZCLAS BITUMINOSAS

En los apartados anteriores se describió de manera breve los procedimientos y enfoques para caracterizar la fatiga. Además se mencionó que en los distintos ensayos se pueden realizar por deformación o tensión controlada, sin embargo hasta aquí no se había definido aún el criterio con el cual se considera que una probeta ha fallado.

La correcta selección de un adecuado criterio de fallo es muy importante, pues dependiendo del que se escoja, puede llevar a predecir vidas de fatiga muy diferentes entre uno y otro, con la consecuencia de sobrecalcular o infracalcular el espesor de dimensionamiento de la capa de pavimento bituminoso en firmes [26].

A continuación se describirán cuatro de estos criterio, que son usualmente los más utilizados.

2.8.5.1 El criterio de falla clásico

Analiza y relaciona un valor umbral del desplazamiento, la carga o el módulo con el fallo del especimen, para ensayos controlados por tensión o deformación.

- En el caso de ensayos a flexotracción con probetas trapezoidales controlados por tensión, se considera que el fallo por fatiga se da cuando el valor del desplazamiento alcanza el doble del valor del desplazamiento inicial (D_0 en la figura).
- En el caso de ensayos a flexotracción con probetas trapezoidales controlados por desplazamiento/deformación, se considera que el fallo por fatiga ($N_{failure}$ en la figura) se da cuando el valor de la carga o el valor del módulo alcanzan la mitad de los valores iniciales.

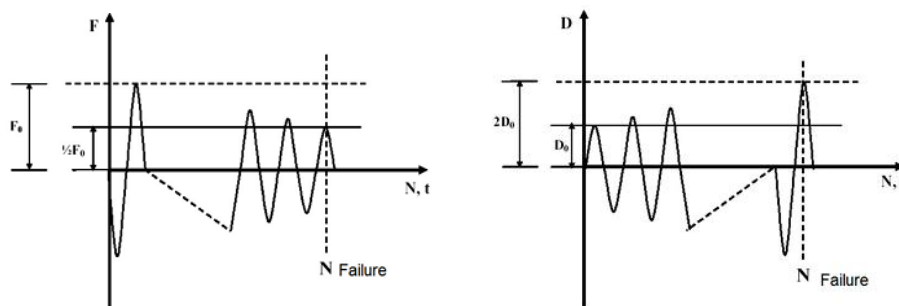


Figura 2-17 Ensayo controlado a deformación (izquierda) y a tensión (derecha) [26].

El criterio en el que el módulo alcanza el 50% del valor, es el más utilizado en los ensayos a flexotracción por deformación controlada, sin embargo, se ha demostrado por parte de Pérez-Jiménez et al. [27] que este valor no es apropiado para mezclas muy dúctiles, pues en los ensayos se ha observado que este tipo de mezclas no está ni cerca de la ruptura cuando el módulo ha alcanzado este valor. Estos mismos estudios, han propuesto un criterio del 25% del valor del módulo inicial para este tipo de mezclas.

2.8.5.2 El criterio de falla por daño

Se basa en el análisis de los valores del módulo de rigidez de la mezcla a lo largo del proceso de fatiga. En el proceso de fatiga se pueden distinguir tres fases [28], como se observa en la Figura 2-18.

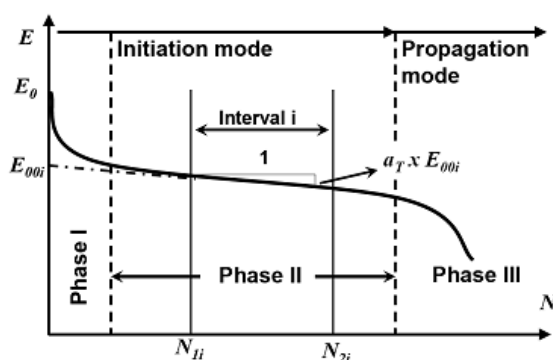


Figura 2-18 Fases del proceso de fisuración por fatiga [28].

La fase I, llamada fase de adaptación, el módulo de rigidez disminuye rápidamente mientras se da la aplicación de carga. Esta respuesta del módulo está relacionada con efectos locales en las partículas, la tixotropía y generación de calor en la muestra (disipación viscosa interna). La fase II, llamada fase cuasi-estática o fase de fatiga, se da una disminución lineal y continua del módulo con el número de ciclos que permite caracterizar el progreso del proceso de fatiga. En esta fase comienza a darse la aparición de macrofisuras en la muestra, producto de la unión de microfisuras. La fase III, llamada fase de ruptura, se da un muy rápido descenso del módulo de rigidez, donde las macrofisuras progresan hasta el fallo de la mezcla.

En este caso el criterio de fallo se define como el umbral de ciclos de carga entre las fases II y III, y se determina con el punto de intersección entre las pendientes correspondientes a cada fase.

2.8.5.3 El criterio de falla por deformación crítica.

Debido a las características viscoelásticas del ligante, las mezclas bituminosas tienen la propiedad de recuperar cierta cantidad del daño producido mediante procesos de *healing* (curación). Si el daño producido debido a las cargas, cae por debajo de un potencial nivel de *healing* de la mezcla, entonces se podría decir que la acumulación del daño es básicamente inexistente y se podría decir que la fisuración por fatiga es nula y por tanto la mezcla tendría idealmente una vida infinita a la fatiga. Cada mezcla presenta una deformación máxima bajo la cual se produce este fenómeno. A

esta deformación máxima se le llama *endurance limite* (límite de resistencia a la fatiga) y es una característica de la mezcla asociada con el módulo de rigidez de la misma y el nivel de deformaciones a la que se ve sometida. Actualmente, se estudia la creación de pavimentos que estén sometidos a este límite de resistencia a la fatiga, para la creación de pavimentos "perpetuos" o de vida extendida.

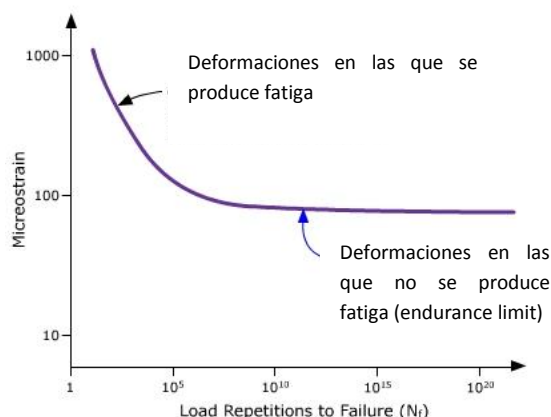


Figura 2-19 Representación del endurance limit en una curva deformación aplicada vs # de ciclos.

Ahora bien, la ejecución de los ensayos para la determinación del fallo por fatiga, ha servido para poner de manifiesto que para cada mezcla existe otra deformación unitaria a partir de la cual el proceso de fatiga se propaga de forma muy rápida. Esta deformación (Figura 2-20), denominada como "deformación crítica", es independiente del estado de tensiones o de solicitaciones a que está sometida la probeta de mezcla en la fatiga [29]. Por lo tanto, el fallo por fatiga es independiente, para una misma mezcla, de la tensión inicial del ensayo. De este modo, la deformación crítica de fatiga es una constante de la mezcla ensayada, que varía con el tipo de mezcla y con la temperatura de ensayo.

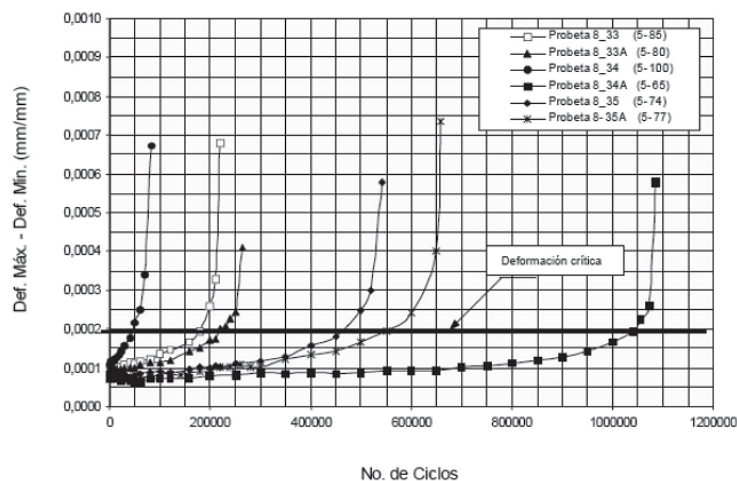


Figura 2-20 Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga [30].

En general, cuanto mayor contenido de betún tiene la mezcla, cuando se emplean betunes modificados más tenaces y cuanto mayor es la temperatura, tanto mayor es su deformación crítica.

De esta manera, definiendo estos dos niveles de deformación, se puede observar el comportamiento de la mezcla a la fatiga: casi elástico cerca del *endurance limit* y casi de ruptura cerca de la deformación crítica. Entre más separados estén estos dos valores de deformación, más dúctil y flexible será el comportamiento de la mezcla, mientras que para valores más próximos, la respuesta es más frágil y elástica.

El criterio de fallo en este caso está definido por la asociación de la deformación crítica con un porcentaje del valor del módulo inicial, del cambio en la energía disipada o tensión máxima aplicada.

2.8.5.4 El criterio de falla por ruptura (*breakage failure criterion en inglés*)

Se utiliza con ensayos controlados a deformación o tensión. Determina la resistencia a fatiga del espécimen, como función en el cambio del desplazamiento o la tensión a lo largo del proceso de carga. Basado en este criterio, el espécimen falla cuando el desplazamiento o la tensión (fuerza) exhiben un acelerado incremento durante el proceso de carga (Figura 2-21).

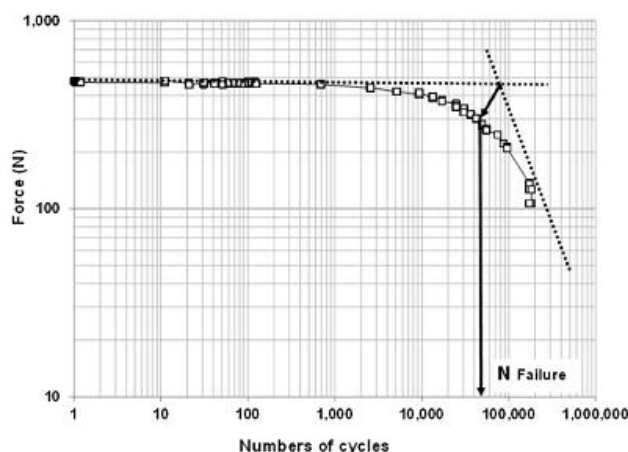


Figura 2-21 Evolución de la fuerza en función del número de ciclos [26].

2.9 ENSAYOS A FLEXOTRACCIÓN

En general, los ensayos más utilizados para la determinación de la resistencia a la fatiga de las mezclas bituminosas, son los ensayos a flexotensión a dos, tres y cuatro puntos de apoyo. En estos ensayos se someten probetas a una serie de cargas cíclicas, en la que se mantiene constante la tensión, la deformación o el desplazamiento aplicado, hasta que se produce el fallo de la mezcla. A continuación una breve descripción de cada uno de ellos:

2.9.1 ENSAYO DE FATIGA A DOS PUNTOS

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga por flexotracción en dos puntos, utilizando probetas prismáticas cuadradas o trapezoidales. Este método puede ser utilizado por mezclas bituminosas, con áridos de granulometría máxima de 20 mm, sobre probetas preparadas en el laboratorio u obtenidas de capas de carretera con un espesor de 40 mm como mínimo. Las probetas se encuentran enganchadas en la base y fijadas en el extremo superior de manera mecánica, lo que permite reducir el coste en maquinaria al requerir fuerzas relativamente débiles para imponer las amplitudes de carga solicitadas, sin embargo, presenta la desventaja de no presentar estados de deformación o de tensión homogéneos a lo largo de la fibra neutra.

2.9.2 ENSAYO DE FATIGA A TRES PUNTOS

Este método puede ser utilizado por mezclas bituminosas, con áridos de granulometría máxima de 22 mm, sobre probetas prismáticas preparadas en el laboratorio u obtenidas de capas de carretera con un espesor de 50 mm como mínimo.

2.9.3 ENSAYO DE FATIGA A 4 PUNTOS

Dentro de la Normativa Europea EN 12697-24 [8], se establece este como el único procedimiento permitido para determinar la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas a 20 °C. Se realiza sobre probetas prismáticas sujetas de tal forma que tengan cuatro puntos de apoyo con libertad de traslación, rotación y mantienen a la muestra en su posición original (Figura 2-22). La muestra se ve sometido a cargas periódicas de flexión en los puntos interiores (carga perpendicular al eje longitudinal de la probeta). Las cargas son de forma sinusoidal repetida con un rango de 0 a 60 Hz. Para determinar la resistencia a fatiga se miden los siguientes parámetros: carga necesaria para la flexión, deflexión y desfase entre dos señales en función del tiempo. Se pueden realizar ensayos a deformación o tensión controlada, sin embargo la norma especifica que debe ser por deformación. El punto de falla es aquel en el cual la amplitud de la fuerza es igual o menor al 50% de la lectura inicial.

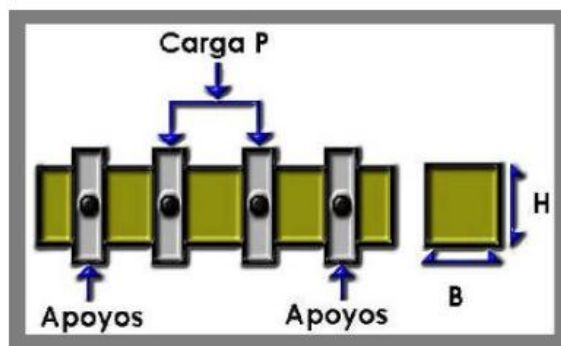


Figura 2-22 Configuración de carga del ensayo a flexotracción en 4 puntos [23].

Al día de hoy, este tipo de ensayos (flexotracción) siguen siendo los más utilizados y conocidos por los laboratorios de materiales para evaluar la resistencia a fatiga en los pavimentos bituminosos, pues sus equipos e instrumentos son los que se encuentran más difundidos y normalizados y debido a esto su coste es inferior a otros con mecanismos más complejos y más difíciles de adquirir. Así mismo, estos ensayos presentan mucha facilidad en la fabricación de las probetas pues son de geometría muy sencilla y además presentan la versatilidad de poder controlar la carga por deformación o tensión.

Por otro lado, los ensayos a flexotracción reseñados, suelen ser de muy largo tiempo de ejecución, pues tratan de representar de manera real los esfuerzos que se presentan en el pavimento durante su vida de servicio.

2.10 ENSAYO EBADE

2.10.1 ANTECEDENTES

Un parámetro utilizado para caracterizar o clasificar las sustancias de acuerdo a su comportamiento elástico/viscoso/viscoelástico es el número de Deborah. Éste número se define como:

$$De = \frac{\tau}{t} \quad (2.26)$$

donde t es un tiempo característico del proceso de deformación al que se ve sometido una determinada sustancia y τ es un tiempo de relajación característico de dicho material; el tiempo de relajación es infinito para un sólido de Hooke y cero para un fluido de Newton.

De acuerdo al valor del número de Débora todos los materiales pueden ser clasificados de esta manera:

- **$De < 1$** Comportamiento viscoso.
- **$De > 1$** Comportamiento elástico.
- **$De \approx 1$** Comportamiento viscoelástico

De esta forma, clasificando cualitativamente el comportamiento de los materiales de acuerdo a su número de De en un diagrama Deformación/ De (Figura 2-23) se podrían distinguir 3 zonas: una a bajos número de De , correspondiente a un comportamiento viscoso, otra zona a números de De elevados, correspondiente a un comportamiento puramente elástico y una zona intermedia correspondiente a un comportamiento viscoelástico. Sin embargo, a su vez dentro de cada zona podrían observarse diferentes comportamientos en los sólidos elásticos y en los fluidos viscosos atendiendo a la linealidad existente entre esfuerzo/deformación y esfuerzo/velocidad de deformación.

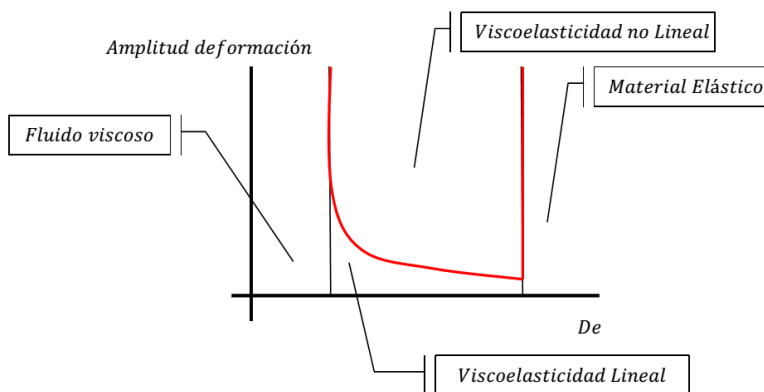


Figura 2-23 Comportamiento del material en relación a su deformación y su número de Deborah.

En cuanto a los materiales viscoelásticos, para deformaciones muy bajas, casi cercanas al equilibrio existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en la zona denominada como de "viscoelasticidad lineal". Para deformaciones mayores, dicha relación deja de ser lineal y se alcanza la denominada zona de "viscoelasticidad no lineal".

En los materiales viscoelásticos, los parámetros que definen su comportamiento reológico son el módulo complejo de corte (G^*), el ángulo de desfase (δ), el módulo elástico (G') y el módulo viscoso (G''). Todos estos son definidos bajo condiciones viscoelásticas lineales y de ahí la importancia de conocer el límite hasta donde se da este tipo de viscoelasticidad.

Como parte del programa SHRP, y con el uso del reómetro dinámico de corte, estos parámetros fueron estudiados en los ligantes, mediante la ejecución de ensayos cíclicos de amplitud de deformación creciente o barrido de deformaciones (strain sweep en inglés) y se obtuvieron valores límites de deformación y tensión bajo los cuales los ligantes se comportan dentro del rango de viscoelasticidad lineal [17]. Estos valores son:

$$\gamma = \frac{12}{(G^*)^{0.29}} \quad 2.27$$

$$\tau = \frac{12}{(G^*)^{0.71}} \quad 2.28$$

Donde γ es la deformación de corte, τ es la tensión de corte y G^* es el módulo complejo.

Como ya se comentó con anterioridad, se trató de establecer una relación entre el parámetro $|G^*| \cdot \sin\delta$ con la resistencia a fatiga del ligante, sin embargo, no fue posible llegar a establecerla. Debido a esto, se introdujeron los Ensayos de Barrido de Tiempo, en los que se aplicaban ciclos de deformación constante, hasta el completo fallo del espécimen. Este tipo de ensayo correlacionaba de mejor manera las características de fatiga que el parámetro $|G^*| \cdot \sin\delta$. Por esto, los ensayos de barrido de deformaciones únicamente se utilizaban para caracterizar y encontrar el límite lineal viscoelástico de los ligantes.

Sin embargo, recientemente, se comenzó a realizar estudios en los que se utilizaban los ensayos de barrido de deformaciones para estimar la resistencia a fatiga de los ligantes bituminosos [31].

En estos estudios, se realizó un ensayo cíclico de torsión a deformación controlada y creciente cada cierto número de ciclos (Figura 2-24), mediante el uso del DSR. A este ensayo se le llama Barrido de Amplitud Lineal (LAS, Linear Amplitude Sweep)

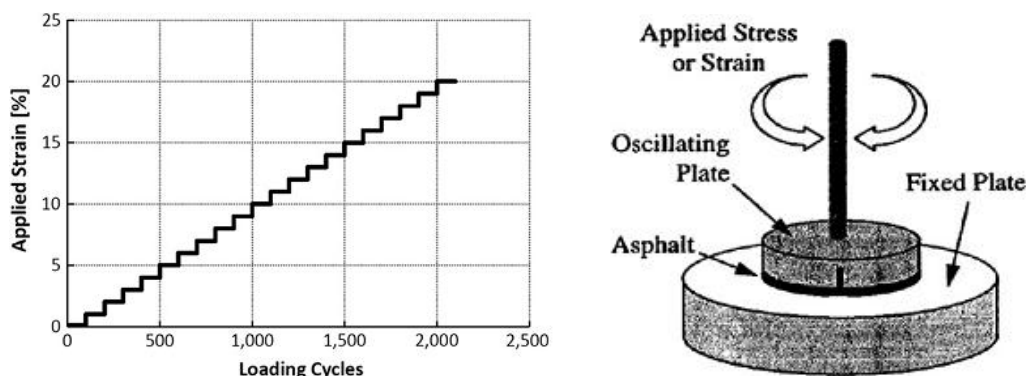


Figura 2-24 Incremento de carga en el ensayo LAS (izquierda) y el Reómetro de corte Dinámico (derecha) [31].

Mediante la ejecución de este ensayo se pudo obtener leyes de fatiga para los ligantes que relacionan el número de ciclos hasta fallo con el módulo complejo del ligante, mediante el uso de modelos viscoelásticos de daño. La correlación obtenida entre las leyes de fatiga mediante el método LAS y el método tradicional de barrido de tiempo fue muy alta.

Ahora, debido a las características viscoelásticas de los ligantes bituminosos, los ensayos de corte son relativamente fáciles de implementar, sin embargo las cargas de corte no son las mas importantes que se aplican en un pavimento. De hecho, las tensiones de tracción y compresión generadas en el mismo, son las responsables de la mayor parte del daño del material. Debido a esto, se desarrolló un ensayo uniaxial a la fatiga de tracción-compresión por parte de Chailleux et al. [32].

En este ensayo un especimen en forma de diábolo (Figura 2-25), es pegado al equipo de carga por medio de un adhesivo cianoacrilado. La geometría del ensayo está pensada para evitar una falla por el adhesivo, concentrando las tensiones en los "hombros" del diábolo.

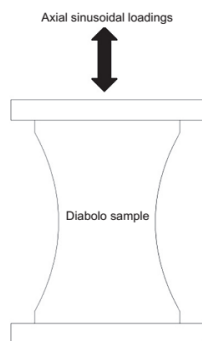


Figura 2-25 Configuración del ensayo a tensión-compresión de Chailleux et al. con la probeta en forma de diábolo [32].

El ensayo es un barrido de tiempo a deformación controlada dividido en dos partes. La primera es con ciclos de deformación muy baja en donde se consigue encontrar el módulo complejo dentro

del dominio viscoelástico lineal. En la segunda parte, se aumenta la amplitud de la deformación hasta un cierto nivel, el cual es mantenido hasta que el espécimen falle.

2.10.2 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO EBADE

El Ensayo EBADE fue desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña [30], y su metodología se desarrolla sobre probetas prismáticas o cilíndricas de mezcla bituminosa, a las que se les aplican series de ciclos de carga de tensión-compresión a distintos niveles de deformación, los cuales aumentan gradualmente hasta producir el fallo por fatiga de la mezcla.

El ensayo EBADE nace de combinar las ideas del tipo de instalación del equipo del ensayo con el diábolo de Chailleux [32] con el tipo de aplicación de carga de los ensayos LAS (linear amplitude sweep o barrido de amplitud lineal) [31], las cuáles fueron introducidas en el aparatado anterior.

Como se mencionó antes, los ensayos a tensión-compresión son los que representan la forma más importante de daño de los pavimentos bituminosos, mientras que los ensayos de barrido de deformaciones han probado ser un buen método para caracterizar el comportamiento a la fatiga de los ligantes bituminosos. De esta manera el ensayo EBADE combina estos dos aspectos de la caracterización de la fatiga en un ensayo fácil y rápido.

Este procedimiento permite caracterizar las mezclas asfálticas por medio de la obtención de los dos niveles de deformación relacionados directamente con el comportamiento a fatiga de las mezclas: el nivel de deformación de resistencia a la fatiga (endurance limit) y el nivel de deformación crítica. A su vez, el ensayo EBADE permite simular el proceso de fatiga de las mezclas asfálticas cuando estas están bajo estados tensionales producto de las variaciones térmicas.

A partir de la idea del diábolo de Chailleux, en este ensayo a las probetas se les realizan dos entallas en la zona central, con la idea de inducir la fisuración por esta zona. Estas probetas son pegadas mediante una resina epoxi a unas placas de acero, que permiten fijarlas a las mordazas de la prensa de carga, que mediante el uso de extensómetros mide las deformaciones aplicadas (Figura 2-26).

El tipo de carga aplicado nace del concepto de los ensayos LAS. En este caso, la amplitud de deformación va aumentando cada 5000 ciclos un valor fijo. En el primer escalón la amplitud de deformación es $2.5E-5$, y después de 5.000 ciclos aumenta este mismo valor, y así sucesivamente hasta que falle la totalidad de la probeta. La frecuencia de carga es de 10 Hz.

Durante el ensayo se determinan los siguientes parámetros de la mezcla: tensión, módulo complejo y densidad de energía disipada. Luego de obtener estos resultados, se puede caracterizar el proceso de fatiga de manera gráfica (Figura 2-27). De esta manera e indicando un criterio de falla, es posible obtener los valores del endurance limit y de la deformación crítica.

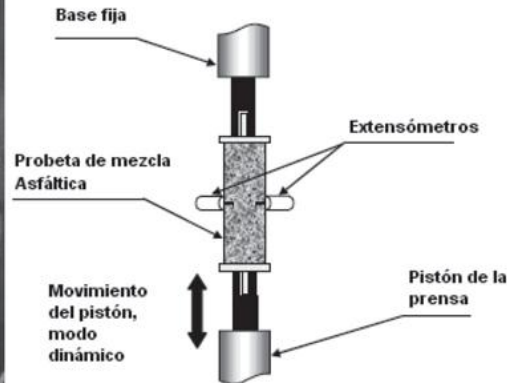
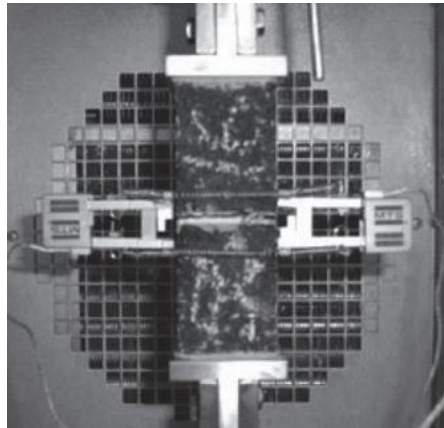


Figura 2-26 Configuración del equipo para realizar el ensayo EBADE [30].

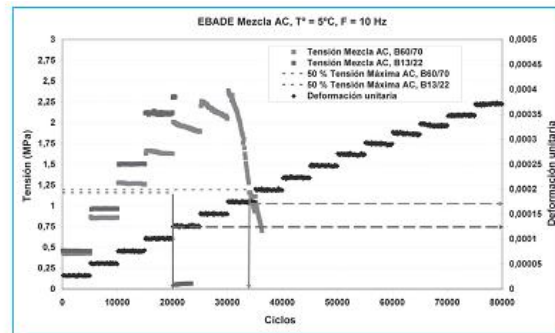
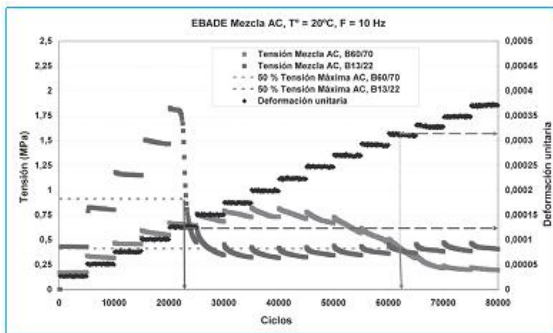


Figura 2-27 Caracterización de la fatiga mediante curvas de evolución de las tensiones y deformaciones con el procedimiento EBADE para dos mezclas diferentes a 20°C (izquierda) y 5° C(derecha). [30].

Diversos estudios realizados por Pérez et al. [30, 33] han demostrado que mediante la obtención de los valores de estas dos deformaciones, es posible caracterizar la fatiga de una mezcla. Así mismo, el ensayo es lo suficientemente sensible para permitir diferenciar la respuesta frágil y dúctil de una mezcla y evaluar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, debido a las cargas de tráfico y cambios de temperatura.

De esta manera el ensayo EBADE, presenta las siguientes ventajas con respecto a otros ensayos de fatiga:

- Menor duración de tiempo de los ensayos, pues la deformación aumenta rápidamente. La gran mayoría de los ensayos, son barridos de tiempo, y por tanto muy extensos, incluso no llegando a fallar.
- Se utilizan probetas prismáticas fáciles de construir y que permiten obtener fácilmente los parámetros del material.
- Buena respuesta a diferentes temperaturas, lo que permite realizarlo en un amplio rango de temperaturas y estudiar el comportamiento de mezclas condicionadas por condiciones térmicas.
- Buena sensibilidad del procedimiento frente a los parámetros de estudio.

Por otro lado, actualmente y debido a que es un ensayo todavía en estudio, el ensayo EBADE presenta el inconveniente que en este momento no permite relacionar los resultados que se obtienen de él, con número de ciclos de carga hasta la fatiga, situación que si se da con los ensayos a flexotracción por medio de las leyes de fatiga, a pesar que las leyes obtenidas por estos métodos, son matizadas por muchos supuestos. Es decir, el ensayo EBADE al día de hoy nos permite caracterizar la fatiga y utilizar sus resultados para ver como se comporta una determinada mezcla o diferenciar comportamientos entre mezclas.

Actualmente, en el equipo del Laboratorio de Caminos de la UPC, está dando los últimos pasos para conseguir crear leyes de fatiga por medio del ensayo EBADE, mediante el uso de modelos viscoelásticos de daño que relacionen la deformación crítica y el endurance limit con los números de ciclos de carga a deformación constante.

Capítulo 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describirán de manera detallada la metodología, ensayos y programas computacionales con que se implementará el estudio de la propagación de la fisura por fatiga en las mezclas bituminosas. La metodología utiliza el programa computacional BISAR 3.0 para calcular los esfuerzos y deformaciones, y los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE y la ley de fatiga del ensayo a flexotracción en 4 puntos.

Primeramente se describirá la metodología del estudio y se definirán los pasos a seguir durante el mismo. Seguidamente se especificará las características técnicas y materiales utilizados para fabricar la mezcla. Luego se detallarán los procedimientos que siguen los ensayos EBADE y de flexotracción para determinar los parámetros que se utilizarán en el estudio.

Finalmente se explicará de manera breve cómo se maneja el programa BISAR y como se calculan las tensiones y deformaciones utilizadas en el estudio.

3.2 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

3.2.1 DESCRIPCIÓN

Como ya se mencionó en los objetivos, en este estudio se estudiará la propagación de las fisuras en mezclas bituminosas emulando el método multicapa usado en el diseño de firmes. De esta manera se utilizará un programa que obtiene estados tensionales y de deformación en sistemas multicapas como herramienta para poder simular el fallo de la mezcla bituminosa al ser discretizada en varias subcapa. El fallo de la mezcla depende del comportamiento de cada subcapa. El comportamiento de las subcapas se ve definido por la deformación crítica que se obtiene del ensayo EBADE y la ley de fatiga que se genera del ensayo a flexotracción.

El método de diseño de firmes por el método multicapa, discretiza la estructura del firme en varias capas dependiendo de sus materiales (módulos de rigidez y Poisson diferentes). Este método obtiene estados de tensión/deformación en las interfaces de estas capas, por medio del uso de programas computacionales basados en la solución general de análisis de tensiones y deformaciones en un sistema elástico de n capas [2]. Estas deformaciones son producto de la modelización de cargas verticales sobre la superficie del firme. En este método, los criterio de falla utilizados son el de deformaciones plásticas provocadas por tensiones verticales, generalmente en la corona de la explanada, y el otro es el de fallo por fisuración por fatiga provocada por tensiones horizontales de tracción en la fibra inferior del pavimento bituminoso. Para el caso de fisuración por fatiga, este método relaciona la deformación en la fibra inferior del pavimento, con un número de ciclos que el mismo resistirá hasta llegar al fallo, por medio de las llamadas leyes de fatiga.

Para este estudio, se seguirá una metodología con un principio similar, solo que en este caso no será para un firme, sino que únicamente para una mezcla bituminosa y además será un proceso iterativo.

De esta manera, un espécimen de cierta dimensión de mezcla bituminosa será discretizado en varias capas con un mismo módulo inicial dentro de un programa multicapas (BISAR 3.0) y se le aplicará una carga tipo, con la cual se inducirá a la fibra inferior de cada capa a cierta deformación.

Ahora bien, a partir de los resultados obtenidos en el ensayo EBADE, se pueden generar curvas que relacionan el módulo de rigidez con un nivel de deformación, de esta manera, las deformaciones en la fibra inferior de cada subcapa, pueden ser relacionadas con un módulo de rigidez nuevo asociada a cada subcapa.

También, a partir del ensayo EBADE se puede obtener la deformación crítica a partir de la cual el daño por fatiga en la mezcla aumenta de manera abrupta hasta la rotura. De esta manera, se podría decir que a partir de esta deformación el material ha fallado y por lo tanto su módulo de rigidez tiende a cero.

Así, con los valores de deformación obtenidos del primer ciclo de carga y el valor asociado del módulo según el ensayo EBADE, se vuelve nuevamente a modelar la mezcla en el programa BISAR 3.0, solo que esta vez, cada subcapa tendrá como valor del módulo, aquel asociado a la deformación del primer ciclo de carga. Seguidamente se vuelve a aplicar nuevamente la carga y se vuelven a computar las deformaciones generadas y asociarlas a un nuevo módulo. Es importante hacer notar que las deformaciones a tomar en cuenta son las de tracción, pues las de compresión no generan fatiga y por tanto las subcapas con deformaciones de compresión mantienen invariables el valor de su módulo.

La idea es que este proceso iterativo se siga realizando hasta que las primeras subcapas de abajo hacia arriba alcancen la deformación crítica. Cuando se alcance este punto, se dice que estas subcapas han fallado y por tanto se le asigna un valor del módulo muy bajo (el BISAR 3.0 no permite signarle un valor de cero) o simplemente se eliminan estas subcapas para el siguiente ciclo de carga. De esta manera, se agilizará el proceso de fisuración, pues la muestra tendrá menos espesor. Así se continúa hasta que falle la última subcapa, momento en que se contabilizan cuantos ciclos de carga fue capaz de soportar la muestra. Estos ciclos de carga serán la vida útil de una mezcla bituminosa para unas determinadas dimensiones.

Ahora, dependiendo del módulo inicial del espécimen y de su espesor, puede ocurrir que durante el proceso iterativo las deformaciones que se le inducen al espécimen sean tan bajas, que se llega a un momento durante el proceso en que las mismas no varían, o casi no varían, hasta el punto que se puede decir que el valor de estas llega a converger. En este instante, el proceso iterativo del presente estudio se vuelve imposible de continuar, pues el mismo es manual y además el programas BISAR 3.0 presenta la limitante que únicamente considera tres cifras de precisión en el valor de los módulos.

Por lo tanto, al llegarse a esta convergencia de valores en la deformación (o en el módulo asociado), se hace uso de las leyes de fatiga obtenidas del ensayo a flexotracción en cuatro

puntos. El uso de estas leyes de fatiga se hace únicamente para encontrar el número de ciclos de carga hasta el fallo de la subcapa inferior que este todavía trabajando (es decir que no haya fallado con anterioridad). De esta manera, se calcula el número de ciclos de carga con el que esta subcapa fallará e inmediatamente después se le asigna un módulo de rigidez de fallo para el ciclo de carga siguiente (osea, se elimina la actividad de esta subcapa del modelo).

Finalmente, se suman todos los ciclos de carga que fue capaz de soportar el espécimen, incluyendo los ciclos de carga obtenido por la ley de fatiga, y se dice que esta es su vida de servicio.

Como se pudo observar, el método utiliza los conceptos de diseño de firmes por el sistema multicapa, solo que en este caso el mismo es iterativo tomando en cuenta la variación del módulo en cada ciclo de carga y además considerando el valor de la deformación crítica, cuyo valor es invariable independientemente de la tensión a la que se cargue la muestra.

Ahora, también era parte de los objetivos el introducir el ensayo EBADE, y varios de los resultados que se pueden extraer de él, por lo que también se presentará en formato gráfico y de tabla el valor del endurance limit para la mezcla bituminosa ensayada. De esta manera se podrá cumplir con el objetivo de caracterizar la fatiga en mezclas por medio de tanto la deformación crítica como el endurance limit.

3.2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El presente estudio se estudiará una muestra AC16S B 50/70 4.8 con diferentes espesores (9 cm, 13.5 cm y 18 cm), a una temperatura de 20 °C. Los detalles de los materiales que la componen serán especificados en el apartado 3.3 de este capítulo (MATERIALES).

Antes de poder llevar a cabo el proceso iterativo con el programa BISAR 3.0, es necesario obtener los parámetros de deformación crítica y módulo inicial de la mezcla. Así mismo, se debe encontrar una curva y por consiguiente una ecuación que relacione el valor del módulo con la deformación. También se debe encontrar una ley de fatiga para la mezcla, pues la misma puede llegar a ser utilizada en el proceso iterativo.

Por lo tanto, antes de empezar con el uso del programa BISAR 3.0, es necesario llevar a cabo sobre la mezcla los ensayos de flexotracción en 4 puntos y el ensayo EBADE y obtener ciertos parámetros a partir de sus resultados.

3.2.2.1 Proceso de obtención de parámetros básicos y curvas de caracterización.

Entonces, antes de comenzar con el proceso iterativo en el BISAR, se seguirá el siguiente plan de trabajo:

1. Se procede a la ejecución de los ensayos EBADE y de flexotracción en 4 puntos con la mezcla AC16S cuyas especificaciones se dan en el apartado de materiales y de ensayos.
2. Con los datos arrojados, se obtienen las respectivas curvas de caracterización de la fatiga por parte de los dos ensayos.

3. De los resultados obtenidos del ensayo EBADE y de sus respectivas curvas de caracterización, se obtienen el valor del módulo inicial de la mezcla y el valor de la deformación crítica de la misma. A la deformación crítica se le llamará ϵ_{crit} .
4. De los resultados del ensayo EBADE, se construirá una nueva gráfica de dispersión de puntos que relacione al valor del módulo de rigidez de la mezcla con un valor de deformación. Esta gráfica será ajustada por una curva de ajuste, con su respectiva ecuación, donde el módulo es dependiente de la deformación. A esta ecuación se le llamará **Modéf**.
5. Después de encontrada esta ecuación, se deberá hallar un valor límite de deformación mínimo ϵ_{min} , bajo el cual se considera que el módulo no variará.
6. Del ensayo a flexotracción a 4 puntos, se obtendrá la ecuación de la ley de fatiga en números de ciclos en función de la deformación.

Tanto el ensayo EBADE como el de flexotracción fueron llevados a cabo por el personal técnico del Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Catalunya, siguiendo las especificaciones técnicas y procedimientos con los que están normalizados y que se describen más adelante.

Para el caso del ensayo EBADE, se ensayaron 2 probetas con el mismo tipo de mezcla y se tomaron los datos de la más característica, entendiéndose esto como aquella cuya curva de energía disipada vs ciclos de carga que permitió ver de forma clara el proceso de fatiga. El ensayo EBADE fue llevado a cabo con una frecuencia de 10 Hz y a una temperatura de 20°C.

Con respecto al ensayo a flexotracción, se ensayaron 10 probetas con el mismo tipo de mezcla a diferentes deformaciones, con las cuales se generaron las respectivas gráficas que relacionan el valor del módulo con el número de ciclos. Los ensayos de flexotracción se realizaron a una frecuencia de 30 Hz y a una temperatura de 20°C.

3.2.2.2 Proceso iterativo para estudio de propagación de fisuras

Después de llevar a cabo los ensayos y obtener los parámetros de deformación crítica, ley de fatiga, módulo de rigidez inicial y ϵ_{min} , se empieza a trabajar con el proceso iterativo con el que se pretende estudiar la propagación de la fisura. El esquema de la figura 3-1, describe paso a paso el flujo del proceso iterativo.

Previamente al proceso iterativo en si, existen dos pasos donde se da la entrada de datos iniciales se detallan también en la figura 3-1.

Datos de entrada

1. En el programa BISAR se introducen los valores de las dimensiones de la muestra y de cada subcapa. Serán 9 subcapas de mezcla bituminosa apoyadas sobre una explanada. *Ir al paso 2.*
2. A cada subcapa se le asignará un módulo de rigidez inicial que se llamará E_0^i y un módulo de Poisson (este no varía). El término del subíndice en el módulo es el número de iteración, mientras el superíndice es el número de capa (en orden descendente). *Ir al Proceso Iterativo.*

Proceso iterativo

3. En el programa BISAR 3.0 se aplica la carga tipo (32 KN por rueda) para el ciclo de carga j y se calculan las deformaciones en la fibra inferior de cada subcapa que se encuentre activa. Estas deformaciones tienen la siguiente nomenclatura: ϵ_j^i donde j en el subíndice es el número de iteración, mientras i en el superíndice es el número de capa (en orden descendente, $i = 1 \dots 9$). *Ir al paso 4.*
4. Si $\epsilon_j^i \geq \epsilon_{min}$ se toman los valores ϵ_j^i y se introducen en la ecuación **Modelf**, para obtener los nuevos valores de los módulos E_j^i en estas subcapas. Para la subcapas en que $\epsilon_j^i < \epsilon_{min}$, el valor del módulo que se les asigna es el inicial E_0^i . *Ir al paso 5.*
5. Se revisa si alguna de las subcapas ha llegado a la deformación crítica. En este caso se tienen dos opciones:
 - a) En caso positivo ($\epsilon_{crit} \geq \epsilon_j^i$), existen dos alternativas:
 1. Si $i \neq 1$, a esta subcapa i se le asignará un valor de 100 MPa a su módulo de rigidez por el resto del proceso. *Ir al paso 6.*
 2. Si es la última capa que falta por fallar ($i = 1$), se detiene el proceso iterativo y se obtienen el número de ciclos totales, mediante la siguiente ecuación:

$$N_{total} = j + \sum N^i$$
 - b) Si $\epsilon_{crit} < \epsilon_j^i$ para todas las subcapas, existen dos alternativas:
 1. Si las deformaciones varían con respecto al ciclo anterior ($\epsilon_j^i \neq \epsilon_{j-1}^i$), *ir al paso 6.*
 2. Si las deformaciones no varían en relación al ciclo anterior ($\epsilon_j^i = \epsilon_{j-1}^i$), o sea convergen, *ir al paso 7.*
6. A las subcapas restantes se les asignará el módulo de rigidez E_j^i calculado en el paso 2. *Ir al paso 3.*
7. Se introduce la deformación de la última subcapa activa en la ley de fatiga para obtener el número de ciclos con que fallaría esta subcapa. A este número de ciclos se le llama N^i en relación a su número de subcapa. Se asume que esta subcapa ha fallado. Eliminar esta subcapa del modelo (la que falló). *Ir al paso 6.*

Figura 3-1 Esquema de los datos de entrada y del Proceso Iterativo para estudio de propagación de fisuras con el programa BISAR 3.0 y los resultados del ensayo EBADE, y la Ley de Fatiga

De los resultados obtenidos con este método, se espera poder ver la evolución de la fisura en todo el grosor del espécimen tanto de manera numérica como gráfica. Algunas consideraciones sobre este método se detallan a continuación:

- El proceso iterativo anterior se lleva a cabo de manera manual, pues el BISAR no permite aplicar más de un ciclo de carga a la vez, de ahí el uso de las leyes de fatiga.
- Las capa de mezcla bituminosa se discretiza en subcapas del mismo espesor.
- A la explanada se le asigna un valor de módulo de rigidez muy bajo (100 MPa), para inducir la fisuración de la mezcla bituminosa en menos ciclos de carga.
- La carga tipo de 32 KN (kilo-newton) bajo cada rueda, se basa en el hecho que el valor de la carga de por eje tipo según la instrucción es de 13 toneladas. Esta carga debe ser distribuida en 4 ruedas, dos en el eje delantero y dos en el trasero, siendo su valor aproximadamente a 32 KN por rueda.
- A las deformaciones en compresión o menores al ϵ_{min} , se les asigna el módulo inicial, pues sino, en la ecuación **Modelf**, el valor del módulo llegaría a ser mayor que el inicial.
- La asignación del valor de 100 MPa a las subcapas falladas intenta modelar el fallo de esa capa. Al asignársele un módulo tan bajo, se simula su eliminación.

3.3 **MATERIALES EMPLEADOS**

La mezcla escogida para el estudio y fabricada para los ensayos EBADE y de flexotracción, es un hormigón asfáltico convencional tipo AC16 surf S con un betún 50/70.

Es un tipo de mezcla semidensa utilizada específicamente en las capas de rodadura, que se caracteriza por ser poco permeable, muy resistente a la acción abrasiva del tráfico, con una macrotextura relativamente baja y por lo tanto puede ser inadecuada para tráficos rápidos y climas lluviosos.

El uso de este tipo de mezcla en los firmes españoles es muy extendido, pues la misma se adapta relativamente bien a climas cálidos, medio y templados, los cuales son los especificados para España según el PG-3. Las características principales de la mezcla se resumen en tabla 3-1.

<i>Granulometría</i>	AC16 S
<i>Ligante</i>	B 50/70
<i>Árido grueso</i>	Silíceo
<i>Huecos en mezcla (%)</i>	5,0
<i>Contenido de betún/mezcla</i>	4,8

Tabla 3-1 Características de la mezcla AC16S en estudio.

Estas características cumplen con las especificaciones pedidas en el PG-3 para cada una de ellas y como se detalla a continuación:

- **Granulometría:** La granulometría AC16 S presenta los siguientes husos granulométricos (Art. 542, PG-3):

Tipo de Mezcla		Tamaño de los tamices UNE-EN 933-2 (mm)								
		32	22	16	8	4	2	0,500	0,250	0,63
Semidensa	AC16 S	-	100	90-100	60-75	35-50	24-38	11-21	7-15	3-7

Tabla 3-2 Husos granulométricos de la mezcla AC16S en estudio.

Como se observa en el huso de este tipo de mezcla, entre el 90%-100% del árido para por el tamiz UNE 16 mm de diámetro, por eso, según la norma del PG-3, se le asigna como tamaño máximo de árido 16 mm.

- **Ligante:** El tipo de ligante B 50/70, es un betún con un comportamiento medio entre duro y blando, y por esta razón el mismo es muy utilizado en carreteras. También, el mismo puede ser utilizado en carreteras con categorías de tráfico T1, T2, T31, T32, Arcenes y T4, en todas las zonas térmicas estivales de España. Únicamente no puede ser utilizado en las carreteras de mayor tráfico (tipos T0 y T00), pues en estas únicamente se admiten pavimentos con betunes modificados.

Las especificaciones más importantes de este tipo de betún se resumen en la siguiente tabla:

DENOMINACIÓN UNE EN			B 50/70
Característica	Unidad	Norma	
Penetración a 25 °C	0,1 mm	EN 1426	50 - 70
Punto de reblandecimiento	°C	bEN 1427	46 - 54
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	≥ 230
Solubilidad	%	EN ISO 12592	≥ 99
Índice de Penetración			1,5 a +0,7
Punto de Fragilidad Fraas	°C	EN ISO 12593	≤ -8
RESISTENCIA AL ENDURECIMIENTO A 163°C EN 12607-1			
Variación de masa	%		≤ 0,5
Penetración Retenida	%		≥ 50
Incremento del punto de reblandecimiento	°C		≤ 11

Tabla 3-3 Características del ligante B50/70 utilizado en el estudio.

- **Árido Grueso:** El árido grueso es de origen silíceo, lo que le permite una adhesividad media con el ligante bituminoso (mejor adhesividad que los áridos ígneos que son muy ácidos, pero peor que los calizos que son muy básicos). Adicionalmente, este árido es poco pulimentable en relación a los áridos calizos, los cuales son prohibidos en capas de rodadura, pero más pulimentable que los áridos ígneos, los cuáles son ideales para capas

de rodadura, pero sin embargo, el uso de árido silíceo es más extendido, debido a su abundancia y coste.

- **Huecos en mezcla:** Según el pliego PG-3, el diseño de las mezclas bituminosas tipo AC S para capas de rodadura, se lleva a cabo a partir del contenido de huecos obtenido en una probeta compactada por impacto (tipo Marshall). Para el caso de la mezcla de este trabajo, la misma está dentro del rango permitido, tal cual se observa en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
	T00 y T0	T1 y T2	T3 y ARCENES	T4
Huecos en mezcla (%) Capas de rodadura	4 - 6		3 - 5	

Tabla 3-4 Porcentaje de huecos para una mezcla bituminosa tipo AC S.

- **Contenido de betún en mezcla:** Para tipos de mezcla AC S en capas de rodadura, la dotación de betún mínimo debe ser de 4.5%.

3.4 ENSAYO FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS

3.4.1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la fatiga en mezclas bituminosas es uno de los mecanismos de deterioro más importantes y complejos que están presentes en los firmes con pavimentos bituminosos. Su proceso es difícil de predecir y también de describir, debido a las características reológicas de las mezclas. Sin embargo, se han elaborado ensayos de laboratorio que permiten de cierta manera simular el comportamiento de las mezclas en carretera ante la acción de cargas vehiculares y de cambios climáticos, tal cual se mencionó en el capítulo 2 (Estado del Arte).

Dentro de los ensayos más utilizados para caracterizar el fenómeno de la fatiga, se encuentran los de flexotensión, pues estos intentan simular precisamente las deformaciones por tracción producidas en la fibra inferior de la capa de pavimento bituminoso, a causa principalmente del constante paso de vehículos.

Esta deformación se da por la aplicación de cargas verticales sobre vigas prismáticas, que flexionan la viga, generando esfuerzos de tracción en la parte inferior de las mismas, con sus respectivas deformaciones. Estos esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la viga, son los que simulan a los esfuerzos de tracción inducidos por el tráfico.

En general existen tres tipos de ensayo a flexotensión: dos puntos, tres puntos y cuatro puntos. Estos ensayos varían en el número de puntos sobre los que se aplica la carga en la viga y en la manera en que la probeta es sujeta en el ensayo.

De estos ensayos, el único que está permitido por la norma europea UNE EN 12697-94 [8] para determinar la fatiga a flexotracción a 20 °C es el ensayo a flexotracción en 4 puntos y es precisamente esta la razón por la que se utiliza en el presente informe para hacer uso de su ley de fatiga en el método propuesto.

3.4.2 DESCRIPCIÓN

Como ya se mencionó, se trata de un ensayo cíclico en la que se somete a una probeta en forma de viga prismática a la aplicación de cargas de deformación de amplitud constante en 4 puntos distintos de la misma, para inducirla a flexionarse. Durante el ensayo se monitoriza el valor del módulo de la mezcla, junto con el número de ciclos de carga aplicados, hasta que se cumpla con el criterio de fallo, el cual es que el valor del módulo llegue a un 50% de su valor inicial. Se considera que el valor inicial del módulo, es el que tiene en el ciclo 100 de carga.

Lo descrito arriba, se realiza con otras probetas del mismo material, con la misma amplitud de deformaciones y con amplitudes diferentes, de manera que se genere una serie de puntos que relacionen estas deformaciones con el número de ciclo en que falló la probeta. De esta manera, se genera una nube de puntos que luego es ajustada por una recta en una gráfica de deformaciones vs número de ciclos (en escala semilogarítmica con las deformaciones en micrómetros en escala natural y el número de ciclos en escala logarítmica).

La ecuación de esta recta de ajuste es la que da la ley de fatiga, con la que se predice el número de ciclos hasta que falle el material cuando está sometido a una deformación de tracción en su fibra inferior.

3.4.3 PROCEDIMIENTO

El ensayo de flexotracción a 4 puntos se encuentra contemplado en la norma UNE-EN-12697-24 [8] y el procedimiento descrito aquí es un resumen de la misma. La norma dice que este se debe realizar a una temperatura de 20 °C y que debe ser controlado por deformación.

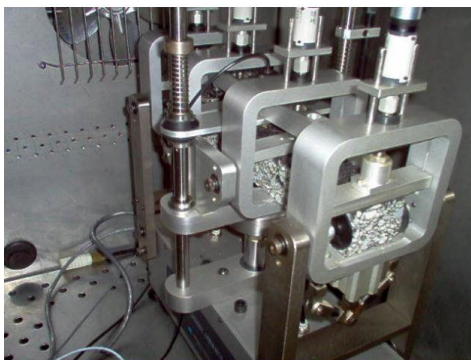


Figura 3-2 Equipo utilizado para ejecutar el ensayo a flexotracción en 4 puntos.

El ensayo consta básicamente de un aparato de carga, una cámara ambiental y un sistema de adquisición de datos. El sistema de carga tiene la capacidad de proveer carga sinusoidal entre 0-60 Hz. La cámara ambiental mantiene la muestra a una temperatura de 20 °C. El sistema de

adquisición de datos tiene la capacidad de medir las deflexiones de la viga y las cargas aplicadas por el aparato en cada ciclo, además puede grabar los ciclos de carga y compilar los datos.

El ensayo comienza con la elaboración de las probetas y posterior colocación en la estructura. La probeta va sujeta de tal forma que tenga cuatro puntos de apoyo, los cuales tienen libre traslación y rotación y mantienen a la muestra en su posición original. Se realizaron diez probetas prismáticas rectangulares de dimensiones 410mm de largo, 50 mm de ancho y 50 mm de alto.

Luego, a la probeta se le empieza a aplicar carga (control por deformación). De esta manera, la probeta recibe la carga en los dos puntos centrales, mientras que en los dos puntos exteriores hay una restricción vertical del movimiento, lo que hace que la muestra presente flexión.

Apenas se empieza con la aplicación de carga, se comienza con la toma de lecturas para ir monitorizando el valor del módulo hasta su fallo (según la norma el 50% de su valor inicial). Para cada uno de los ensayos se calcula su módulo de rigidez, tensiones aplicadas, las deformaciones y la energía disipada durante cada ciclo de carga.

Con estos resultados se generan las gráficas de módulo versus deformaciones para cada probeta ensayada. Según la norma, el módulo inicial es el valor del mismo en el ciclo 100 del ensayo.

Las amplitudes de las deformaciones se van variando de manera que los ciclos de fallo obtenidos varíen entre los 10000 y 2000000 de ciclos. Los resultados obtenidos con cada probeta, se utilizan para generar la ley de fatiga del material. La ley de fatiga generada presenta la siguiente forma:

$$\varepsilon = a \cdot N^{-b} \quad (3.1)$$

donde:

ε = tensión o deformación aplicada de manera repetida.

N = número de aplicaciones de carga hasta el fallo.

a, b = coeficientes de ajuste que describen el comportamiento a fatiga del material

3.5 ENSAYO EBADE

3.5.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, los ensayos más utilizados para caracterizar la fatiga en mezclas bituminosas, son los ensayos de flexotracción, pues los mismos intentan simular la las deformaciones por tracción inducidas a la fibra inferior de la muestra por cargas de flexión en el pavimento. Estos ensayos están debidamente normalizados, y para ensayos a 20 °C, la norma europea especifica que se utilice el ensayo a flexotracción en 4 puntos.

Como se describió en el apartado anterior, en este tipo de ensayo se fallan distintas probetas del mismo material, con el fin de generar puntos de números de ciclos vs amplitud de deformación del ensayo. Luego con los puntos generados, se obtiene una línea recta que los ajuste y determine la ley de fatiga del material.

El ensayo a flexotracción, es un ensayo de barrido de tiempo, por lo tanto, el llevar hasta el fallo a cada probeta es un proceso muy largo (de días), donde incluso muchas veces, algunas probetas con mezclas muy flexibles que no llegan a cumplir con el criterio de fallo. Si se considera, que para generar una ley de fatiga con un buen ajuste, este método requiere más de 7 probetas ensayadas, el tiempo de realización del mismo se extiende aún más.

Debido a esto, en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, se desarrolló el ensayo EBADE (Ensayo de Barrido de Deformaciones). Este ensayo, intenta caracterizar la fatiga de una manera mucho más rápida (pues la amplitud de las deformaciones van aumentando) y por medio de la obtención de dos valores de deformaciones inherentes e invariables de cada mezcla: la deformación crítica y el endurance limit [30].

El endurance límite o límite de resistencia a la fatiga, es aquella deformación límite bajo la cual se asume que la mezcla no sufre fatiga. La deformación crítica es la deformación unitaria a partir de la cual el proceso de fatiga se propaga de forma muy rápida. Esta deformación es independiente del estado de tensiones o de solicitaciones a que está sometida la probeta de mezcla en la fatiga.

El Ensayo EBADE es un procedimiento relativamente nuevo y como se comentó en el capítulo 2, ha dado buenos resultados como metodología rápida de caracterización de la fatiga, para comparar comportamientos entre diferentes tipos de mezclas, pero todavía no se han podido generar leyes de fatiga con el mismo.

Para el presente estudio, los resultados de este ensayo son importantes, pues discretizando un espesor de mezcla en subcapas y conociendo el valor de la deformación crítica se puede estudiar la propagación de la fisura en las mezclas, controlando como va aumentando el nivel de deformación en los diferentes puntos del espécimen, hasta que en determinado punto se alcance la deformación crítica. En ese momento se asume que esta subcapa ha fallado y se agiliza el proceso de fisura, de manera que se puede determinar un número aproximado de ciclos de carga que soportaría la mezcla.

3.5.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

3.5.2.1 Montaje de la probeta y equipo

En la ejecución de este procedimiento se utiliza una probeta prismática, en la cual se realizan dos entallas en la zona central, con la finalidad de reducir el área de la probeta en su sección intermedia e inducir en ella el fallo. La probeta de forma prismática no ha de tener unas dimensiones fijas y pueden provenir del serrado de probetas cilíndricas fabricadas por la metodología Marshall o por medio de una prensa giratoria. Otra forma de fabricar las probetas puede ser mediante el serrado de placas de 5-6 cm de espesor, fabricadas para los ensayos normalizados de deformaciones plásticas o de fatiga a flexotracción de cuatro puntos. Las dimensiones de las probetas suelen ser de 5-6 cm de ancho, similar espesor, y de 6-9 cm de altura.

Estas probetas prismáticas son pegadas mediante una resina epoxi a unas placas de acero, que permiten fijarlas a las mordazas de la prensa. Este tipo de adhesivo presenta un módulo elástico muy superior al del ligante y por lo tanto se puede suponer que su deformación es despreciable.

Sobre la probeta se colocan dos extensómetros, en la zona de fallo previamente inducida, que permiten medir las deformaciones durante el proceso de ensayo.

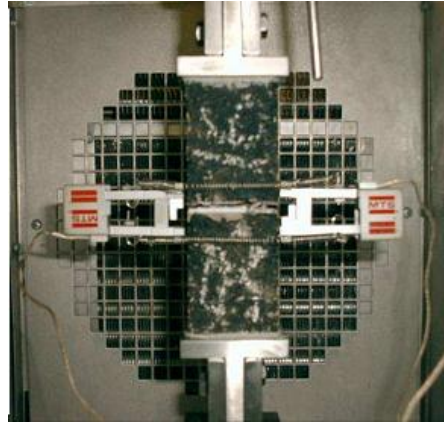


Figura 3-3 Montaje del Ensayo EBADE.

La máquina de ensayo empleada es una prensa hidráulica dinámica de la marca MTS. La célula de carga de esta máquina permite registrar cargas de hasta 100 kN con una precisión cercana a 1 N. Así mismo, el desplazamiento del pistón permite realizar desplazamientos de 30 micras con precisiones de alrededor de 1 micra. La prensa está equipada con una cámara ambiental que permite controlar la temperatura en todo momento con una precisión de 1°C. El sistema hidráulico de la prensa permite imponer señales cíclicas de entrada tanto a la carga medida por la célula como al desplazamiento del pistón de hasta 30 Hz de frecuencia.

3.5.2.2 Procedimiento

El procedimiento EBADE [34] consiste en realizar un barrido de deformaciones en un ensayo cíclico de tensión-compresión. El ensayo se realiza aplicando una serie de ciclos a un nivel de deformación constante, la cual va aumentando en magnitud progresivamente, hasta que se produce el fallo del material. Este procedimiento de ensayo consiste en aplicar diferentes amplitudes de desplazamiento en orden ascendente durante un número determinado de ciclos (Figura 3-4).

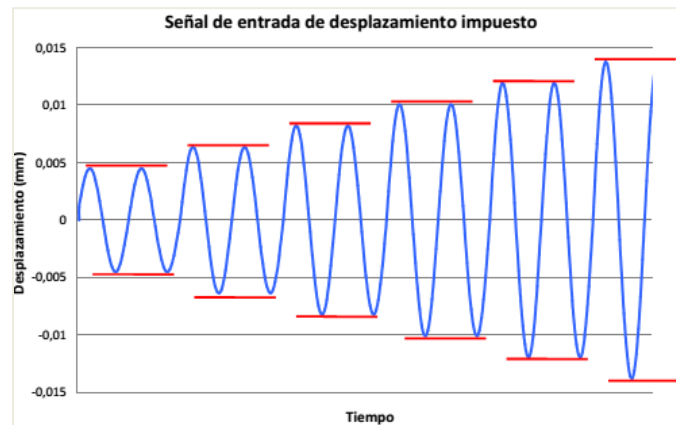


Figura 3-4 Señal de entrada esquematizada para dos ciclos por escalón.

En el procedimiento EBADE se ha establecido el número de ciclos en cada escalón de deformación en 5.000 repeticiones, a una frecuencia de ensayo de 10 Hz y una temperatura de 20 °C. De esta manera, en el primer escalón la amplitud de deformación es $2.5 \cdot 10^{-5}$, y aumenta cada 5.000 ciclos este mismo valor. Así, en el segundo escalón se aplica una amplitud de deformación de $5.0 \cdot 10^{-5}$, luego $7.25 \cdot 10^{-5}$ en el tercero, $1 \cdot 10^{-4}$ en el cuarto y así sucesivamente, hasta que se produce el fallo total de la probeta.

Con este protocolo de ensayo se obtiene información del comportamiento del material a diferentes niveles de deformación en un solo ensayo, obteniendo los valores de la deformación crítica y del endurance limit. La deformación es registrada a través de los extensómetros colocados en la zona de fallo previamente inducida en la probeta.

La adquisición de datos se realiza registrando 50 puntos de carga y desplazamiento a lo largo de 1 ciclo, cada 100 ciclos. De esta forma se puede controlar la evolución de la señal resultante de carga y la elipse que se forma en el plano carga-desplazamiento. De esta manera, en cada ciclo se obtiene la carga y el desplazamiento máximo, y teniendo en cuenta la altura y sección de la probeta se obtiene la deformación máxima ε_{max} y la tensión máxima σ_{max} en cada ciclo.

$$\sigma_{max} = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{D}{h} \quad (3.3)$$

donde:

σ_{max} = semiamplitud de la tensión registrada en un ciclo (tensión máxima)

ε_{max} = semiamplitud de la deformación registrada en un ciclo (deformación máxima)

F = fuerza máxima registrada por la célula de carga

S = superficie de fractura

D = desplazamiento máximo

h = altura de la probeta

Estos dos parámetros permiten al sistema obtener los valores del módulo complejo E^* en cada ciclo, pues el mismo se modela como la pendiente aproximada del semieje mayor de la elipse tensión-deformación (Figura 3-5):

$$E^* = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (3.4)$$

El área encerrada por la elipse que se forma en el plano tensión-deformación durante cada ciclo de carga aplicado es proporcional a la Densidad de Energía Disipada E_D en cada ciclo debido al comportamiento viscoelástico del material. El área de esta elipse es una medida de lo que el material se aparta del comportamiento elástico ideal. Para el cálculo de E_D se emplea la fórmula determinante de Gauss [33], como se expresa a continuación:

$$E_D = \frac{g}{S} \cdot \frac{1}{2} \cdot |(\sigma_1 \varepsilon_2 + \sigma_2 \varepsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \varepsilon_n + \sigma_n \varepsilon_1) - (\sigma_2 \varepsilon_1 + \sigma_3 \varepsilon_2 + \dots + \sigma_n \varepsilon_{n-1} + \sigma_1 \varepsilon_n)| \quad (3.5)$$

donde:

E_D = densidad de energía disipada

g = es el valor de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

S = superficie de fractura

σ_i = n valores de tensión a lo largo de un ciclo

ε_i = n valores de deformación a lo largo de un ciclo

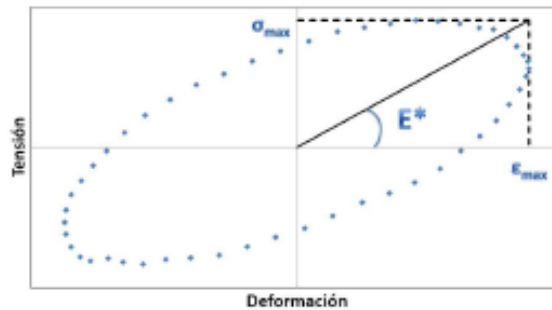


Figura 3-5 Módulo complejo en la elipse de histéresis.

De esta manera, durante el ensayo se determinan los siguientes parámetros de la mezcla: tensión, deformación, módulo complejo y densidad de energía disipada. Luego de obtener estos resultados, se puede caracterizar el proceso de fatiga de manera gráfica y analizando los resultados, obtener los valores de la deformación crítica y del endurance limit.

3.6 **PROGRAMA BISAR3.0**

3.6.1 **INTRODUCCIÓN**

En el diseño de firmes, el método analítico de más uso es el que se basa en la discretización del mismo en un sistema multicapas, en relación a los diferentes materiales que lo componen. Este método analiza las tensiones y deformaciones generadas en las interfases de las capas por las cargas de tráfico a las que se ve sometida la estructura en la superficie. Para las capas de mezcla bituminosa, las deformaciones tangenciales producidas en la fibra inferior son las consideradas en su diseño por fatiga.

Para poder obtener los estados de esfuerzo y deformación en sistemas multicapas, es necesaria la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales, para las cuales existe solución analítica hasta un máximo de tres capas [1]. Para sistemas de más de tres capas, es necesario el uso de programas de cómputo que sean capaces de resolver estas ecuaciones por medio de varios métodos de resolución de ecuaciones diferenciales [2].

Se han creado muchos programas de este tipo, capaces de resolver sistemas multicapas. Uno de los mas populares, es el programa BISAR 3.0 (Bitumen Stress Analysis in Roads), desarrollado por la empresa Shell como herramienta para el diseño de pavimentos flexibles.

Generalmente este programa se utiliza para calcular los estados tensionales en las interfaces de las distintas capas que componen el firme, sin embargo para este estudio, será utilizado como herramienta para calcular únicamente las tensiones y deformaciones tangenciales entre subcapas de una capa de mezcla bituminosa.

3.6.2 DESCRIPCIÓN

BISAR 3.0 es un programa que calcula las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidos por una carga sobre una estructura multicapa elástica. Las principales hipótesis de cálculo que emplea el modelo son las siguientes:

- El sistema consiste en capas horizontales de espesor uniforme sobre una base semi-infinita.
- Las capas se extienden infinitamente en las direcciones horizontales.
- El material de cada capa es homogéneo e isotrópico.
- Los materiales son elásticos y presentan una relación tensión-deformación lineal.

El programa es capaz de resolver sistemas de hasta 10 capas, las cuales pueden considerarse completamente adheridas entre ellas o no.

Los datos de entrada al sistema son la configuración de cargas aplicadas a la estructura, los espesores de las capas y los respectivos módulos de rigidez y módulos de Poisson de ellas. Se debe especificar la posición de los puntos donde se quieren encontrar las tensiones y deformaciones.

Los datos de salida son básicamente las tensiones, deformaciones y desplazamientos en los puntos especificados por el usuario y se pueden obtener en formatos de informe o de hoja de cálculo.

3.6.3 ENTORNO DE TRABAJO

El programa BISAR3.0 trabaja con un entorno de trabajo amigable con el usuario y la interfaz utilizada es la utilizada usualmente por programas basados en sistemas operativos con plataforma Windows de hasta 32 bits. A continuación se detallan las principales ventanas de introducción de datos de entrada y la de datos de salida [35].

3.6.3.1 Datos de entrada

- **Configuración de carga:** Las cargas se introducen en la pestaña "Loads" y siguiendo la normativa española, los valores que se representan son una carga de 64 KN sobre ruedas gemelas (eje de 128 KN) separadas entre sí 37.5 cm, con huella circular de radio 12.5 cm.

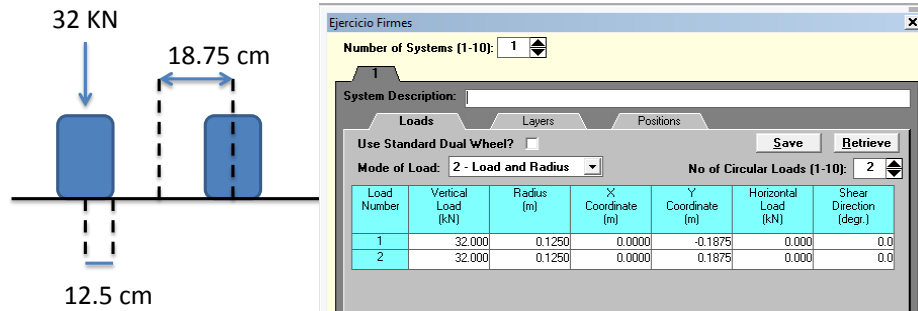


Figura 3-6 Esquema de carga (izquierda) y entorno de la pestaña "loads" en el BISAR 3.0.

- Espesores de capas y módulos:** En la etiqueta "Layers" es donde se introduce esquemáticamente la estructura multicapa. Para la mezcla bituminosa AC16S B50/70 en estudio se utiliza un valor del módulo de Poisson de 0.35, mientras que para la explanada un valor de 0.4. El módulo de rigidez de las capas de mezclas bituminosas varía en cada ciclo, mientras que para la explanada siempre es 100 MPa. Los tres especímenes de mezcla se discretizan en 9 subcapas de mezcla y una capa final de explanada (cuyo espesor es infinito). Las capas se asumen con total adherencia (full friction). La Figura 3-7 ejemplifica un pavimento de 3 capas de diferente espesor.

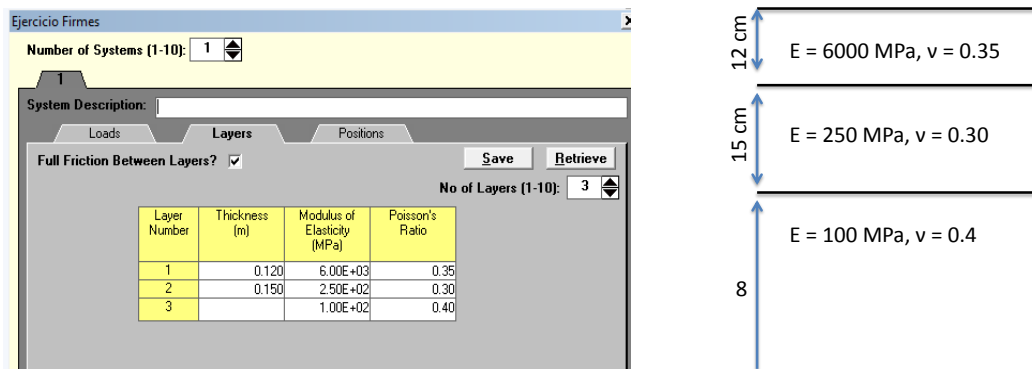
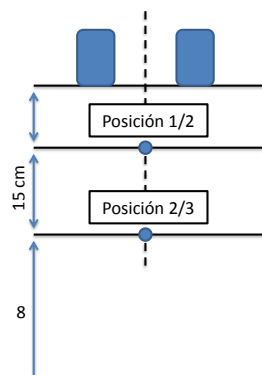
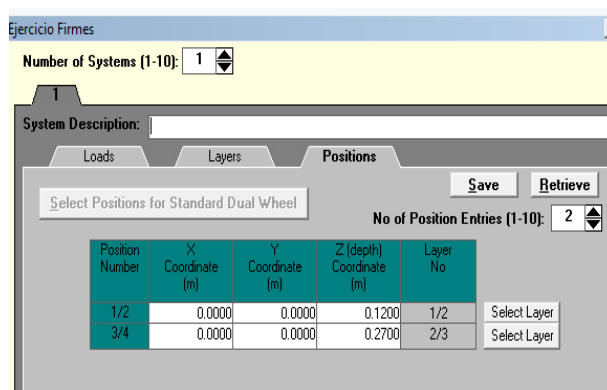


Figura 3-7 Ejemplo de introducción de espesores y módulos para 3 capas en el programa BISAR 3.0.

- Posiciones de los puntos de deformación y tensión:** En la etiqueta "Positions" se introducen los puntos de la estructura en los que se quiere obtener las tensiones, deformaciones y desplazamientos. Se puede seleccionar un máximo de 10 puntos de cálculo. El origen de coordenadas se sitúa en el punto medio entre las ruedas gemelas en la superficie del pavimento. Para los casos de este estudio, se tomarán los puntos en las interfaces de las subcapas de mezcla bituminosa. En la Figura 3-8 se observa un ejemplo para dos capas.

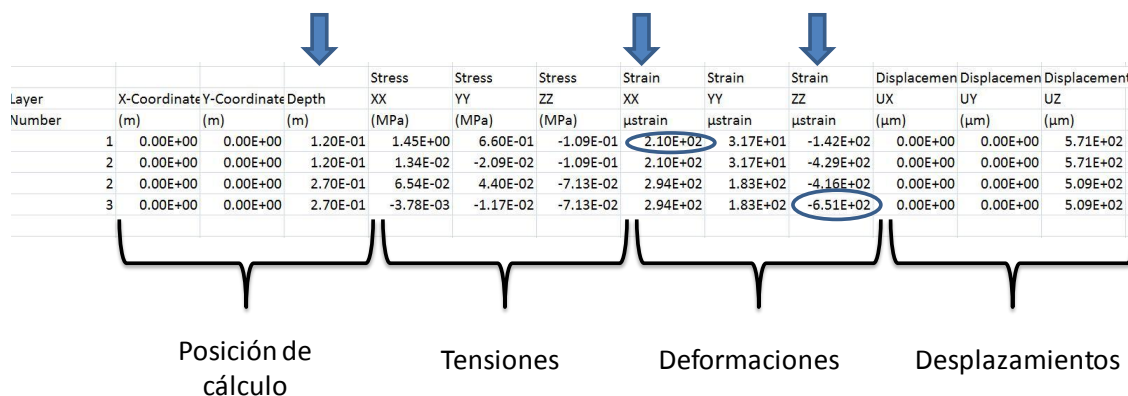



Position Number	X Coordinate (m)	Y Coordinate (m)	Z (depth) Coordinate (m)	Layer No
1/2	0.0000	0.0000	0.1200	1/2
3/4	0.0000	0.0000	0.2700	2/3

Figura 3-8 Ejemplo de introducción de las posiciones de cálculo para 3 capas en el programa BISR 3.0.

3.6.3.2 Datos de salida

Las tensiones, deformaciones y desplazamientos se pueden obtener en diferentes formatos de salida. En el presente estudio, se trabajó con formatos de salida en hojas de cálculo.



Layer Number	X-Coordinate (m)	Y-Coordinate (m)	Depth (m)	Stress XX (MPa)	Stress YY (MPa)	Stress ZZ (MPa)	Strain XX (μstrain)	Strain YY (μstrain)	Strain ZZ (μstrain)	Displacement UX (μm)	Displacement UY (μm)	Displacement UZ (μm)
1	0.00E+00	0.00E+00	1.20E-01	1.45E+00	6.60E-01	-1.09E-01	2.10E+02	3.17E+01	-1.42E+02	0.00E+00	0.00E+00	5.71E+02
2	0.00E+00	0.00E+00	1.20E-01	1.34E-02	-2.09E-02	-1.09E-01	2.10E+02	3.17E+01	-4.29E+02	0.00E+00	0.00E+00	5.71E+02
2	0.00E+00	0.00E+00	2.70E-01	6.54E-02	4.40E-02	-7.13E-02	2.94E+02	1.83E+02	-4.16E+02	0.00E+00	0.00E+00	5.09E+02
3	0.00E+00	0.00E+00	2.70E-01	-3.78E-03	-1.17E-02	-7.13E-02	2.94E+02	1.83E+02	-6.51E+02	0.00E+00	0.00E+00	5.09E+02

Posición de cálculo Tensiones Deformaciones Desplazamientos

Figura 3-9 Ejemplo de datos de salida en el programa BISR 3.0, para una estructura de 3 capas.

En el estudio que se realiza, las deformaciones que provocan la fatiga en el material son las tangenciales. En los resultados, estas deformaciones tangenciales (ϵ_t) están denotadas por Strain XX. Las deformaciones plásticas se relacionan con las deformaciones en la cabecera de la explanada (ϵ_x), en este caso Strain ZZ. El convenio de signos establece positivo para tracciones y negativo para compresiones.

Para el presente estudio, las deformaciones tangenciales se calculan en la interfaz de las subcapas de mezcla bituminosa, pues es donde se dan sus mayores magnitudes. Las deformaciones que provocan fatiga son las de tracción, sin embargo se calcularán y guardarán todas.

Capítulo 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se resumen los resultados más importantes obtenidos durante el presente trabajo y se hace el correspondiente análisis de los mismos.

Primeramente se muestran los resultados de caracterización de la fatiga obtenidos a partir de la ejecución de los ensayos EBADE y de flexotracción a 4 puntos sobre la mezcla convencional en estudio (AC16S). Se hará un breve análisis descriptivo del comportamiento que expresan los resultados de estos ensayos.

Así mismo, con los resultados obtenidos en los ensayos se obtienen los parámetros necesarios para llevar a cabo el proceso iterativo. El procedimiento para la obtención de estos parámetros y su influencia en la vida a fatiga de la mezcla en estudio es analizado y discutido.

Después de ser analizados los resultados de los ensayos, se procede a la presentación de los resultados obtenidos aplicando el proceso iterativo a mezclas con dimensiones de 9 cms, 13.5 cms y 18 cms. Con estos resultados se podrá realizar un análisis de la influencia del espesor y de la discretización en subcapas en la vida a fatiga de las mezclas en relación al enfoque tradicional, a través de la propagación de la fisura por cada subcapa.

4.2 ENSAYO EBADE

4.2.1 INTRODUCCIÓN

Se realizó el ensayo EBADE a dos probetas. La totalidad de los resultados de los ensayos se puede ver en el Anejo A. Aquí se expondrán los resultados obtenidos con el ensayo que dio una mejor representatividad de la fatiga en la mezcla.

A partir de las deformaciones medidas cada cien ciclos de carga, se pueden calcular las variaciones en las tensiones, densidad de energía disipada, y módulo durante todo el ensayo. Los valores de estos parámetros son graficados en curvas que visualizan de mejor manera el proceso de fatiga.

Se hará un análisis de los resultados de cada curva obtenida y al mismo tiempo se comparan los resultados entre curvas para saber cuál es la que mejor caracteriza la fatiga de la mezcla.

Finalmente se expondrá un breve resumen de los parámetros obtenidos con el ensayo y que supondrán la base del proceso iterativo de este estudio.

4.2.2 CURVA DE TENSIONES VS NÚMEROS DE CICLOS.

En la Figura 4-1 se observa de manera muy clara como las tensiones van aumentando progresivamente con el aumento en la amplitud de las deformaciones en cada escalón de carga hasta cierto punto entre los ciclos de carga 30000-40000, cerca del escalón de deformación

número 7 (nivel de microdeformaciones con valor de 175). A partir de este punto se da una rápida disminución de los valores de las tensiones, que indica que la mezcla se está acercando a la rotura.

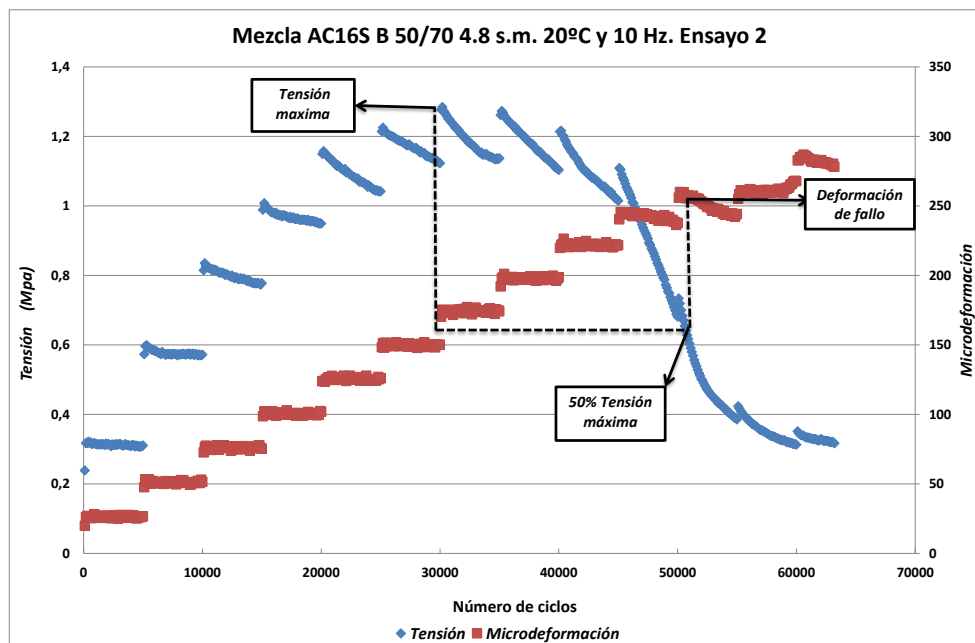


Figura 4-1 Evolución de las tensiones y deformaciones en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70.

Si se asume el criterio clásico de fallo, en el cual se considera que el material ha fallado cuando las tensiones han perdido un 50% del valor de la tensión máxima durante el ensayo, se tendría que la deformación de fallo (deformación crítica ϵ_{crit}) es de aproximadamente 255 (microdeformación), mientras que aquella en la que se da la máxima tensión es de aproximadamente 175 (Tabla 4-1).

	Tensión máxima	50 % de la tensión máxima (ϵ_{crit})
Tensión (Mpa)	1,284	0,642
ϵ (microdeformación)	175	255

Tabla 4-1 Valores de las tensiones máximas y al 50% de su valor con sus deformaciones asociadas.

De esta manera, se podría definir por medio de estas curvas el momento del fallo, sin embargo, no se podría definir el endurance limit, pues es fácil de apreciar que dentro de cada escalón de carga, las tensiones comienzan con un valor que poco a poco va disminuyendo, lo que llevaría a pensar que para todas las amplitudes de deformación se genera daño, lo cual no es del todo cierto, pues cuando las deformaciones son muy pequeñas (en los primeros tres o cuatro escalones de carga) lo que ocurre es que se un reacomodo de las partículas de la mezcla y el fenómeno de tixotropía, por lo que el daño en la misma es muy bajo o nulo. Este efecto es muy difícil de representar cuando los parámetros que caracterizan la fatiga son las tensiones o el módulo, pues este fenómeno está asociado a la reología de la mezcla [34]. En general, se puede observar que para las deformaciones más bajas, las tensiones tienden a estabilizarse al final del escalón, lo que comprueba que gran parte de la disminución de su valor no fue provocado por daño a la mezcla. En las deformaciones mas grandes esta estabilización no es tan clara.

4.2.3 CURVA DE DENSIDAD DE ENERGÍA DISIPADA VS NÚMEROS DE CICLOS.

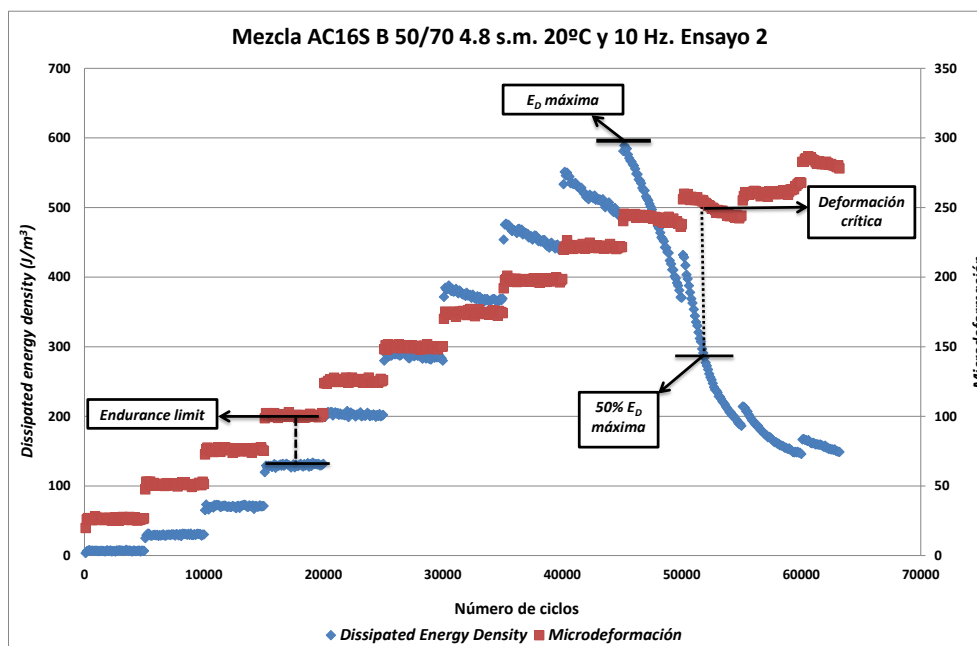


Figura 4-2 Evolución de la Densidad de Energía Disipada y las deformaciones en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70.

En la Figura 4-2 se observa nuevamente un comportamiento similar al de la curva de tensiones, pues la densidad de energía disipada (E_D), también va aumentando en cada escalón de carga, hasta llegar a cierto nivel, donde cae súbitamente, indicando que la mezcla se acerca a su fallo.

La gran ventaja de caracterizar la fatiga con la curva E_D es que con esta se puede encontrar de igual manera una deformación crítica, pero también el endurance limit ϵ_{lim} del material, pues la E_D es un parámetro que se estabiliza mucho más rápido que las tensiones en cada escalón de carga, después de haber considerado el efecto de tixotropía y reacomodo de partículas. De esta manera, se observa claramente en la Figura 4-2, como los primeros escalones de carga presentan una tendencia prácticamente horizontal, significando esto que casi no hay daño. Así mismo, con respecto a la deformación crítica, se ve claramente que la caída en los valores de E_D es mucho más abrupta que en las curvas de tensiones, lo que hace más sencillo encontrar el punto de fallo.

El criterio utilizado para definir el fallo del material es la disminución del 50% del máximo valor del E_D durante el ensayo, y al ser la caída tan abrupta, el valor es muy fácil de averiguar, incluso hasta gráficamente. En este caso, se observa que el valor de la deformación crítica se encuentra dentro de la nube de puntos del undécimo escalón de deformación (microdeformación aproximada de 250) y su valor se obtuvo en base a una ecuación potencial (ecuación 4.1) que ajusta los valores de las deformaciones en el escalón 11 con el valor del 50% de la E_D . Entonces, la deformación crítica se ha calculado de la manera en que se expresa en la ecuación 4.19.

$$\epsilon_{crit} = 159.49(E_D)^{0.0808} \quad (4.1)$$

donde ϵ_{crit} es la deformación crítica (microdeformación).

	E_D <i>máxima</i>	50% E_D <i>máxima</i> (ϵ_{crit})
E_D (J/m ³)	588,80	294,40
ϵ (microdeformación)	245	252

**Tabla 4-2 Valores de la densidad de energía disipada máxima
y al 50% de su valor con sus deformaciones asociadas**

Por lo tanto el valor de la deformación crítica de la mezcla es de 252 micras, y se observa que la caída en la densidad de energía disipada es tan pronunciada, que la diferencia entre la deformación con mayor E_D y la deformación crítica es de apenas 7 (microdeformación). Así mismo, es fácil apreciar que la deformación crítica que se obtuvo con la curva de tensiones tiene casi el mismo valor que la deformación crítica que se obtuvo con la curva de E_D .

Para obtener el punto de límite de resistencia a la fatiga (endurance limit ϵ_{lim}), se asume que en el primer escalón de carga no se produce daño, pues las deformaciones son muy pequeñas. Partiendo de esta suposición, generalmente se busca el escalón de carga donde la proporción entre la E_D máxima y mínima dentro del mismo escalón sean mayores que el coeficiente de variabilidad del primer escalón. Cuando ocurre esto, se dice que el endurance limit se da en el nivel de deformación anterior a este escalón. Sin embargo, la curva que se generó en el ensayo, presenta una gran dispersión en los puntos del primer escalón, generando un coeficiente de variabilidad cercano al 8%, el cual se considera muy alto y que llevaría a tomar un valor del endurance limit en escalones de deformación muy alta.

Por lo tanto, se ideó otro procedimiento, en el cual se estudiaron las tendencias de los valores de E_D y se decidió que el endurance limit se daría en el nivel de deformaciones anterior al escalón en el que cambia la tendencia en la recta de ajuste de los puntos E_D de cada escalón, es decir, se crearon rectas de ajuste con los valores de E_D de cada escalón, y se estudiaron sus tendencias en base a sus pendientes.

Con este criterio, se pudo observar que la recta de ajuste del primer escalón de deformaciones tenía una pendiente ligeramente positiva, al igual que en los 3 escalones siguientes, hasta que se llega al quinto escalón donde claramente se observa un cambio de tendencia (la pendiente se vuelve negativa). En la Figura 4-3 se pueden observar las curvas para el cuarto y quinto escalón, pues entre ellos es donde se cambia la tendencia. El resto de curvas de para los primeros cinco escalones se pueden ver en el Anejo A.

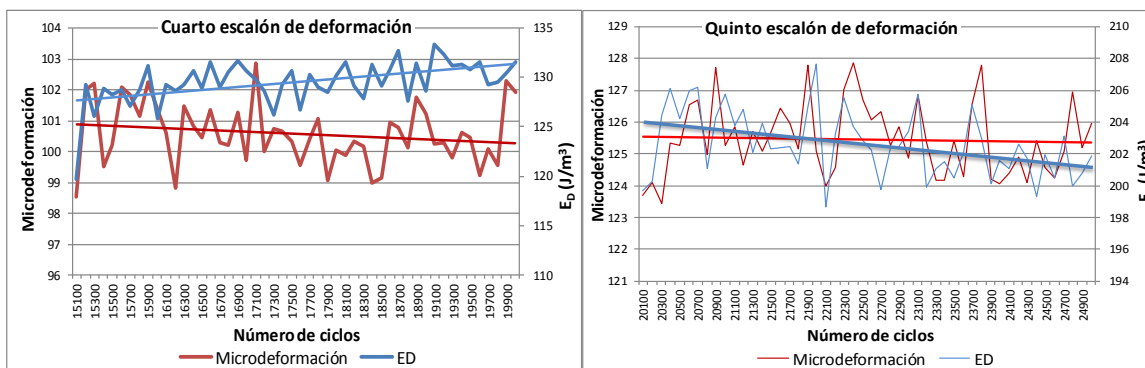


Figura 4-3 Curvas de tendencia de la densidad de energía disipada y de las deformaciones en el escalón de carga 4 (izquierda) y escalón de carga 5 (derecha).

De esta manera, viendo las líneas de tendencia de los datos en cada escalón, el endurance limit se da en la microdeformación con valor 100 (cuarto escalón de deformaciones). Este valor es alto en relación a lo que se ve en la literatura (nivel de microdeformaciones del orden 70-80), sin embargo, los resultados se ven matizados por la metodología empleada debido a la dispersión de los puntos en los primeros escalones. Así mismo, en el cuarto escalón las cargas aplicadas al final disminuyen su amplitud un poco en relación a la primeras dentro del mismo escalón, y es precisamente en este punto donde supuestamente se observaría un mayor daño y por ende una disminución en la E_D , pero al disminuirse las cargas un poco, se ve una recuperación en el valor de la densidad de energía disipada, seguramente por el fenómeno de tixotropía.

Entonces, con la curva de densidad de energía disipada se pudo obtener finalmente el valor de las deformaciones críticas y el endurance limit de la mezcla y como se había comentado en el capítulo 2, estas deformaciones son características de cada mezcla, y específicamente para el caso de la deformación crítica, esta es independiente del nivel de tensiones a la que se ve sometida la mezcla a una cierta temperatura.

Tipo de deformación	Tipo de parámetro medido con el barrido de deformaciones	
	Tensión	Densidad de energía disipada
Endurance Limit (microdeformaciones)	-	100
Deformación crítica (microdeformaciones)	255	252

Tabla 4-3 Valor de la deformación crítica y del endurance limit con su densidad de energía disipada y tensión asociada.

Por lo tanto, considerando los valores de deformación crítica y del endurance limit obtenidos mediante la curva de densidad de energía disipada, se podría decir que proceso de fatiga en esta mezcla se da cuando la misma está siendo sometida a valores de microdeformaciones de entre 100 y 252., y que antes del valor del endurance limit la misma no presenta daño, mientras que después de la deformación crítica, se llega a la ruptura.

4.2.4 CURVA DE MÓDULO VS NÚMERO DE CICLOS

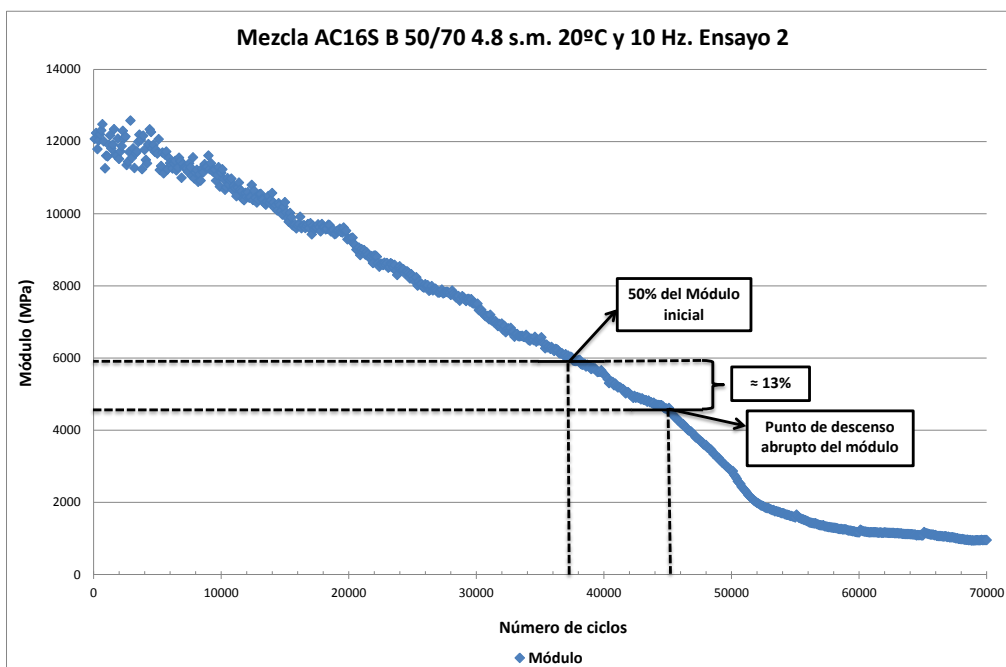


Figura 4-4 Evolución del valor del módulo en el Ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70.

En la Figura 4-4 se ve que el módulo presenta un comportamiento descendente durante la mayor parte del ensayo, como era lógico de esperar, pero al igual que con las tensiones, se puede ver que en los primeros escalones de carga el valor de este tiende a estabilizarse al final de cada escalón, de igual manera debido al fenómeno de reacomodo del material y de la tixotropía. De hecho, se ha comprobado que con ensayos “up and down” (sube y baja) de carga con periodos de reposo, se observa una recuperación del módulo bastante importante para deformaciones bajas [34], que comprueba lo dicho anteriormente.

Ahora bien, se puede observar como para el primer escalón de carga casi no hay variación de los valores del módulo pues la deformación es muy pequeña. Debido a esto, se puede considerar que el módulo inicial de la mezcla es el promedio de los valores tomados en el primer escalón de deformaciones. De esta manera, el valor del módulo es aproximadamente 11870 MPa. El coeficiente de variación es apenas de un 2,78%, lo que confirma la fiabilidad del resultado.

<i>Modulo inicial (Mpa)</i>	11870
<i>Desviación estándar (Mpa)</i>	330
<i>Coeficiente de variación</i>	2,78%

Tabla 4-4 Valor del módulo inicial con el ensayo EBADE.

También, se puede observar como el criterio clásico de fallo del 50% del valor de módulo inicial infravaloraría la resistencia a fatiga de esta mezcla, pues se ve claramente que después que el valor del módulo alcanza este porcentaje, su valor sigue disminuyendo de manera constante hasta que se llega a cerca del 37% del valor del módulo inicial, donde si se observa ya un descenso abrupto en el valor del módulo. Es decir, en realidad el fallo se da a un valor del 13% menos del

valor considerado en el criterio clásico de falla. Por lo tanto, hay que analizar con detenimiento cuando utilizar este criterio, pues claramente para esta mezcla no funciona.

Criterio de falla	% del módulo inicial	Valor del Módulo (Mpa)	Diferencia (%)
Clásico	50,00%	5935	13,00%
Descenso abrupto	37,00%	4398	

Tabla 4-5 Diferencia entre los valores del módulo con el criterio de fallo clásico y en el momento que se da el descenso abrupto en su valor en la curva de Módulo vs # de ciclos.

4.2.5 CURVA DE MÓDULO VS DEFORMACIÓN

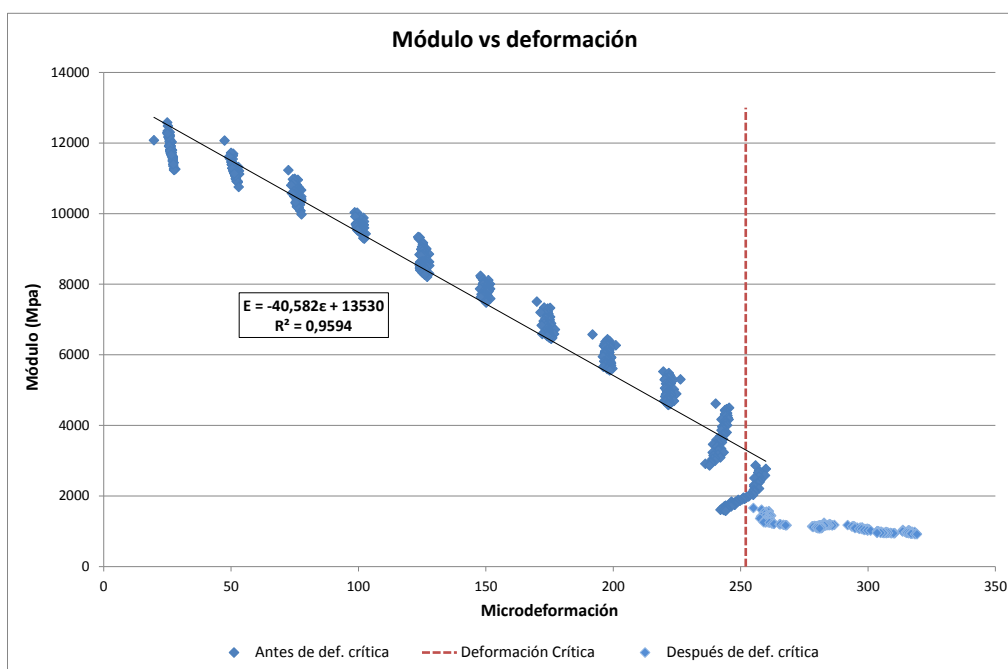


Figura 4-5 Variación del módulo en relación a la amplitud de deformación aplicada en el ensayo EBADE a 20°C para la mezcla AC16S B50/70.

La curva de la Figura 4-5 es la utilizada para poder obtener la ecuación *Mod_{def}* con la que se trabaja en el proceso iterativo. Se observa como el módulo disminuye al aumentar la amplitud de la deformación, y que existe una buena correlación entre los valores del módulo y las deformaciones. En este caso se ha dividido la curva del módulo en dos, una parte antes de llegar a la deformación crítica y otra después, pues la ecuación *Mod_{def}* relaciona las deformaciones con el módulo antes que el material falle. Después que el material falla, al módulo se le da un valor de 100 MPa en el proceso iterativo, por lo que la recta de ajuste que se hace para encontrar la ecuación *Mod_{def}* no debe tomar en cuenta los valores del módulo después de la deformación crítica. Es claro que antes de la deformación crítica, el comportamiento en los valores del módulo presenta una disminución constante y uniforme, pero después de pasar la deformación crítica disminuyen abruptamente, corroborando lo que se ha comentado con la curva de módulo vs número de ciclos.

Así mismo, después de obtener la ecuación *Modelf*, se encuentra el valor de la deformación mínima ϵ_{min} que también se usará en el proceso iterativo como límite, bajo el cual a cualquier subcapa con valor de deformación inferior a esta se le asignará un el valor del módulo inicial.

Entonces, después de ajustar los valores del módulo para deformaciones menores a la deformación crítica por medio de una recta, se obtiene la ecuación *Modelf*, la cual presenta un coeficiente de correlación R^2 muy alto (bueno), de casi el 96%.

- Ecuación *Modelf*:
$$E = -40.582(\epsilon) + 13530 \quad (4.2)$$

Donde E es el valor del módulo en MPa y ϵ es la microdeformación.

Luego, la deformación mínima se averigua haciendo cero la resta de la ecuación *Modelf* menos el valor del módulo inicial y despejando el valor de la deformación, dando el siguiente resultado:

- $\epsilon_{min} = 40,9$ (microdeformación)

Es importante señalar que no es lo mismo deformación mínima que el endurance limit, pues ambas se basan en conceptos distintos. El endurance limit indica la deformación límite bajo la cual el material no sufre daño y se relaciona al parámetro de densidad de energía disipada. Por otro lado, la deformación mínima está relacionada con el valor del módulo, el cual disminuye de manera constante en los ensayos a fatiga. Un porcentaje de la pérdida de rigidez puede ser recuperada si se deja reposar (sin cargar) el material, pues como se comentó se puede deber a efectos de reacomodo de partículas, tixotropía, sin embargo en este tipo de ensayos ese reposo no se da y además no es considerado en el proceso de diseño por el método iterativo.

4.2.6 RESUMEN DE PARÁMETROS OBTENIDOS POR EL ENSAYO EBADE.

Por medio del ensayo EBADE se pudo obtener las deformaciones críticas y endurance limit. Los valores de estas deformaciones se obtuvieron por el análisis de la curva de densidad de energía disipada, que definitivamente es la que mejor caracteriza la fatiga de la mezcla. El valor de la deformación crítica se utiliza en el proceso iterativo para el estudio de la propagación de fisuras. Del análisis de las curvas de densidad de energía disipada y de tensiones, se pudo obtener las tensiones máximas y E_D durante el proceso de fatiga hasta el fallo del material.

Por otro lado, con las curvas del módulo se pudo obtener la ecuación *Modelf* y el valor de la deformación mínima asociada. También, con los valores del módulo en los primeros 5000 ciclos de carga, se obtuvo el valor del módulo inicial a utilizar en el proceso iterativo.

Tensión máxima(Mpa)	1,284
E_D máxima (J/m3)	588,80
Módulo inicial (Mpa)	11870
ϵ_{crit} (microdeformación)	252
ϵ_{lim} (microdeformación)	100
ϵ_{min} (microdeformación)	40,9
Ecuación <i>Modelf</i>	$E = -40.582(\epsilon) + 13530$

Tabla 4-6 Principales parámetros y resultados obtenidos con el ensayo EBADE.

4.3 **ENSAYO FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS**

4.3.1 **INTRODUCCIÓN**

El ensayo a flexotracción en 4 puntos se le realizó a 10 probetas a diferentes niveles de deformación, tal cual dicta la norma. A continuación se presentarán los resultados más significativos del ensayo, destacando por supuesto la ley de fatiga resultante.

4.3.2 **CURVA DE MÓDULO VS NÚMERO DE CICLOS**

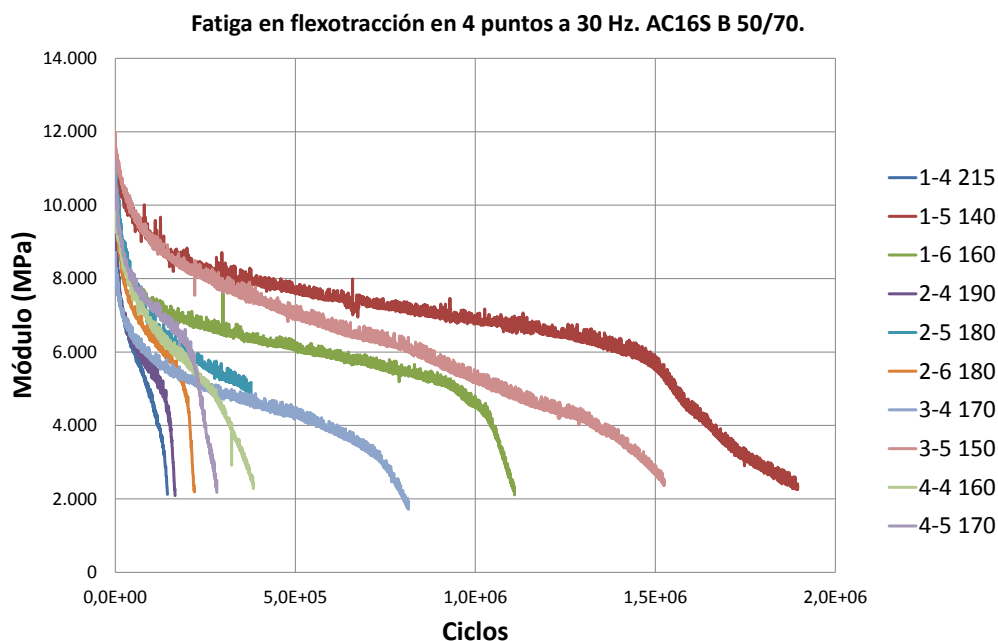


Figura 4-6 Curvas de evolución del módulo con diferentes amplitudes de deformación en el ensayo a flexotracción en 4 puntos.

De la Figura 4-6 se puede apreciar como a las probetas a las que se les imponen deformaciones mayores (probetas 1-4, 2-4, 2-6 y 4-5) presentan comportamientos menos viscosos y con trayectorias más lineales de los valores del módulo. Por el contrario, en aquellas probetas con deformaciones menores, se puede observar claramente las tres fases que componen el proceso de fatiga de las mezclas: primeramente una caída rápida del valor del módulo, seguida por una disminución constante pero de mucho menor intensidad, para luego llegar a la fase final o de ruptura donde se da una caída abrupta y repentina del módulo. En las probetas con deformaciones mayores no es tan sencillo distinguir estas fases.

Ahora, con respecto al fallo de las probetas, se utiliza el criterio clásico que dice que el fallo se da en el momento en que se reduce el 50% del módulo inicial de la mezcla. El módulo inicial se obtiene con el valor del módulo en el ciclo 100. Los valores de los módulos iniciales y ciclos de fallo obtenidos para cada probeta se resumen en la Tabla 4-7. De nuevo aquí se observa que en general las probetas con mayor deformación impuesta, fallaron en muchos menos ciclos que las de

deformaciones menores. Además por el comportamiento explicado antes, las probetas con mayor deformación tienden a comportarse y fallar de manera frágil por su comportamiento poco viscoso en relación a la ductilidad de las de deformación menor.

<i>Probeta</i>	<i>Módulo inicial (MPa)</i>	<i>Ciclos hasta 50% del módulo inicial</i>	<i>Microdeformación impuesta</i>
1-4	10555	80500	215
1-5	11103	1486500	140
1-6	10540	839500	160
2-4	9652	138000	190
2-5	11518	220500	180
2-6	10520	178500	180
3-4	8716	476500	170
3-5	11849	848000	150
4-4	10415	246500	160
4-5	11193	223500	170
Promedio	10606	-	-
Desviación estándar	913	-	-
Coef. de variabilidad	8,61%	-	-

Tabla 4-7 Valores del módulo inicial, módulo al 50% y deformación impuesta para cada probeta ensayada junto con el valor del módulo promedio de todo el ensayo a flexotracción en 4 puntos para la mezcla AC16S B50/70.

Con respecto al valor del módulo inicial, el procedimiento dicta que se determine en el ciclo 100 del ensayo, pues en los primeros ciclos se tiende a computar valores de módulo muy altos. Sin embargo, analizando los datos de salida de cada curva es fácil de apreciar que los valores de los módulos se estabilizan de manera rápida cerca del ciclo 10, o incluso antes, por lo que el criterio de asignación del módulo inicial hace que el valor promedio que se obtuvo de todas las probetas sea mucho más bajo que el del ensayo EBADE, razón de más para tomar el valor del módulo inicial del ensayo EBADE para el proceso iterativo. Adicionalmente, el valor del módulo inicial presenta una desviación estándar importante, con un coeficiente de variabilidad del 8,61%.

También, importante hacer la observación del criterio de falla utilizado en este ensayo, pues nuevamente se observa que la definición del 50% en la reducción del módulo en algunos casos infravalora la resistencia a fatiga de la mezcla, como por ejemplo en la probeta 3-5, donde en las curvas se observa que cuando se termina el ensayo apenas está empezando a caer de manera precipitada el valor de su módulo, y esto cerca de los 4000 MPa, que es casi el 30% del valor del módulo inicial (20 puntos porcentuales menos que el criterio de fallo y casi medio millón de ciclos de carga de diferencia). Por lo tanto, es necesario tener especial cuidado con las mezclas muy dúctiles al aplicar este criterio de fallo.

4.3.3 LEY DE FATIGA

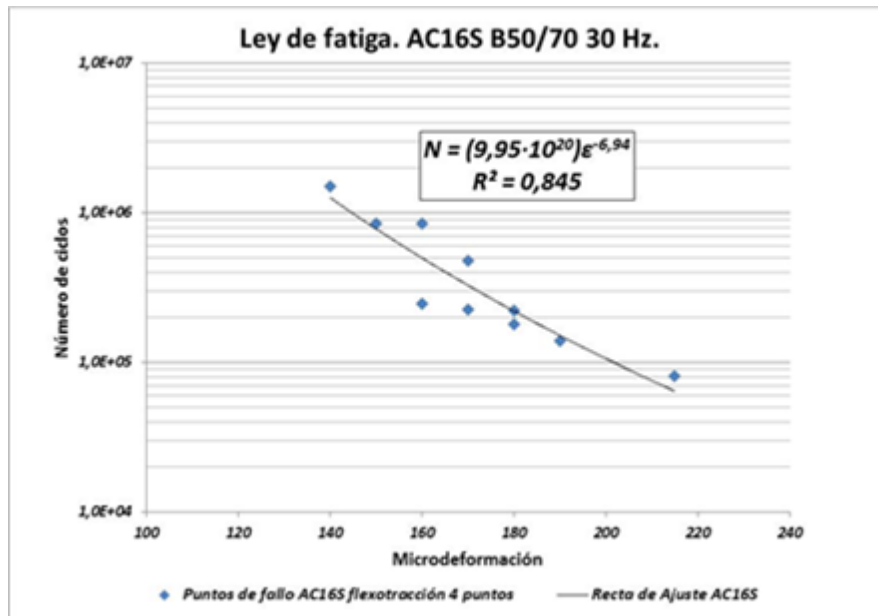


Figura 4-7 Ley de fatiga obtenida con el ensayo a flexotracción en 4 puntos a 20°C para la mezcla AC16S B50/70.

- *Ley de Fatiga:* $N = 9.95 \times 10^{20} (\epsilon)^{-6.942}$ (4.3)

Donde N es el número de ciclos hasta el fallo que soportaría el material con una deformación ϵ .

La ley de fatiga se obtiene de graficar los pares ordenados representados por el número de ciclos de fallo con la deformación impuesta a cada probeta. Se puede apreciar que en el gráfico de la Figura 4-7 existen 10 puntos dispersos, correspondientes a ese mismo número de probetas. Estos puntos fueron ajustados por una recta con un coeficiente de correlación R^2 de casi el 85%. De esta manera se obtuvo la ley de fatiga expresada en la ecuación 4.3.

Cuando se generan leyes de fatiga se recomienda que la misma sea generada con puntos que se ubiquen entre los 100000 y 10000000 de ciclos de carga al menos, para poder representar bien el comportamiento del material, y esa condición se cumple en este caso.

Ahora, sustituyendo los valores de la deformación crítica y del endurance limit en la ley de fatiga, se puede ver que para el caso del valor del endurance limit, el número de ciclos asociado a este es muy grande (más de 10 millones) y que por el contrario, para la deformación crítica, es muy pequeño (menos de cincuenta mil). Estos resultados confirman la relación que existe entre la ley de fatiga y la deformación crítica al menos en un contexto conceptual y cualitativo, pues los ensayos trabajan con parámetros diferentes, aunado a la diferencia en la frecuencia de carga.

	Microdeformación	N (ley de fatiga)
Endurance limit	100	1,30E+07
Deformación crítica	252	2,12E+04

Tabla 4-8 Número de ciclos obtenidos con la ley de fatiga en relación a los valores de la deformación crítica y endurance limit.

4.3.4 RESUMEN DE PARÁMETROS OBTENIDOS CON EL ENSAYO DE FLEXOTRACCIÓN.

Por medio del ensayo a flexotracción se pudo obtener la ley de fatiga que será utilizada en el proceso iterativo. Para poder averiguar la ley de fatiga, previamente se obtuvieron los números de ciclos a los que la probeta fallaba para una determinada deformación de carga siguiendo el criterio clásico (fallo cuando se pierde un 50% del módulo inicial). El módulo inicial de cada probeta se obtuvo siguiendo el criterio clásico (valor del módulo en el ciclo de carga 100) y el módulo general de la mezcla se obtuvo promediando el valor del módulo inicial de todas las probetas. Se analizó los diferentes matices (contras y beneficios) de utilizar estos criterios clásicos de fallo y de obtención del módulo.

<i>Módulo Inicial promedio (MPa)</i>	10606
<i>Ley de Fatiga</i>	$N = 9.95 \times 10^{20} (\epsilon)^{-6.942}$

Tabla 4-9 Resumen de parámetros obtenidos con el ensayo a flexotracción en 4 puntos.

4.4 PROCESO ITERATIVO PARA ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS

4.4.1 INTRODUCCIÓN

El proceso iterativo se realizó a tres casos, pues se simula la propagación de la fisura a una capa de mezcla bituminosa con tres dimensiones distintas: 9 cms, 13.5 cms y 18 cms. Se asume que la capa va apoyada sobre una explanada de infinito espesor con un módulo de rigidez de 100 MPa. La capa de mezcla bituminosa fue discretizada en 9 subcapas de espesores idénticos, a las que se les da un módulo inicial correspondiente al obtenido en el ensayo EBADE. Las subcapas son numeradas del 1 al 9, siendo 1 la subcapa más superficial (la de más arriba) y 9 la de más abajo (la que está en contacto con la explanada).

Seguidamente con la ayuda de los parámetros (tabla 4-10) obtenidos en los ensayos EBADE y de flexotracción en cuatro puntos, se realiza el proceso iterativo descrito en el capítulo 3.

<i>Módulo inicial (Mpa)</i>	11870
ϵ_{crit} (microdeformación)	252
ϵ_{min} (microdeformación)	40,9
<i>Ecuación Modelf</i>	$E = -40.582(\epsilon) + 13530$
<i>Ley de Fatiga</i>	$N = 9.95 \times 10^{20} (\epsilon)^{-6.942}$

Tabla 4-10 Parámetros a utilizar en el proceso iterativo.

Para los tres casos en estudio se obtienen número de ciclos de carga hasta que la totalidad de la capa falle y curvas de comportamiento de la fisura en el proceso de propagación. También se analiza de manera gráfica los casos en que se da convergencia de deformaciones y es necesario el uso de la ley de fatiga. Los resultados se exponen de manera resumida; la totalidad de estos se puede ver en el Anejo B.

4.4.2 CASO 1: ESPESOR TOTAL DE LA CAPA DE MEZCLA DE BITUMINOSA DE 9 CMS.

Como describe el proceso iterativo, se discretizaron los 9 cms de mezcla bituminosa en 9 subcapas de 1 cm cada una. La configuración inicial donde se consideran los valores del módulo de rigidez inicial para cada subcapa y los coeficientes de Poisson (que son constantes durante todo el proceso) quedaría tal cual se observa en la Figura 4-8. El valor del módulo de rigidez de la explanada es 100 MPa para inducir un fallo más rápido del material. Este valor corresponde al de una explanada tipo E2 (capacidad media).

Subcapa 1, espesor: 1cm	} 9 cms
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 2, espesor: 1cm	
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 3, espesor: 1cm	
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 4, espesor: 1cm	
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 5, espesor: 1cm	
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 6, espesor: 1cm	} 9 cms
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 7, espesor: 1cm	
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 8, espesor: 1cm	
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$	
Subcapa 9, espesor: 1cm	
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$	
Explanada, espesor: ∞	
E = 100 Mpa, $\nu = 0,4$	

Figura 4-8 Configuración inicial caso 1.

A partir de esta configuración empieza la aplicación de carga, y los primeros tres ciclos generan los resultados de la Tabla 4-11. Las microdeformaciones se calculan en la fibra inferior de cada subcapa.

Mezcla AC16S 50/70 de 9 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1 cm c/u.								
Ciclo 1 para 9 subcapas			Ciclo 2 para 9 subcapas			Ciclo 3 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-168	11870	1	-176	11870	1	-190	11870
2	-118	11870	2	-113	11870	2	-107	11870
3	-69	11870	3	-52	11870	3	-26	11870
4	-21	11870	4	8	11870	4	55	11314
5	26	11870	5	68	10752	5	135	8055
6	73	10555	6	129	8307	6	215	4809
7	122	8595	7	189	5860	7	295	100
8	172	6566	8	250	3380	8	377	100
9	224	4444	9	313	100	9	391	100

Tabla 4-11 Valor de las deformaciones y módulos de los primeros tres ciclos de carga para el caso 1.

Es fácil apreciar que ya en el primer ciclo la deformación generada en la última subcapa (subcapa 9) se ha acercado mucho a la deformación crítica que se obtuvo en el ensayo EBADE. Debido a esto, el módulo de esta subcapa se ha reducido más de un 60% y eso en tan sólo un ciclo de carga.

Los módulos se recalculan utilizando la ecuación *Mod_{def}* obtenida con la ayuda del ensayo EBADE. También, en el primer ciclo de carga las cuatro últimas subcapas sufrieron deformaciones tales que en todas ellas se ve una disminución de su módulo. Las cuatro primeras subcapas presentan deformaciones de compresión, por lo que su módulo no se ve afectado, mientras que la subcapa 5, presenta una deformación en tracción inferior a la deformación mínima ϵ_{\min} que se calculó previamente y por eso su módulo tampoco varía.

Para el segundo ciclo de carga se utilizan los módulos calculados durante el primer ciclo para cada subcapa respectivamente. Y ya se puede observar como falla la última subcapa debido a que su deformación sobrepasa el valor de la deformación crítica. A partir de este instante, se considera que esta subcapa ha fallado y por tanto se le asigna un valor de 100 MPa, para asignarle un valor muy bajo (igual al de la explanada) en el que casi no aporta resistencia. También en este segundo ciclo la deformación en la quinta capa llega a sobrepasar la deformación mínima y por tanto ve reducido el valor de su módulo para el ciclo siguiente. Las subcapas 6, 7 y 8 siguen aumentando su deformación de manera rápida y por tanto su módulo sigue disminuyendo en la misma proporción. Las cuatro primeras subcapas siguen sin variar su módulo, a pesar que la subcapa 4 ya paso a tener deformaciones en compresión.

Para el tercer ciclo la fisura se va propagando con mayor rapidez, pues la capa de pavimento ha perdido capacidad de resistencia a la fatiga por la disminución de su espesor de 9 cms a 8 cms (por haberse eliminado la subcapa 9) y además por la disminución de los módulos de rigidez, debido a las deformaciones impuestas en los ciclos anteriores. Debido a esto, en este ciclo se da el fallo de dos subcapas más (la 8 y la 7), pues sus deformaciones llegan a superar la deformación crítica. Al igual que sucedió con la subcapa 9, a estas subcapas se les asigna un módulo con valor de 100 MPa para el siguiente ciclo de carga. Al final del ciclo 3, ya solo quedan tres subcapas que todavía presentan el valor del módulo inicial, pues ya la subcapa 4 ha superado la deformación mínima de tracción y ve disminuido su módulo, al igual que las subcapas 5 y 6.

Así continua el proceso iterativo, hasta que se llega a deformar la última subcapa, donde ya se dice que falló la totalidad del pavimento bituminoso, siendo claro que la fisura empieza por la base y se propaga hasta la superficie haciendo fallar capa por capa en orden ascendente. En este caso, debido a que se está estudiando un espesor relativamente bajo, el pavimento llega a fallar en 7 ciclos de carga nada más. Las deformaciones inducidas en cada ciclo y los valores de los módulos correspondientes a ellas se ven resumidos en las Tabla 4-12.

En la Figura 4-9 se aprecia de manera gráfica como van evolucionando las deformaciones en las subcapas y en que ciclo estas sobrepasan el valor de la deformación crítica. Es claro que ya para el cuarto ciclo han fallado la mitad de las subcapas del espécimen y que considerando el pequeño espesor que posee, sería suficiente para considerar el fallo total de la capa de mezcla.

Mezcla AC16S 50/70 de 9 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1 cm c/u.								
Ciclo 4 para 9 subcapas			Ciclo 5 para 9 subcapas			Ciclo 6 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-205	11870	1	-183	11870	1	-87	11870
2	-79	11870	2	29	11870	2	217	4740
3	46	11660	3	241	3754	3	515	100
4	171	6586	4	453	100	4	625	100
5	296	100	5	525	100	5	714	100
6	422	100	6	584	100	6	785	100
7	453	100	7	632	100	7	842	100
8	479	100	8	671	100	8	886	100
9	501	100	9	703	100	9	921	100

Ciclo 7 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	32	11870
2	393	100
3	556	100
4	689	100
5	796	100
6	880	100
7	947	100
8	998	100
9	1038	100

Tabla 4-12 Valor de las deformaciones y módulos de los últimos cuatro ciclos de carga para el caso 1.

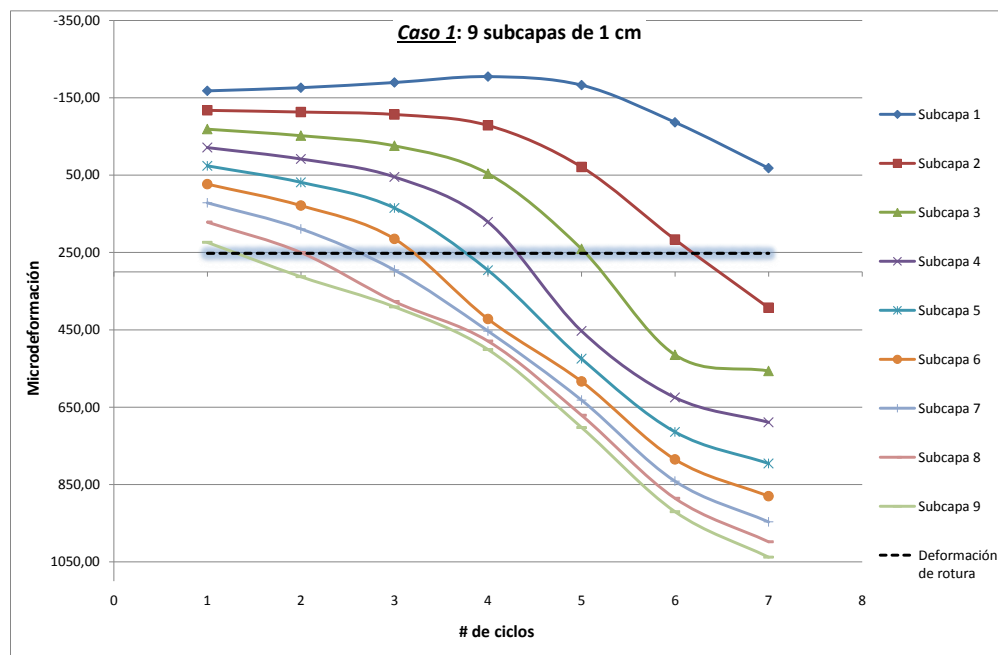


Figura 4-9 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para cada ciclo de carga hasta el fallo en el caso 1.

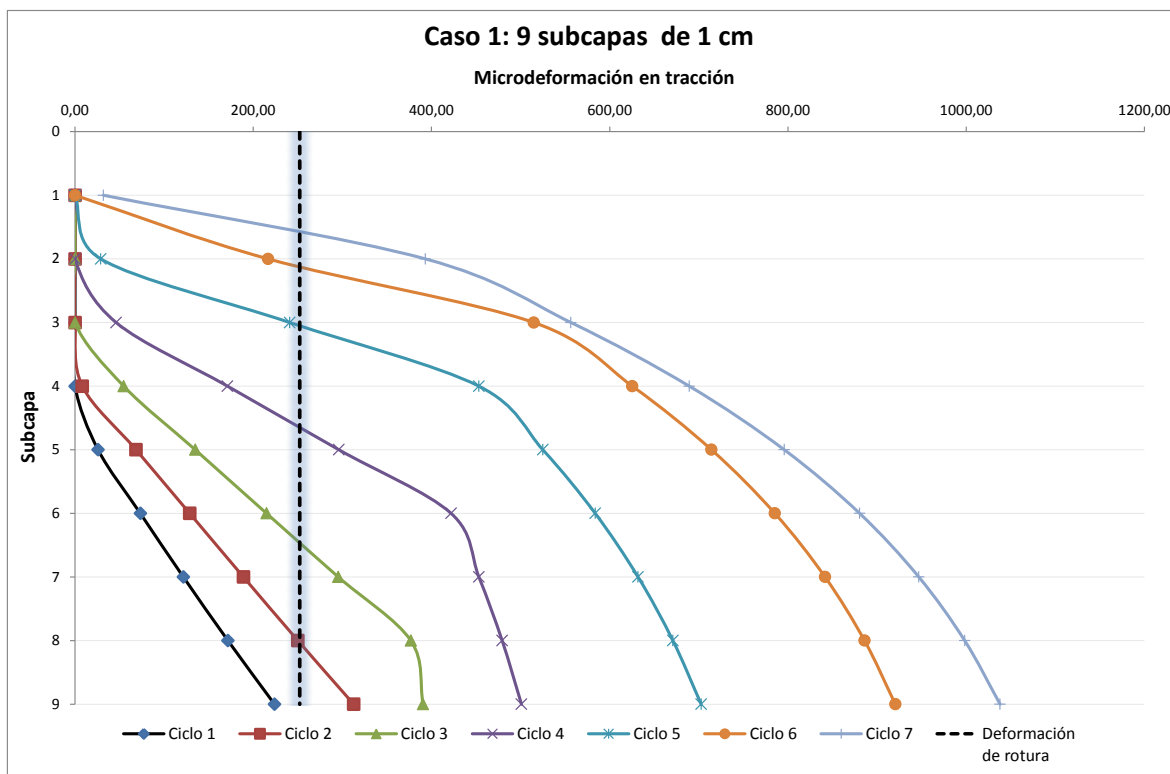


Figura 4-10 Propagación de la fisura en cada ciclo de carga hasta el fallo para el caso 1.

La propagación de la fisura se puede ver de manera gráfica en la Figura 4-10. En ella se observa la evolución de la misma con cada ciclo de carga en todo el espesor del espécimen hasta que se alcanza la deformación crítica. Se muestra como inicialmente la fisura se va propagando muy rápidamente, hasta alcanzar casi la mitad del espécimen. Después de este punto, estas no aumentan tan abruptamente como en la primera mitad, pues para las subcapas de arriba se siguen considerando tensiones de compresión, debido a la manera en que distribuye las tensiones el BOSAR 3.0. Sin embargo, se puede considerar que la totalidad del espécimen ha fallado cuando más de la mitad de las subcapas han sido eliminadas. Es más, incluso se puede considerar que el mismo falla instantáneamente (con las condiciones del estudio), pues 7 ciclos de carga es una cantidad muy pequeña de ciclos. Aun así, el estudio de este espesor de capa sirve para ver cómo funciona el proceso iterativo y describir de manera sencilla la propagación de la fisura.

4.4.3 CASO 2: ESPESOR TOTAL DE LA CAPA DE MEZCLA DE BITUMINOSA DE 13.5 CMS.

4.4.3.1 Resultados y análisis para 9 subcapas de 1.5cms

Se discretizan los 13.5 cms de mezcla bituminosa en 9 subcapas de 1.5 cms cada una. La configuración inicial donde se consideran los valores del módulo de rigidez inicial para cada subcapa y los coeficientes de Poisson (que son constantes durante todo el proceso) quedaría tal cual se observa en la Figura 4-11. Todas las 9 subcapas de mezcla bituminosa se consideran activas pues ninguna ha llegado a la deformación crítica, es decir, todas trabajarán en el modelo.

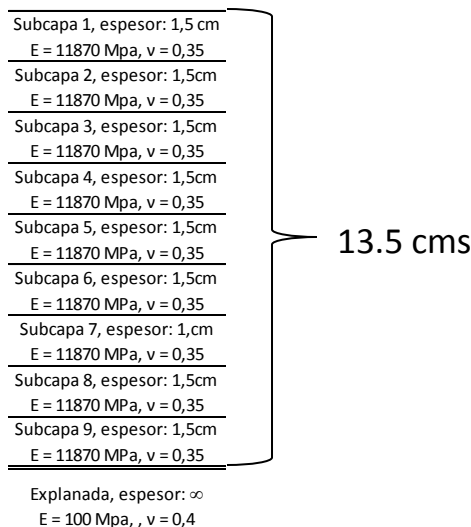


Figura 4-11 Configuración inicial caso 2.

Al igual que en el caso anterior, a partir de esta configuración de subcapas, se comienza con el proceso iterativo utilizando el programa BISAR 3.0. De esta manera, después de los primeros tres ciclos de carga se tienen los estados de deformación y de módulo de rigidez que se muestran en la Tabla 4-13.

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,02E+02	11870,00	1	-1,06E+02	11870,00	1	-1,07E+02	11870,00
2	-6,96E+01	11870,00	2	-6,95E+01	11870,00	2	-6,91E+01	11870,00
3	-3,89E+01	11870,00	3	-3,50E+01	11870,00	3	-3,30E+01	11870,00
4	-9,64E+00	11870,00	4	-1,81E+00	11870,00	4	1,96E+00	11870,00
5	1,90E+01	11870,00	5	3,09E+01	11870,00	5	3,65E+01	11870,00
6	4,78E+01	11590,99	6	6,40E+01	10934,38	6	7,09E+01	10651,52
7	7,76E+01	10382,46	7	9,75E+01	9574,88	7	1,06E+02	9236,42
8	1,09E+02	9098,45	8	1,32E+02	8156,94	8	1,42E+02	7767,36
9	1,44E+02	7706,48	9	1,70E+02	6639,18	9	1,81E+02	6192,77

Tabla 4-13 Valor de las deformaciones y módulos de los primeros tres ciclos de carga para el caso 2.

A diferencia del caso 1, ahora las deformaciones producidas en las subcapas inferiores no están tan cerca del valor de deformación crítica y de hecho el módulo de rigidez de la subcapa 9 al finalizar el tercer ciclo de carga es mayor al 50% del módulo inicial. Así mismo, después de finalizado el tercer ciclo de carga, apenas 4 subcapas (las inferiores) han superado la deformación mínima ϵ_{\min} y por tanto han visto disminuido sus módulos de rigidez. Todo esto era lógico de esperar por el aumento en el espesor de la capa de mezcla.

Ahora, continuando con la aplicación de carga se llega a un punto en que las deformaciones no varían más en el programa BISAR 3.0 y por tanto los módulos se quedan estables. En este momento se podría decir que los valores de deformación convergen a este punto. Este momento se da entre los ciclos de carga 11, 12 y 13 (Tabla 4-14) y se produce debido a que al introducir los valores de los módulos en el programa BISAR 3.0, este inmediatamente los redondea hasta tener

tres cifras de precisión. El formato de entrada de datos del módulo en el programa es en formato científico, con dos decimales de precisión. O sea, para el caso del valor del módulo inicial, el programa BISAR 3.0 lo redondea y expresa de esta manera: 1.19×10^4 MPa. Por lo tanto, si el valor de todos los módulos nuevos calculados en cada ciclo de carga no cambia al redondearse su tercer dígito, pues entonces las deformaciones no variarán. Ahora bien, debido a que el proceso iterativo es manual, sería imposible poderlo finalizar si no se crea un criterio de convergencia de la deformaciones, pues las mismas varían muy poco. Para facilitar las cosas entonces, el criterio de convergencia utilizado en este caso fue tomado en base a la limitante del programa, y así se solucionaban los dos problemas con una sola acción.

Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.								
Ciclo 11 para 9 subcapas			Ciclo 12 para 9 subcapas			Ciclo 13 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00
2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00
3	-3,11E+01	11870,00	3	-3,11E+01	11870,00	3	-3,11E+01	11870,00
4	5,39E+00	11870,00	4	5,40E+00	11870,00	4	5,40E+00	11870,00
5	4,15E+01	11844,22	5	4,16E+01	11843,01	5	4,16E+01	11843,01
6	7,73E+01	10395,04	6	7,73E+01	10393,42	6	7,73E+01	10393,42
7	1,13E+02	8932,06	7	1,13E+02	8928,00	7	1,13E+02	8928,00
8	1,51E+02	7414,29	8	1,51E+02	7410,23	8	1,51E+02	7410,23
9	1,91E+02	5791,01	9	1,91E+02	5791,01	9	1,91E+02	5791,01

Tabla 4-14 Valor de las deformaciones y módulos de los ciclos de carga 11, 12, 13 para el caso 2.

En las Figura 4-12 se puede observar como varía la deformación en cada subcapa con los ciclos de aplicación de carga y se nota como efectivamente como las deformaciones tienden a estabilizarse y la pendiente de la gráfica en todas las subcapas va disminuyendo hasta volverse prácticamente cero (asíntota). Esto permite ver de manera gráfica la convergencia de las deformaciones y por tanto de los módulos.

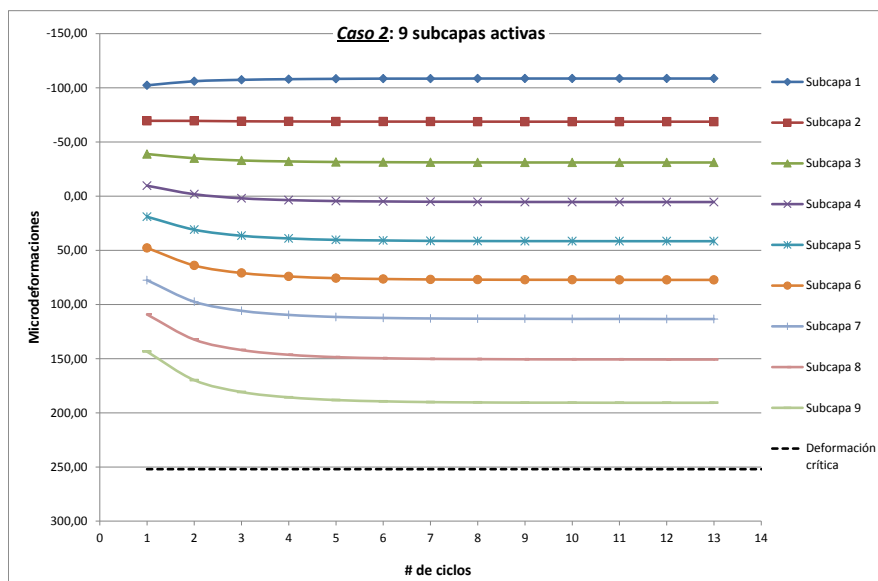


Figura 4-12 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para los primeros 13 ciclos de carga en el caso 2

En la Figura 4-13 se describe como se propagan las deformaciones y por tanto las fisuras en cada subcapa en cada ciclo de carga (hasta el ciclo 9, pues después casi no varían). Es claro que con cada ciclo de carga, la diferencia entre las deformaciones va disminuyendo, corroborando la convergencia de las mismas.

Así mismo se puede ver como el programa BISAR 3.0 calcula las deformaciones en todo el espesor de la capa considerando su variación de manera lineal en todas las subcapas, al menos antes que fallen las subcapas.

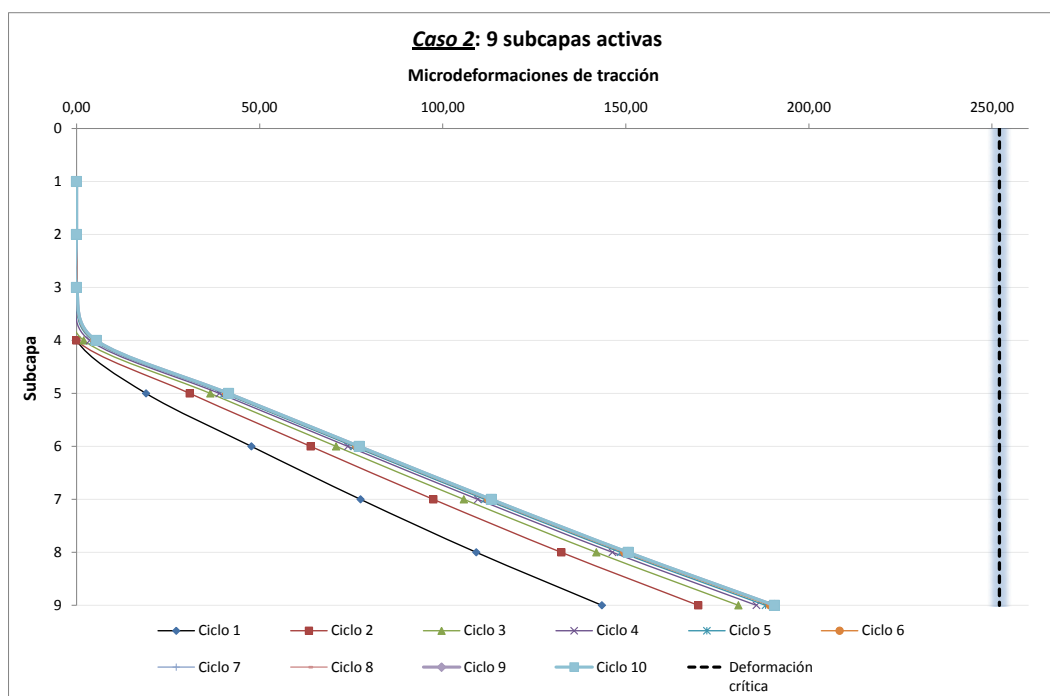


Figura 4-13 Propagación de la fisura en los primeros diez ciclos de carga para el caso 2.

Según el proceso iterativo, cuando se llega al punto en que los valores de las deformaciones en cada subcapa convergen, se hace uso de la ley de fatiga, de manera que se predice cuánto tiempo podrá llegar a resistir hasta el fallo la última subcapa activa (en este caso la número 9). Entonces, introduciendo la deformación de la subcapa 9 obtenida al converger en el ciclo 13 (último ciclo corrido en el BISAR 3.0), se obtendría el número de ciclos en que fallaría esta capa (Tabla). Según la simbología propuesta en el proceso iterativo N^i es el número de ciclos de fallo de la subcapa i al utilizarse la ley de fatiga.

	Deformación	N^9
Subcapa 9	190,60	1,48E+05

Tabla 4-15 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 9 en el caso 2.

Por lo tanto la subcapa 9 resistiría aproximadamente 148000 ciclos de carga hasta fallar. Vale recordar que este proceso es una aproximación inicial y que el uso de la ley de fatiga se ve matizado por el criterio de fallo que utiliza como ya se comentó en los resultados del ensayo a

flexotracción y que se ahondará más aun en las conclusiones. Sin embargo por ser una aproximación inicial y la limitante de ser un procedimiento iterativo manual, la ley de fatiga es una herramienta que simplifica mucho el proceso.

Entonces, después de obtener los ciclos de fallo de la subcapa 9, se eliminaría esta del modelo y se continuaría con el proceso iterativo, solamente que ahora habrán únicamente 8 subcapas de 1.5 cms trabajando, es decir el espesor total de la capa de mezcla bituminosa ahora es de 12 cms. Al continuar con el proceso iterativo, se le asignan a las subcapas restantes los módulos del último ciclo de carga del BISAR 3.0, o sea los del ciclo 13.

4.4.3.2 Resultados y análisis para 8 subcapas de 1.5 cms

Después de eliminar la subcapa 9 del modelo, se retoma el proceso de aplicación de cargas en el BISAR 3.0.

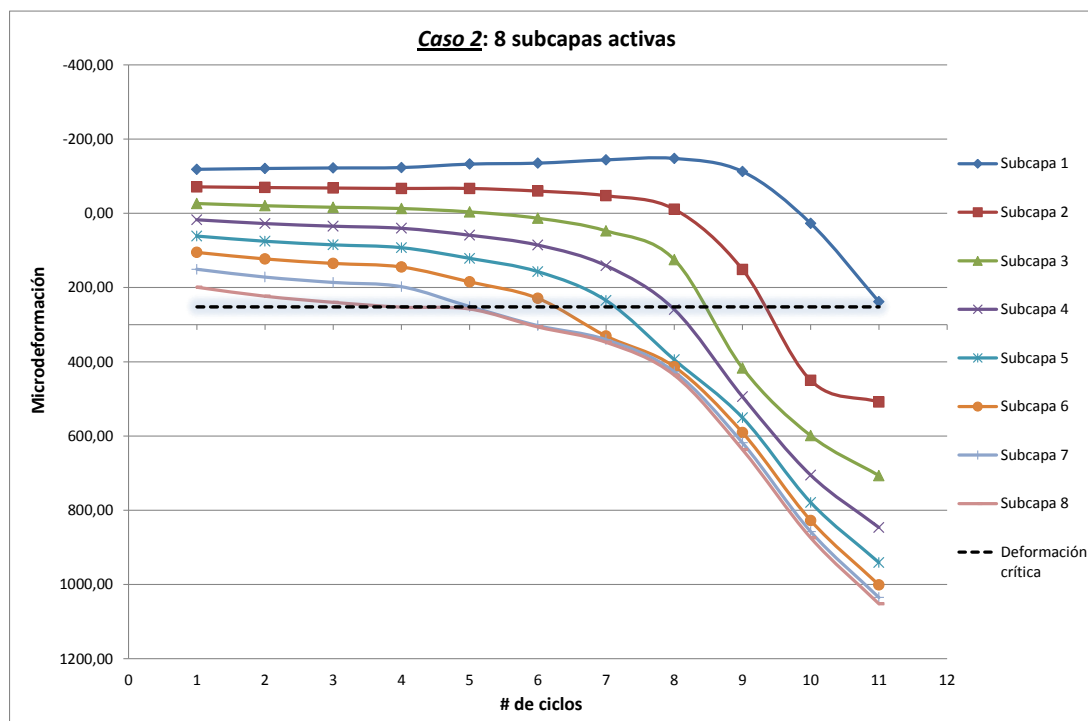


Figura 4-14 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para los 11 ciclos de la segunda serie de carga en el BISAR 3.0 en el caso 2.

La evolución de las deformaciones (Figura 4-14) en este caso, se da de manera relativamente lenta al inicio y luego apenas falla la subcapa 8, acelera hasta el fallo de la totalidad de la capa de pavimento principalmente por dos razones: la disminución en el espesor total de la capa de mezcla y además, debido a la disminución de los módulos en las subcapas 6, 7, 8 al reiniciar de nuevo el proceso iterativo, pues estas subcapas ya presentaban deformaciones mayores que la deformación mínima.

De la misma manera se puede ver la propagación de la fisura (Figura 4-15) ahora que solo trabajan 8 subcapas y que varias de ellas ya presentan deformaciones de los ciclos de carga cuando habían

9 subcapas. En este caso la fisura se va agrandando poco a poco hasta que falla la subcapa 8. De ahí en adelante, el fallo de subcapas es progresivo y rápido.

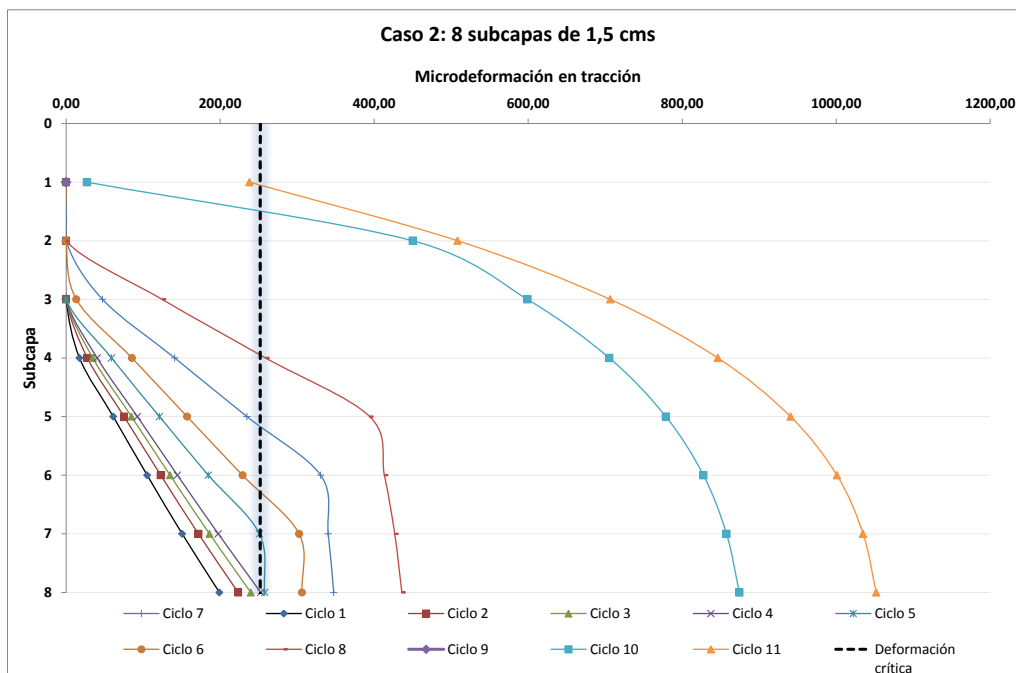


Figura 4-15 Propagación de la fisura para los 11 ciclos de la segunda serie de carga en el BISAR 3.0 para el caso 2.

4.4.3.3 Números de ciclos de carga totales para el caso 2 (13.5 cms)

Cuando se da el fallo de la totalidad de la capa, se termina el proceso iterativo. En este caso la capa tenía un espesor de 13.5 cms y el progreso de las fisuras y deformaciones se dividió en dos partes. La primera parte es aquella en la que trabajan las 9 subcapas y la evolución de las deformaciones es tan lenta que llegan a converger. En este caso se utilizó la ley de fatiga para eliminar la subcapa 9 y poder seguir, con el proceso. Luego, ya con 8 subcapas trabajando, el fallo fue casi inmediato, por lo que se podría decir que el número total de ciclos que resiste la mezcla es el correspondiente a la primera parte en que trabajan las 9 subcapas, pues los otros 13 ciclos de la primera parte y los 11 de la segunda son insignificantes en relación a los obtenidos por la ley de fatiga en la subcapa 9.

	Caso 2
N_{total}	1,48E+05

Tabla 4-16 Total de ciclos de carga para llegar al fallo en el caso 2.

De hecho, si se tomara en cuenta las fases de evolución del daño por fatiga descritas por Di Benedetto [28], se podría decir que la fase dos de la fatiga (donde se produce casi todo el daño) ocurre durante estos 148000 ciclos de carga, pues después de ellos hay un súbito fallo de la mezcla. Probablemente el fallo empiece al final de estos 148000 ciclos, pero eso no se puede medir en este estudio ni es lo que se busca.

4.4.4 **CASO 3: ESPESOR TOTAL DE LA CAPA DE MEZCLA DE BITUMINOSA DE 18 CMS**

Siguiendo la misma metodología de los dos casos anteriores, para este caso se discretizó la capa de mezcla bituminosa en 9 subcapas de 2 cms cada una. La configuración inicial se puede observar en la figura ().

Subcapa 1, espesor: 2cm	}	18 cms	
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 2, espesor: 2cm			
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 3, espesor: 2cm			
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 4, espesor: 2cm			
E = 11870 Mpa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 5, espesor: 2cm			
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 6, espesor: 2cm	}	18 cms	
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 7, espesor: 2cm			
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 8, espesor: 2cm			
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$			
Subcapa 9, espesor: 2cm			
E = 11870 MPa, $\nu = 0,35$			
Explanada, espesor: ∞			
E = 100 Mpa, $\nu = 0,4$			

Figura 4-16 Configuración inicial caso 3.

En este caso debido al mayor espesor de la capa de mezcla bituminosa, se hizo necesario durante el proceso iterativo hacer uso tres veces de la ley de fatiga para poder eliminar las tres subcapas inferiores. Es decir, que durante las tres primeras series de ciclos de carga en el BISAR 3.0 se llegó a la convergencia de deformaciones y por tanto se utilizó la ley de fatiga para ser capaz de averiguar en cuantos ciclos de carga fallarían las subcapas 9, 8 y 7 en base al orden en que se eliminan del modelo respectivamente.

Como la metodología es la misma utilizada en el caso 2, solamente que con mas series de ciclos de carga en el BISAR 3.0 (después de utilizar la ley de fatiga inicia una serie nueva de ciclos de carga), a continuación se resumen los resultados según se van eliminando las subcapas

4.4.4.1 **Resultados para 9 subcapas de 2 cms de espesor cada una.**

De la misma manera que en los casos anteriores, después del primer ciclo de carga se generan unas deformaciones en cada subcapa y en base a estas se recalculan los nuevos módulos para cada una de ellas.

Para este caso de espesor de 18 cms, cuando las 9 subcapas están trabajando, es decir ninguna ha fallado, se puede ver claramente que las tensiones/deformaciones generadas en las subcapas son bastante pequeñas, y por eso las mismas convergen en el ciclo 6 de la primera serie de ciclos en el BISAR 3.0.

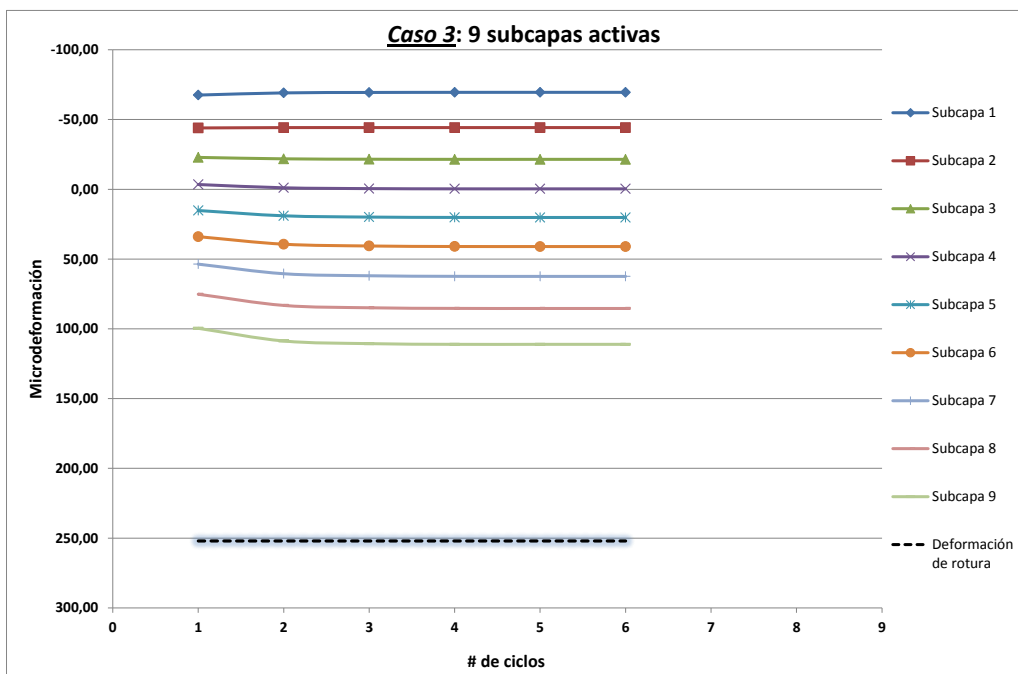


Figura 4-17 Evolución de las deformaciones en cada subcapa para 6 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 9 subcapas activas.

	Microdeformación	Nº
Subcapa 9	111,10	6,26E+06

Tabla 4-17 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 9 en el caso 3.

Cuando se aplica la ley de fatiga a la deformación de la subcapa 9, se obtiene que para que la misma falle, se requerirían más de seis millones ciclos de carga. Este valor tan alto es porque la deformación inducida a la fibra inferior es de apenas 111 microdeformaciones, cuyo valor es muy cercano al del endurance limit calculado en el ensayo EBADE.

4.4.4.2 Resultados para 8 subcapas de 2 cms de espesor cada una

Después de eliminada la subcapa 9, las deformaciones comienzan a aumentar en el resto de las subcapas, sin embargo, el espesor total de la capa sigue siendo relativamente importante, por lo que las deformaciones y módulos casi no varían como se puede apreciar en la Figura 4-18 Propagación de las fisuras en cada subcapa para 7 ciclos. Se recuerda que las variaciones de los módulos dependen del estado de deformaciones después del ciclo de carga, y que las deformaciones dependen de los módulos nuevos recalculados.

De esta manera se vuelve a llegar a la convergencia de deformaciones y es necesario nuevamente utilizar la ley de fatiga para llevar al fallo la subcapa 8. Se observa que la deformación de la subcapa 8 luego de 7 ciclos de carga en esta segunda serie de aplicación de carga en el BISAR 3.0 es de 137 microdeformaciones, no muy superior al de la deformación de la subcapa 9

anteriormente, pero si lo suficiente para reducir en casi 5 millones el número de ciclos hasta el fallo de esta subcapa en relación a la subcapa 9, pues según la ley de fatiga a la subcapa 8 le queda una vida de casi un millón y medio de ciclos de carga (tabla 4-18).

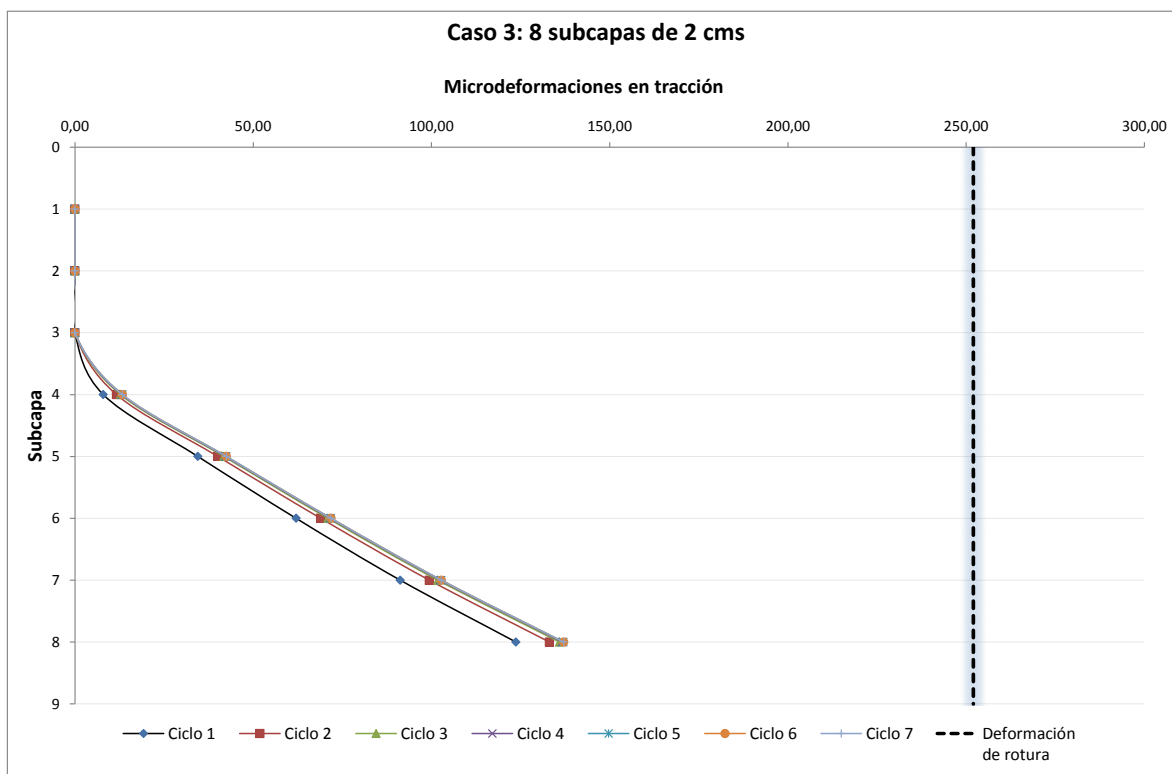


Figura 4-18 Propagación de las fisuras en cada subcapa para 7 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 8 subcapas activas.

	Deformación	N ⁸
Subcapa 8	137,10	1,45E+06

Tabla 4-18 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 8 en el caso 3.

4.4.4.3 Resultados para 7 subcapas de 2 cms de espesor cada una

En la tabla 4-19 se describe la variación en los valores de las deformaciones y consecuentemente del módulo en cada ciclo de carga de esta nueva serie de ciclos en la que ya se ha eliminado la subcapa 8 (es decir, hay dos subcapas menos en el modelo, la 8 y la 9). Esta reducción en el espesor activo (subcapas que no han fallado) de la capa de mezcla bituminosa conlleva a que la deformación varíe esta vez con más intensidad en relación a cuando habían 8 subcapas, sin embargo no aumenta lo suficiente para llegar a la deformación crítica en la subcapa 7. De esta manera, nuevamente se llega a un punto de convergencia en los valores de deformaciones, y por lo tanto se calculan los ciclos de carga con los que fallaría la subcapa 7 utilizando la ley de fatiga y considerando la deformación a la que ha convergido (Tabla 4-20).

Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 8 para 7 subcapas			Ciclo 9 para 7 subcapas			Ciclo 10 para 7 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-9,22E+01	11870,00	1	-9,22E+01	11870,00	1	-9,22E+01	11870,00
2	-4,48E+01	11870,00	2	-4,48E+01	11870,00	2	-4,48E+01	11870,00
3	-1,44E-01	11870,00	3	-1,13E-01	11870,00	3	-1,13E-01	11870,00
4	4,37E+01	11756,16	4	4,38E+01	11753,73	4	4,38E+01	11753,73
5	8,69E+01	10002,21	5	8,70E+01	9998,96	5	8,70E+01	9998,96
6	1,32E+02	8193,47	6	1,32E+02	8189,41	6	1,32E+02	8189,41
7	1,80E+02	6241,47	7	1,80E+02	6237,41	7	1,80E+02	6237,41

Tabla 4-19 Valor de las deformaciones y módulos de los ciclos de carga 7, 8, 9 para el caso 3 con 7 subcapas activas.

	Deformación	N^7
Subcapa 7	179,70	2,22E+05

Tabla 4-20 Total de ciclos de carga para llegar al fallo por fatiga de la subcapa 7 en el caso 3.

4.4.4.4 Resultados para 6 subcapas de 2 cms de espesor cada una.

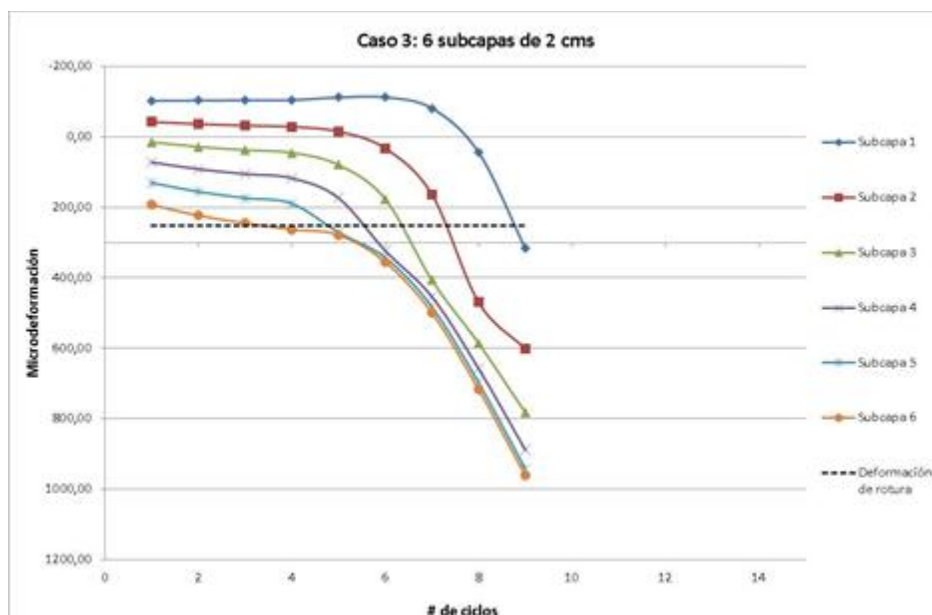


Figura 4-19 Evolución de las deformaciones en cada subcapa hasta el fallo en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 6 subcapas activas.

Después de eliminar la subcapa 7, únicamente quedarían trabajando activamente en la mezcla 6 subcapas de 2 cms, osea aproximadamente 12 cms de mezcla. Adicionalmente estas subcapas activas, presentaban deformaciones que reducían el valor de sus módulos antes de iniciar esta nueva serie de ciclos de carga.

Por eso, no es de extrañar que es precisamente en esta serie de ciclos que la capa de mezcla inicia su proceso acelerado de fallo total. El fallo se produce en tan solo 9 nuevos ciclos de carga (Figura 4-19/4-20), acelerándose en el momento en que falla la subcapa 6 (cuarto ciclo de carga).

Entonces, en este momento se detiene el proceso iterativo, pues la mezcla ha fallado en su totalidad, según nuestro criterio de falla (todas las subcapas han superado la deformación crítica).

Es importante hacer notar que las deformaciones que se computan en todos los casos después de que una subcapa ha sobrepasado a la deformación crítica, son las que se dan cuando la subcapa fallada presenta un módulo de 100 MPa, y debido a esto es que se dan estas curvas después de la deformación crítica: En realidad, la parte que interesa a este estudio es la manera en que se propaga la fisura antes del fallo en cada subcapa.

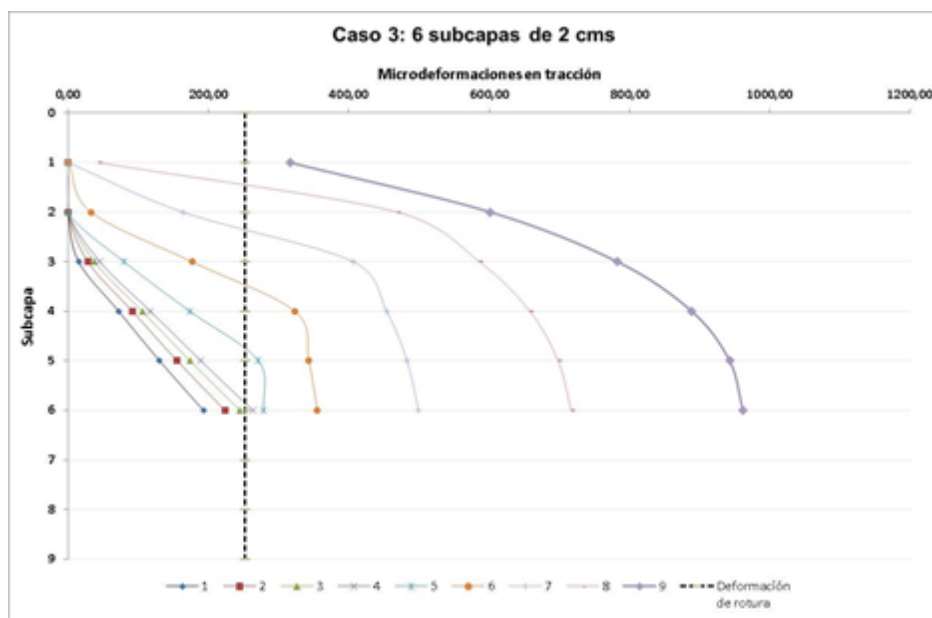


Figura 4-20 Propagación de las fisuras en cada subcapa para 9 ciclos de carga en el BISAR 3.0 en el caso 3 con 6 subcapas activas.

4.4.4.5 Número de ciclos de carga totales para el caso 3 (18 cms)

Una vez se ha terminado el proceso iterativo y ha fallado la capa de pavimento bituminoso, se calculan los ciclos de carga totales que la misma resistió, según las consideraciones del método.

En este caso, se utilizaron tres veces las leyes de fatiga y se hicieron un total de 33 ciclos de carga en el BISAR 3.0, cifra que es insignificante en relación a la cantidad de ciclos totales obtenidos por la ley de fatiga para llevar al fallo a las subcapas 9, 8 y 7 respectivamente. De la Tabla 4-21 se puede ver que el total de ciclos de carga que resistiría la mezcla con 18 cms de espesor es de aproximadamente 8 millones.

<i>Caso 3</i>	
N^9	6,26E+06
N^8	1,45E+06
N^7	2,22E+05
N_{total}	7,93E+06

Tabla 4-21 Total de ciclos de carga para llegar al fallo de toda la capa en el caso 3.

4.4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS 3 CASOS DE ESTUDIO

Si se analiza los resultados de los tres casos de estudio, se observa que para el caso 1 la falla de la capa fue casi instantánea. Para el caso 2, fueron necesarios dos series de ciclos de carga en el BISAR 3.0, osea que se tuvo que utilizar la ley de fatiga una vez para eliminar una subcapa. Mientras que para el caso 3, se hicieron 4 series de ciclos de carga, y por lo tanto, la totalidad de la capa no falló sino hasta que se eliminaron tres subcapas de ella.

Lo interesante del comportamiento de los casos 2 y 3, es que la serie de carga en donde se dio el fallo rápido en la mezcla, fue cuando la capa de mezcla presentaba 12 cms de espesor total trabajando (o sea no se cuentan las subcapas eliminadas). Esta coincidencia sugiere que para la configuración en la que se montó este estudio, el punto crítico de dimensión de capa total es cercano a los 12 cms. De hecho, específicamente en base a los resultados del caso 2, el espesor crítico debe estar en un rango que varíe entre los 12 y 13.5 cms, que era precisamente el espesor utilizado en este caso. Es decir, para capas de mezcla con menores dimensiones a los 12 cms esta probablemente fallará casi instantáneamente, mientras que aquellas capas por encima de los 13.5 cms, resistirá al menos la eliminación de una de sus capas. Esta afirmación es matizada por muchos supuestos (aquellos con los que se hizo el estudio), además que cuando en los casos 2 y 3 se llegaba al espesor de capa de 12 cms, ya las subcapas que quedaban trabajando tenían deformaciones adquiridas de los ciclos de carga anteriores, por lo que la el número de 12 cms es un aproximado.

El caso 1 no aporta el tipo de información en cuanto al espesor de capa mínimo que si dan el caso 2 y 3, sin embargo su estudio facilita observar la metodología empleada y como se propaga la fisura en relación al cambio de sus deformaciones y módulos en cada ciclo, y sobre todo la relación de la fisuración con la deformación crítica.

Por otro lado, con los datos obtenidos en cada caso en relación a los ciclos de carga totales que soporta el pavimento, se generó una gráfica que relaciones los espesores con el número de ciclos de carga y se le hizo un ajuste a los datos, como se observa en la Figura 4-21.

A partir de la curva de ajuste se obtiene la ecuación 4.4 que se podría utilizar para predecir el número de ciclos de carga en relación al espesor del pavimento, eso sí, para la configuración estructural de este estudio (o sea, capa de mezcla bituminosa y explanada con sus respectivos valores de módulos iniciales) y por supuesto siendo una aproximación inicial con muy pocos datos para que sea totalmente fiable.

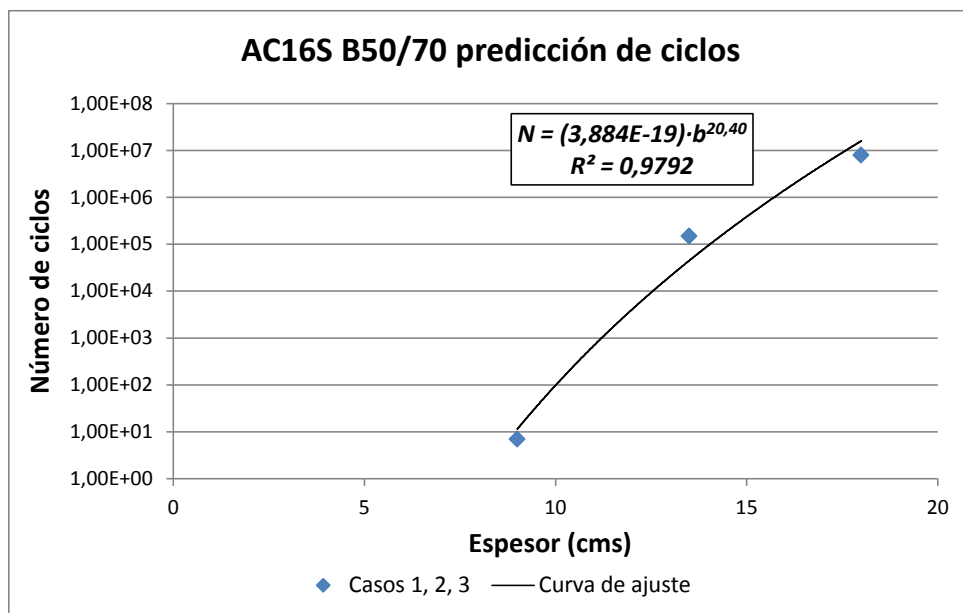


Figura 4-21 Curva de ajuste entre número de ciclos de carga al fallo y espesor de la capa.

$$N = (3,884 \times 10^{-19}) b^{20,40} \quad (4.4)$$

Donde N es el número de ciclos de la predicción y b es el espesor de la capa en centímetros.

La curva tiene un coeficiente R^2 alto, sin embargo son muy pocos datos para decir que la misma sea concluyente. Simplemente se hace la observación que podría ser útil y que seguramente con más espesores de capas ensayados arrojaría mejores resultados.

Ahora, se puede considerar que en el rango de 12-13.5 cms de espesor debe haber un espesor mínimo en el que durante el proceso iterativo se deberá eliminar la última subcapa utilizando la ley de fatiga, y que el valor de deformación de esta subcapa estará muy cerca de la deformación crítica. Al haberse eliminado esta subcapa (asumiendo 9 subcapas de igual espesor), la muestra fallará casi de manera instantánea en la siguiente serie de ciclos de carga, pues su espesor no será el suficiente según se desprende de los resultados de los casos 2 y 3.

Teniendo en consideración lo anterior, se podría utilizar la ley de fatiga y un valor de deformación apenas menor que la crítica, para obtener un estimado de ciclos de carga en los que fallaría la subcapa inferior en una muestra con dimensiones entre 12-13.5 cms. A esta deformación se le llamará ϵ_q al número de ciclos totales asociados a ella N_q .

	Microdeformación	Número de ciclos (ley de fatiga)
ϵ_{crit}	252,00	2,12E+04
ϵ_q	251,00	2,18E+04

Tabla 4-22 Número de ciclos obtenidos con la ley de fatiga en relación a los valores de la deformación crítica y ϵ_q .

Entonces, con el valor N_q (Tabla 4-22) que se obtuvo por medio de la ley de fatiga y utilizando la ecuación de predicción de ciclos (ecuación 4.4), se podría obtener el valor del espesor mínimo para el cual la capa de pavimento no falle de manera “instantánea”; claro está, tomando en cuenta las condiciones de este estudio.

<i>Número de ciclos (ϵ_q)</i>	<i>Espesor mínimo de capa (cms)</i>
2,18E+04	13,03

Tabla 4-23 Espesor mínimo para que la capa de mezcla no falle de manera instantánea.

Se puede ver en la Tabla 4-23, que el espesor mínimo efectivamente está en el rango de 12-13.5 cms. El valor de este parámetro podría refinarse mucho más, pues la ecuación de predicción de ciclos apenas considera tres puntos, por lo que con más puntos, la misma sería más precisa. Así mismo, lo ideal sería utilizar en el proceso iterativo espesores mayores que el espesor mínimo, pues de esta manera se tendrán que utilizar las leyes de fatiga y se generarán puntos que sean correlacionables, es decir, habría que eliminar de la curva de ajuste los espesores donde la capa falle de manera casi instantánea, pues estos en realidad únicamente aportan la información de que espesores fallan rápidamente.

4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL MÉTODO DE DISEÑO CLÁSICO Y EL PROPUESTO EN ESTE ESTUDIO.

4.5.1 INTRODUCCIÓN

El método de diseño clásico de firmes flexibles considera principalmente dos mecanismos de daño en su estructura: deformaciones plásticas producidas por tensiones verticales en la parte superior de la explanada, y la fisuración por fatiga de la capa de pavimento bituminoso producida por deformaciones tangenciales de tracción en la fibra inferior de esta.

Para encontrar las deformaciones que se producen en un firme, se modela su estructura en un programa computacional de solución de sistemas multicapas, introduciendo los datos de espesores de las diferentes capas que componen el firme (explanada, base, subbase, capas intermedias, capas de rodadura, etc). A cada capa se le asignan valores de módulo de rigidez y coeficiente de Poisson.

Una vez modelada la estructura del firme, se introducen las cargas que se van a aplicar al mismo y se calculan las deformaciones y tensiones en distintos puntos de su espesor (generalmente en las interfaces entre capas).

Para calcular la resistencia a la fatiga de la capa de mezcla bituminosa, es necesario introducir el valor de la deformación tangencial producida en su fibra inferior en una ley de fatiga, a partir de la cual se obtienen un número de ciclos de carga tipo (mismo tipo de carga que se le aplicó en el programa computacional) que la mezcla resistiría.

A continuación se presentan los valores de los ciclos de carga que resistirían tres capas de pavimento bituminoso con dimensiones de 9 cms, 13,5 cms y 18 cms respectivamente, apoyadas únicamente sobre una explanada de 100 MPa de módulo de rigidez.

4.5.2 RESULTADOS POR EL MÉTODO CLÁSICO

En la Tabla 4-24 se resumen los datos de entrada en el programa, y en la figura 4-22 se dan las configuraciones iniciales de la estructura para cada espesor de pavimento.

	<i>Mezcla bituminosa</i>	<i>Explanada</i>
<i>Módulo E (MPa)</i>	11870	100
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0,35	0,4
<i>Carga total 64KN (2 ruedas)</i>		

Tabla 4-24 Datos de entrada al BISAR 3.0 para la predicción de ciclos por el método clásico.

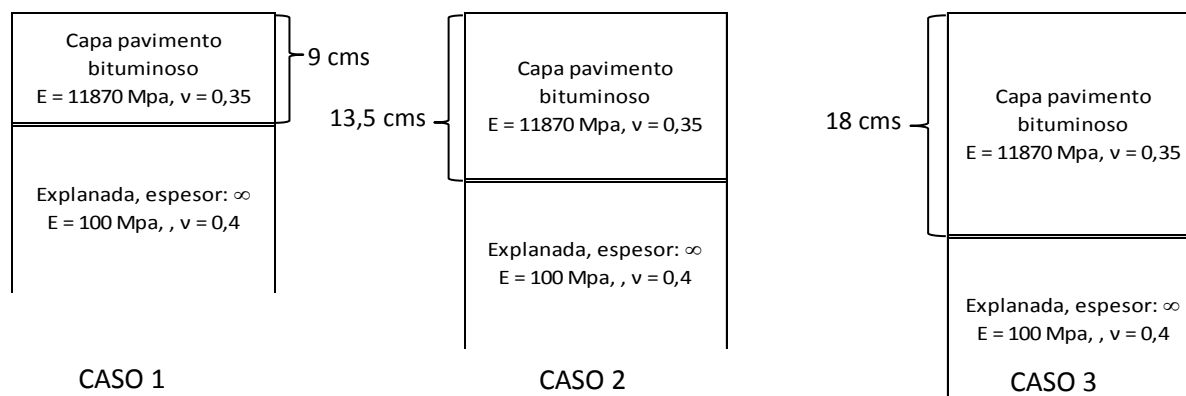


Figura 4-22 Configuración inicial para los 3 casos siguiendo el método clásico

El módulo inicial a utilizar nuevamente es el del ensayo EBADE, pues es necesario para poder comparar los resultados del método clásico y el método de este estudio para propagación de fisuras.

En base a estas configuraciones y utilizando la ley de fatiga que ya se había obtenido se tiene los resultados de la Tabla 4-25.

	<i>Microdeformación</i>	<i>N (ley de fatiga)</i>
9 cms	224	4,81E+04
13,5 cms	144	1,03E+06
18 cms	99,6	1,34E+07

Tabla 4-25 Número de ciclos totales para los tres casos por el método clásico.

4.5.3 COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CLÁSICO Y EL PROPUESTO EN ESTE ESTUDIO

Tomando en cuenta que el caso 1 es el que presenta un espesor de 9 cms, el caso 2 el de 13.5 cms y el caso 3 el de 18 cms, se pueden ver los resultados del total de ciclos para cada caso y para cada método en la Tabla 4-26. El método de este trabajo es el método iterativo de propagación de fisuras.

	<i>Método Clásico</i>	<i>Método Iterativo</i>	<i>Diferencia</i>
<i>Caso 1</i>	4,81E+04	7,00E+00	4,81E+04
<i>Caso 2</i>	1,03E+06	1,48E+05	8,86E+05
<i>Caso 3</i>	1,34E+07	7,93E+06	5,43E+06

Tabla 4-26 Número de ciclos totales para los tres casos por los dos métodos.

Claramente se observa una gran diferencia en los valores absolutos del número de ciclos entre uno y otro. En la metodología de cada uno existe una gran diferencia de concepto entre uno y otro, pues el método clásico se basa en valorar la resistencia a la fatiga como una característica del material, basándose en ensayos de laboratorio que predicen cómo se comportará el material en relación a una deformación, sin importar que tan deformado se encuentra el mismo en otros puntos. En cambio con el estudio de propagación de fisuras que se propone en este estudio, se relacionan las deformaciones (consecuentemente el módulo) que ocurren en toda la dimensión de la mezcla con el comportamiento a fatiga de la misma. Es decir en la metodología que se propone en este estudio, se toma la base teórica de fatiga del método clásico y se expande al resto del material por medio de una discretización similar a la que se utiliza en el diseño de firmes.

Ahora, que las diferencias sean tan grandes entre uno y otro puede ser por varias razones, entre ellas la diferencia conceptual explicada arriba. Además, la limitante que presenta el programa BISAR 3.0 respecto al número de subcapas que pueden ser discretizadas, pues se comprobó que entre más subcapas existan, mas números de ciclos soporta el espécimen. Ahora, el aumento de número de subcapas tiende a converger a un mismo valor de ciclos totales, por lo que quiere esto decir que con infinito número de subcapas no hay infinito número de ciclos, hay un punto donde ya el valor de los ciclos no aumentará. Esto se pudo comprobar observando los resultados de la Tabla 4-27 y Figura 4-23, donde se ve que el error relativo (k) en el análisis del caso 2, disminuye con el aumento del número de subcapas (n) y tiende a converger.

<i>Caso 2</i>		
<i># de subcapas (n)</i>	<i>Número de ciclos</i>	<i>Error relativo (k)</i>
1	4	99,99%
5	59000	49,14%
7	116000	21,62%
9	148000	-

Tabla 4-27 Convergencia del método utilizado en el estudio con el aumento del número de subcapas en el caso 2.

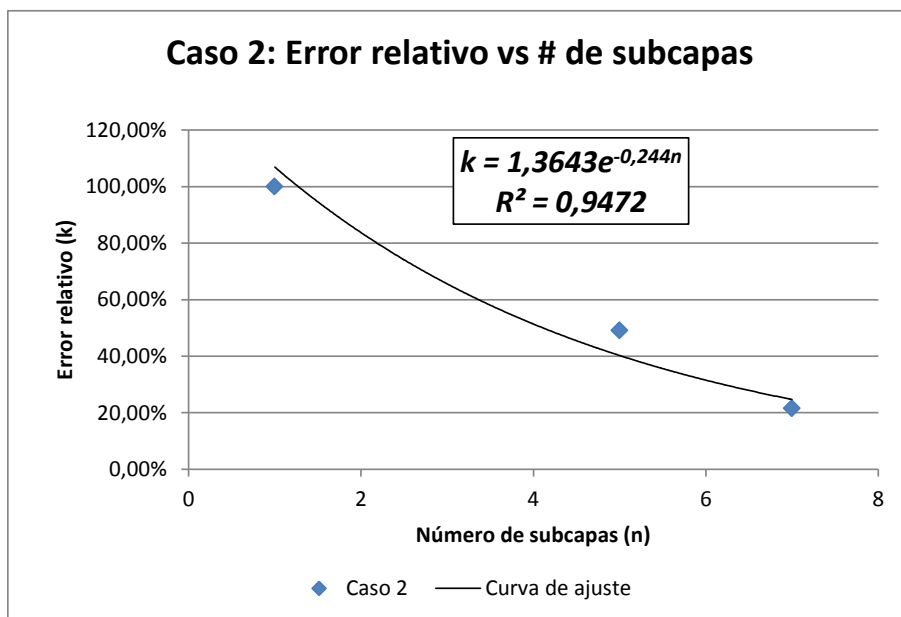


Figura 4-23 Error relativo vs número de subcapas utilizadas en el caso 2.

Otra posible razón es que cuando se aplica la ley de fatiga y se elimina una de las subcapas, se arranca con la siguiente serie de ciclos de carga considerando que las subcapas que quedaron activas no aumentaron su deformación durante el proceso de fatiga de la subcapa eliminada. En este caso, más bien el número total de ciclos de carga disminuiría, pero de igual manera es un posible punto de error.

Por último, los número de ciclos totales del método clásico únicamente se basan en parámetros de un solo ensayo (ley de fatiga del ensayo de flexotracción) en cambio, el método de propagación de fisuras se basa en parámetros del ensayo EBADE (deformación crítica y ecuación Modéf) y en la ley de fatiga del ensayo a flexotracción a 4 puntos y lamentablemente estos ensayos fueron realizados a diferentes frecuencias, lo cual puede acarrear errores importantes a la hora de calcular los ciclos de carga.

Tomando en cuenta todas estas fuentes de error, el verdadero valor de los ciclos de carga se encuentra en un punto intermedio entre los valores de los dos métodos.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

La fisuración es uno de los mecanismos de fallo más comunes y visibles presentes en los firmes de carreteras. En firmes flexibles la fisuración es muchas veces causada por la fatiga de la capa de pavimento bituminoso debido al continuo paso de vehículos (cargas dinámicas) y a los continuos cambios de la temperatura ambiental. De hecho, los métodos de diseño clásicos de firmes consideran este tipo de fallo como el principal parámetro de dimensionamiento de la capa de pavimento bituminoso.

Un adecuado dimensionamiento de un firme conlleva estimar tiempos de vida en servicio reales del mismo y, por tanto, un conocimiento de los tiempos en que debe ser intervenido para rehabilitar sus propiedades estructurales con el menor coste económico posible. Es por eso que en este trabajo se ha decidido estudiar la manera en que se propaga la fisura en las mezclas bituminosas de la capa inferior a la superior del firme debido a la fatiga del material, con la finalidad de llegar a utilizar los resultados de este en estimaciones de tiempos de vida útil de los firmes.

Para cumplir con la finalidad de este trabajo se propuso como objetivo principal la introducción de un nuevo proceso iterativo de diseño de firmes que haga uso de los principios del método multicapas. Este método se utiliza en una única capa de mezcla bituminosa discretizada en varias subcapas. Durante la ejecución del proceso iterativo se utilizan los parámetros de caracterización de la fatiga obtenidos en los ensayos EBADE y de la ley de fatiga obtenida en el ensayo a flexotracción en 4 puntos.

Antes de llevar a cabo este método iterativo, fue necesario realizar previamente los ensayos EBADE y de flexotracción en 4 puntos para obtener los parámetros a utilizar en el proceso. Estos dos ensayos caracterizan la fatiga de manera diferente, por lo que es uno de los objetivos de este trabajo el analizar los resultados de cada uno y sus diferencias para ver cuál describía mejor el comportamiento a la fatiga de las mezclas.

Para cumplir con el desarrollo de los dos objetivos arriba citados, fue necesario cumplir anteriormente con el primer objetivo de esta tesina, que consistía en realizar un profundo análisis del estado actual del conocimiento en esta área, centrándose en los siguientes conceptos:

- Definición, tipologías y patologías de los firmes.
- Dimensionamiento de firmes (diferentes métodos experimentales y analíticos).
- Conceptos generales y tipología de fisuración en firmes de carreteras.
- Definición y concepto de la fisuración por fatiga. Parámetros que la afectan y maneras de determinarla.
- Enfoques de caracterización de la fatiga: enfoque clásico, mecánica de la fractura, mecánica del medio continuo y energía disipada. Se describió cada uno de ellos y las ventajas y desventajas que presentan.

- Ensayos de laboratorio para caracterizar la fatiga. Se describieron los tipos de ensayo utilizados, criterios de fallo usualmente empleados y modos de carga de los ensayos. Se hizo especial énfasis en la descripción de los ensayos EBADE y de flexotracción.

El cumplimiento de este primer objetivo conllevó la búsqueda y lectura de una gran cantidad de artículos científicos que se encuentran debidamente referenciados en la bibliografía y a lo largo del documento.

A continuación se detallarán las conclusiones a partir de los resultados del ensayo EBADE y de flexotracción en 4 puntos y seguidamente de los resultados del proceso iterativo.

5.1 ENSAYO EBADE Y FLEXOTRACCIÓN EN 4 PUNTOS.

Después de analizar los resultados obtenidos por el ensayo EBADE, se pueden llegar a las siguientes conclusiones con respecto este:

- Este ensayo describe y caracteriza la fatiga de mezclas bituminosas de manera adecuada, tanto si utiliza el concepto clásico de variación de las tensiones, como si utiliza el concepto de densidad de energía disipada, mediante el parámetro de deformación crítica.
- Debido a la configuración de su equipo y la metodología de fabricación de las probetas, es un ensayo sencillo y relativamente rápido (alrededor de tres horas por probeta).
- Con este ensayo siempre se llega al fallo de la probeta.
- El parámetro de deformación crítica, se puede obtener tanto de la curva de tensión como de la curva densidad de energía disipada, utilizando el criterio de fallo de un 50% de disminución respecto al valor máximo en cualquiera de estos dos parámetros, sin embargo es mucho más sencillo de obtener con la densidad de energía disipada, debido a que su cambio es mucho más abrupto que el que ocurre con la tensión.
- El endurance limit solamente pudo ser calculado por medio de la curva de densidad de energía disipada, debido a la estabilidad de este parámetro en los primeros ciclos de carga. La curva de tensión no da esta información, pues tarda mucho en estabilizar sus valores en cada escalón de carga.
- A pesar que el endurance limit se pudo calcular, el criterio para su obtención no fue el usualmente utilizado, por lo que sería bueno definir un criterio estándar.
- El parámetro de deformación crítica al ser característico de cada mezcla independientemente de las tensiones aplicadas, resultó ser mucho mejor indicador del momento del fallo en la mezcla que el criterio clásico del 50% de disminución del valor del módulo, pues en todas las curvas (tensión, densidad de energía disipada y módulo), esta

deformación se daba en el mismo punto, en cambio siguiendo el criterio clásico se daba mucho después que el valor del módulo llegara al 50% del inicial.

- Con este ensayo se pudo obtener una ecuación matemática que relaciona estados de deformación con valores del módulo.
- El valor del módulo inicial obtenido tiene una buena confiabilidad.

Después de analizar los resultados obtenidos por el ensayo a flexotracción en 4 puntos, se puede llegar a las siguientes conclusiones con respecto este:

- Es un ensayo que permite caracterizar la fatiga de las mezclas mediante la variación del valor de su módulo.
- Son necesarios al menos 10 ensayos para obtener la Ley de Fatiga.
- Es un ensayo largo, en el que dependiendo de la velocidad de carga puede ser complicado determinar las tres fases del en las curvas de fatiga.
- El criterio de fallo del 50% de disminución del módulo inicial es muchas veces erróneo, porque para amplitudes de deformación bajas, el fallo suele suceder mucho después. Por lo tanto los mismos se deberían basar en el momento en que se da una disminución abrupta del módulo durante el ensayo y no simplemente fijar un porcentaje de caída del mismo.
- La ley de fatiga generada tuvo un coeficiente de correlación de casi el 85% y la misma generó valores entre los rangos de cien mil y un millón de ciclos, como es solicitado por la norma para dar una buena descripción de la resistencia a fatiga de la mezcla.

Comparando los dos ensayos se llega a las siguientes conclusiones:

- El ensayo EBADE es un ensayo mucho más rápido que el de flexotracción.
- Con el ensayo EBADE siempre se llega al fallo de la mezcla, con el de flexotracción no siempre, pues depende de la amplitud de la deformación.
- La deformación crítica es un criterio mucho más característico del fallo de una mezcla que el de la variación del módulo.
- Con el ensayo a flexotracción se puede generar una ley de fatiga, con el EBADE no, pero esta presenta una dispersión importante.

En general, el nuevo ensayo EBADE describe de una forma más sencilla la fisuración por fatiga en las mezclas que el de flexotracción en 4 puntos, pues los parámetros de deformación que obtiene

son característicos de cada mezcla a una temperatura y frecuencia dada. El único gran inconveniente que presenta a día de hoy, es el no poder predecir ciclos de carga hasta la fatiga, es decir, no puede generar leyes de fatiga. Aún así, la validez del número de ciclos predicho por la ley de fatiga solo permite realizar comparaciones entre mezclas, ya que su transformación a vida del firme acarrea un gran número de aproximaciones y simplificaciones. El ensayo EBADE permite realizar estas comparaciones por medio de los valores del módulo inicial y la deformación crítica.

5.2 *PROCESO ITERATIVO PARA ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS*

Con respecto a los casos de estudio, se puede concluir lo siguiente:

- El caso 1 falló casi instantáneamente.
- El caso 2 resistió únicamente cuando tuvo sus 9 subcapas activas, en el momento que la se dio el fallo de la subcapa inferior por haber llegado a la deformación crítica, la totalidad del espesor resultante falló casi de manera instantánea.
- El caso 3 resistió la eliminación de hasta 2 de las subcapas inferiores, debido a la fatiga de estas. Cuando se dio el fallo por fatiga de la tercera, el resto de las subcapas activas fallaron de manera casi instantánea.
- A pesar que los casos estudiados fueron muy pocos, se pudo generar una curva que relaciona espesores con ciclos de carga. De la ecuación de esta curva se obtuvo el valor del espesor mínimo para que la muestra no fallara de manera inmediata. De manera interesante, este espesor mínimo ($\approx 13\text{cms}$) concordaba con lo observado en los casos 2 y 3 donde la muestra había fallado en el rango entre 12 cms-13.5 cms.
- La ecuación de la curva que relaciona el número de ciclos con el espesor de capa tiene una forma potencial, lo que quiere decir que por cada centímetro extra de capa de mezcla bituminosa el número de ciclos aumenta muchísimas veces más, por lo que da a entender que un dimensionamiento un tanto conservador del pavimento bituminoso, puede extender su vida de manera potencial.
- Se pudo concluir que mediante la discretización en más subcapas, el error relativo en el cálculo de ciclos de carga se disminuye de manera potencial (tomando en cuenta las limitaciones de este estudio). Además que entre más subcapas habían discretizadas, mayor el número de ciclos, pero sin embargo el error relativo llega a converger, por lo que el número de ciclos también.

La diferencia de resultados entre el método del proceso iterativo y el método clásico es realmente muy grande, siendo los resultados de este estudio mucho más bajos que los del método clásico. Esto se puede deber a varias razones:

- El método clásico no relaciona valores de deformación con valores del módulo. En este solamente se relaciona una deformación específica en la fibra inferior de la muestra con un número de ciclos y se asume que el módulo se mantiene constante en todo el espesor. Por el contrario en el método propuesto en este estudio, se va dando una evolución de la fisura en base a las deformaciones pasadas que definen diferentes valores de módulo en todo el espécimen. Es decir, en el método clásico solamente se introduce una carga, en este método se trata de modelar el paso de varios ciclos de carga y por tanto las deformaciones se van agrandando.
- El poco número de subcapas en las que se puede discretizar la mezcla en el BISAR 3.0 es una limitante que puede llegar a ser muy significativa en el número total de ciclos por medio del proceso iterativo. Esto debido a que se comprobó que el número de ciclos totales que resistiría la capa de mezcla bituminosa aumenta con el número de subcapas en que se ha discretizado.
- Las frecuencias con las que se realizaron los dos ensayos son diferentes, por lo que la ley de fatiga utilizada para el método clásico no tiene mucha más relación con los parámetros obtenidos en el ensayo EBADE.
- El método clásico muchas veces genera números de posibles ciclos de carga mucho más altos que los que se llegan a dar realmente.

Ahora bien, a pesar de las divergencias dadas entre los dos métodos, el proceso iterativo propuesto en esta tesina ha demostrado ser válido, pues utiliza el concepto de deformación crítica en cada subcapa, el cual es un criterio de fallo que describe de mucha mejor manera el comportamiento de cada una de ellas que el de la ley de fatiga. Su validez queda demostrada por el comportamiento explicado en los casos 2 y 3 y la obtención de una ecuación que relaciona espesores y números de ciclos con la que se encontró el espesor mínimo.

Es de esperarse que realizando este estudio sobre mas dimensiones de mezcla, se puedan generar curvas de predicción de ciclos mucho más precisas. En este caso deberían realizarse estudios obre espesores por encima de los 13 cms, para que no fallen de manera inmediata. También, que mediante una mayor discretización de la capa de pavimento bituminoso, se puedan obtener números de ciclos que converjan con muchas subcapas.

Sin embargo, para ser un estudio inicial con este tipo de procedimiento, los resultados son alentadores, sobre todo por lo sencillo de su ejecución y concepto. Es posible que siguiendo algunas de las recomendaciones que se dan en el apartado de futuras líneas de investigación, los resultados de este procedimiento sean mucho más precisos y realistas que los del método clásico para dimensionar firmes y que por lo tanto, traiga los beneficios en cuanto a diseño y rehabilitación que se expresan en la introducción de este trabajo.

5.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Es importante recordar que este es apenas un estudio de aproximación, y que por tanto muchos de los errores o diferencias de resultados con el método clásico se dan por la limitante en el programa computacional BISAR 3.0 y la imposibilidad de poder generar ciclos de cargas de manera automática.

Por esta razón, este proceso iterativo podría ser mejorado mediante la programación de una rutina que sea capaz de calcular tensiones y deformaciones en sistemas de n capas, tal cual lo hace el programa BISAR 3.0, pero para muchas más capas que además sea capaz de introducir las cargas de manera automática (no manual como en este estudio). De esta manera se eliminaría la dependencia en las leyes de fatiga y básicamente con los resultados del ensayo EBADE sería más que suficiente para correr la rutina. Además de esta manera los valores de los módulos en cada subcapa cambiarán siempre con cada ciclo de carga y no como en este estudio, donde al aplicarse la ley de fatiga, los módulos de las subcapas superiores no variaban.

Otra posibilidad de mejora del procedimiento es que se leguen a generar leyes de fatiga con el ensayo EBADE, de esta manera se haría exactamente el mismo procedimiento de este estudio, pero sin tener que realizar el ensayo a flexotracción y se eliminaría la dependencia de resultados en los criterios de fallo clásicos que utiliza este ensayo.

Otra línea de investigación futura, sería utilizar los conceptos de deformación crítica y de variación del módulo con las deformaciones del ensayo EBADE en modelos viscoelásticos continuos de daño (VECD), en donde muchas veces encontrar el criterio de fallo no está claro.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. M. Burmister, «The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems», *Journal of Physics*, vol. 16, pp. 89-94, 1944.
- [2] R. L. Schiffman, «General Analysis of Stresses and Displacements in Layered Elastic Systems», de *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Michigan, 1962.
- [3] «Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)», Ministerio de Fomento, España, 2013.
- [4] D. N. Little, «Sulphlex Engineering Properties», FHWA Report FHWA/RD-85/032, Federal Highway Administration, 1985.
- [5] S. Oller, «Fractura Mecánica. Un Enfoque Global», Barcelona: Editorial CIMNE, 2001.
- [6] G. R. Irwin, «Fracture», de *Encyclopedia of Physics (Handbuch der Physik)*, vol. VI, Berlin, Ed. Springer, pp. 551-590, 1958.
- [7] C. Koh, R. Roque, and G. Lopp, «Development of a Dog-Bone Direct Tension Test (DBDT) for Asphalt Concrete», de *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, vol. I, The Netherlands, CRC Press Balkema, pp. 585-596, 2009.
- [8] Norma Europea EN 12697-24:2006+A1, «Mezclas bituminosas. Métodos de ensayos para mezclas bituminosas en caliente», de *Parte 24: Resistencia a la fatiga*, España, AENOR, 2007.
- [9] W. Schütz, «A history of fatigue», de *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 54, pp. 263-300, 1996.
- [10] P. S. Pell, P. F. McCarthy, and R. R. Gardner, «Fatigue of bitumen and bituminous mixes», *International Journal of Mechanical Sciences* 3, pp. 247-248, 1961.
- [11] R. Y. Kim, «Modelling of Asphalt Concrete», New York, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [12] S. Carpenter, «Fatigue Performances of IDOT Mixtures», FHWA-ICT-007-2007, Illinois Center for Transportation Series No. 07-007, 2006.
- [13] P.C. Paris, M.P. Gomez, and W.E. Anderson, «A rational analytic theory of fatigue», de *The Trend in Engineering*, vol. 13, pp. 9-14, 1961.
- [14] R. Schapery, «Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media», *International Journal of Fracture* 25, pp. 195-223, 1984.

- [15] L. F. Walubita, G. S. Simate, E. Ofori-Abebbresse, A. E. Martin, R. L. Lytton, and L. E. Sanabria, «Mathematical formulation of HMA crack initiation and crack propagation models based on continuum fracture-mechanics and work-potential theory», *International Journal of Fatigue* 40, pp. 112-119, 2012.
- [16] S. W. Park, Y. R. Kim, and R. A. Schapery, «A Viscoelastic Continuum Damage Model and its application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete», *Mechanics of Materials*, vol. 24, pp. 241-255, 1996.
- [17] SHRP-A-404, «Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes», Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1994.
- [18] P. S. Baburamani, and D. W. Porter, «Dissipated Energy Approach to Fatigue Characterisation of Asphalt Mixes», de *Proceeding of Combined 18th ARRB TR Conference Transit New Zealand Symposium, Part 2*, 1996.
- [19] S. Shen, and S. H. Carpenter, «Application of Dissipated Energy Concept in Fatigue Endurance Limit Testing», *Journal of Transportation Research Record: Transportation Research Board*, No. 1929, pp. 165-173, 2005.
- [20] G. M. Rowe, «Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test», *Proceedings of Associations of Asphalt Paving Technologists*, vol. 62, pp. 344-384, 1993.
- [21] K. Ghuzlan, «Fatigue Damage Analysis in Asphalt Concrete Mixtures Based Upon Dissipated Energy Concepts», Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2001.
- [22] S. H. Carpenter, S. Shen, «Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing», *Center of Excellence for Airport Technology, COE Report No. 29*, 2007.
- [23] S.V. González Rodríguez, y S. E. Velandia Argüello, «Estado del Arte en el Estudio de la Fatiga en Mezclas Bituminosas», Proyecto de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2006.
- [24] C. L. Monismith, and J. A. Deacon, «Fatigue of Asphalt Paving Mixtures», *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, vol. 95, pp. 317-346, 1969.
- [25] Y. H. Huang, «Pavement Analysis and Design», New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993.
- [26] O. J. Reyes, A.E. Alvarez, and P. Limón «Effect of the Failure Criterion on the Laboratory Fatigue Response Prediction of Hot-Mix Asphalt Mixtures», *Revista Dyna, year 79, Nro 174*, pp. 31-39, 2012.
- [27] F. E. Pérez-Jiménez, R. Miró, A. Martínez, R. Botella, O. Reyes, and G. Valdés, «False Failure in Flexural Fatigue Tests», de *Presented at 2nd Workshop on 4PB*, Guimaraes, Portugal, 2009.

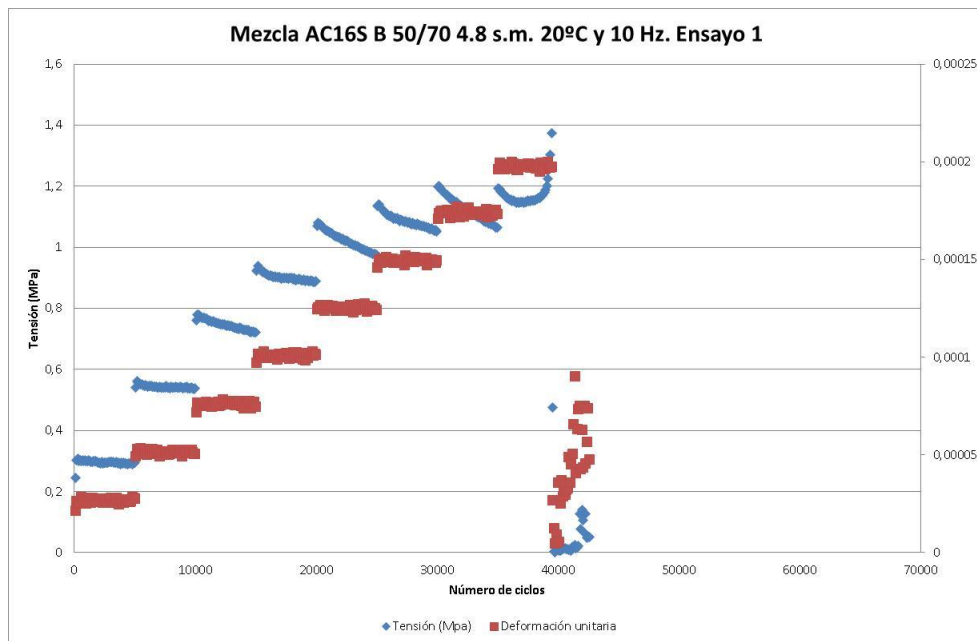
- [28] H. Baaj, and H. Di Benedetto, «Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach», de *Road Materials and Pavement Design*, 6, pp. 147-174, 2005.
- [29] F. Pérez, R. Miró, A. Martínez, J. Alonso, J. Cepeda, M. Rodríguez, «Desarrollo de un Nuevo Procedimiento para la Evaluación del comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas a Partir de su Caracterización en un Ensayo a Tracción», Primer Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo, España, 2005.
- [30] F. Pérez, R. Miró, A. Martínez, G. Valdés, R. Botella, «Evaluación del Proceso de Fatiga de Mezclas Asfálticas Mediante un Nuevo Procedimiento Cíclico de Barrido de Deformaciones EBADE», *Revista de la Construcción*, vol. 10, nº 2, 2011.
- [31] C. M. Johnson, «Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance using an Accelerated Test Method,» de *Doctoral Thesis, University of Wisconsin*, Madison, USA, 2010.
- [32] E. Chailleux, D. Bodin, C. de La Roche, M. Leguern, N. Vignard, «Fatigue behaviour of bitumen in tension–compression loading mode: rheological analysis and comparison with mix fatigue», de *Advanced testing and characterization of bituminous materials*, 2009.
- [33] F. E. Pérez, J. R. Miró, A. H. Martínez, R. Botella y G. A. Valdés, «Estado de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas: ensayos Fénix y EBADE», *Asfalto y pavimentación*, vol. I, pp. 39-51, 2011.
- [34] R. Botella, «Fatiga en Betunes. Barrido de Deformaciones», de *Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya*, Barcelona, España, 2013.
- [35] Shell Bitumen Business Group, «BISAR 3.0 User Manual», Shell, 1998.

ANEJO A: RESULTADOS DEL ENSAYO EBADE

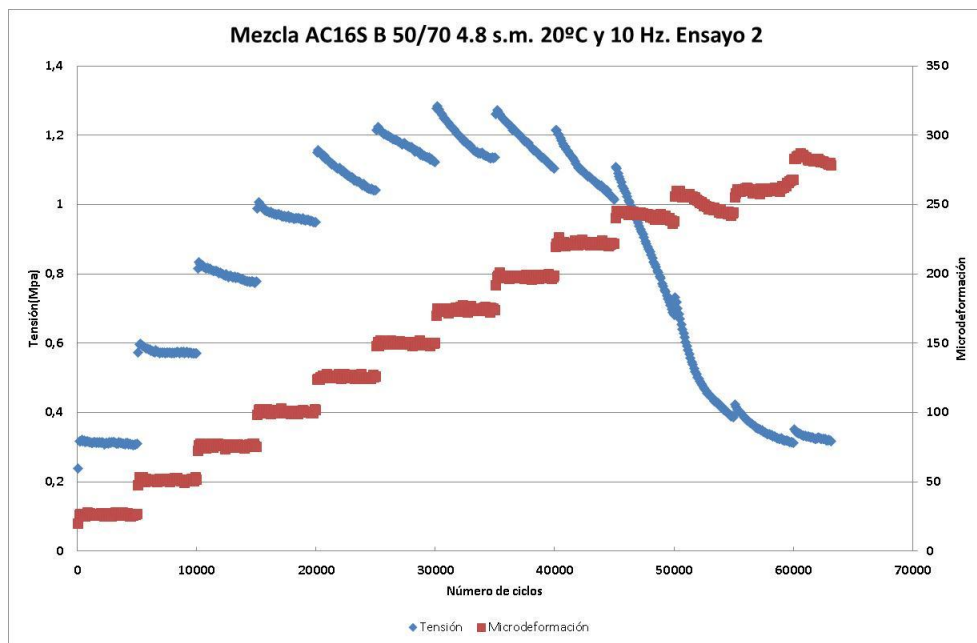
En este anejo se incluye la totalidad de las curvas obtenidas a través de la ejecución del ensayo EBADE a dos probetas de la misma mezcla AC16S B50/70 a 20°C y 10 Hz. Primeramente se muestran las curvas de tensión, luego la de densidad de energía disipada y finalmente las de la evolución del módulo.

CURVAS DE EVOUCIÓN DE LA TENSIÓN Y LAS DEFORMACIONES

Ensayo 1

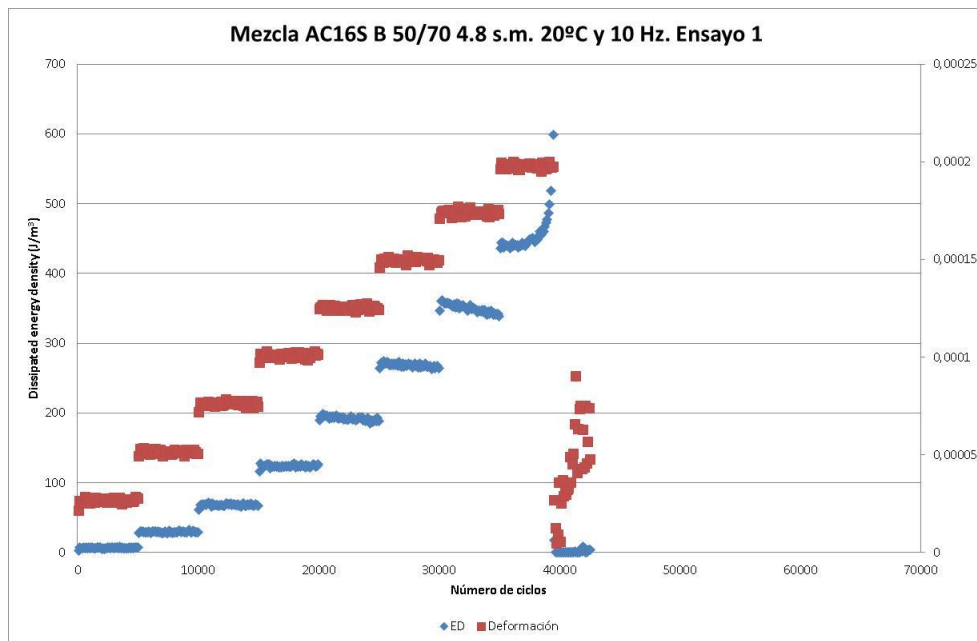


Ensayo 2

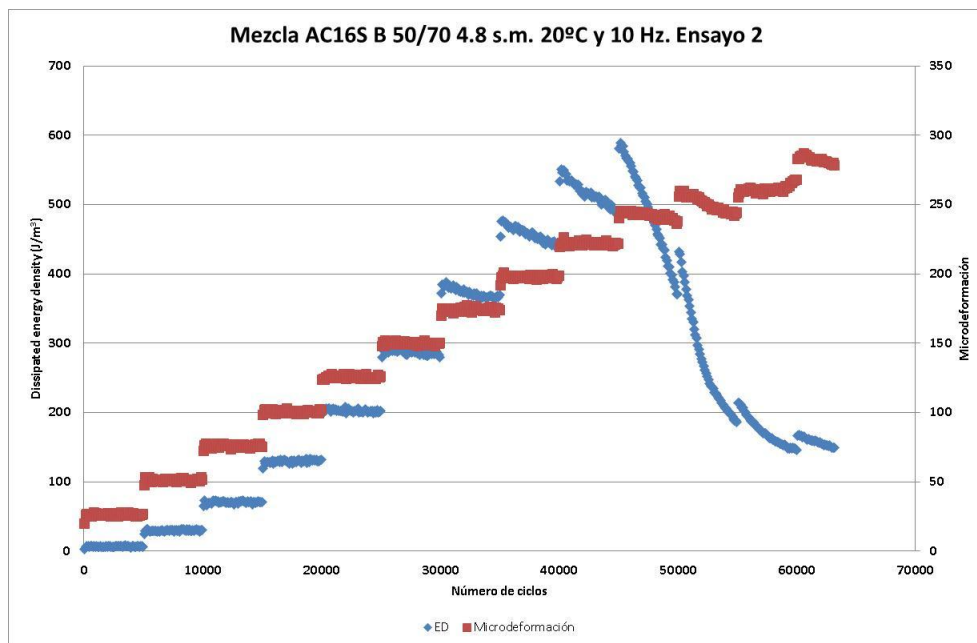


CURVAS DE EVOLUCIÓN DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA DISIPADA Y LAS DEFORMACIONES

Ensayo 1

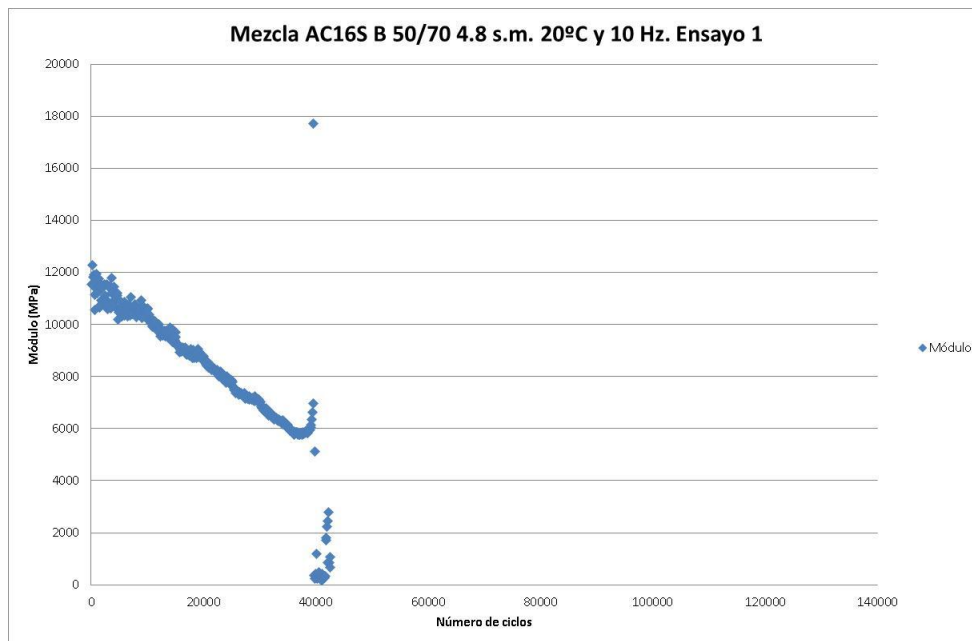


Ensayo 2

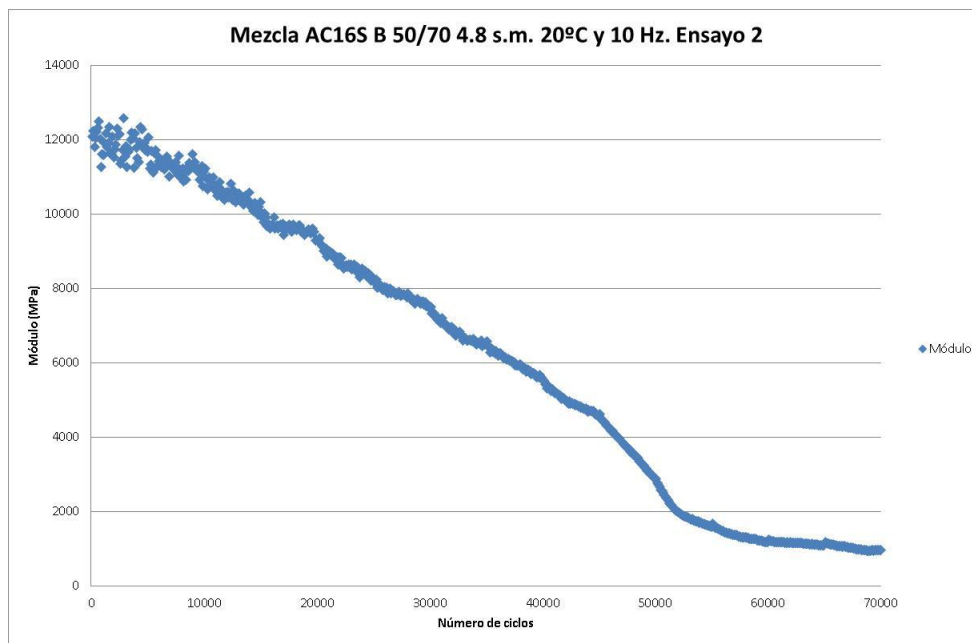


CURVAS DE EVOLUCIÓN DEL VALOR DEL MÓDULO VS # DE CICLOS

Ensayo 1



Ensayo 2



ANEJO B: RESULTADOS DEL MÉTODO ITERATIVO

En este anejo se incluye la totalidad de los resultados obtenidos en el método iterativo para los 3 casos en estudio. Los resultados son presentados en formato de tablas para que se puedan ver los valores exactos hasta el fallo total del espécimen. Primeramente se muestran todas las tablas de caso 1, luego las del caso 2 y finalmente las del caso 3.

CASO 1

9 subcapas activas

Mezcla AC16S 50/70 de 9 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1 cm c/u.								
Ciclo 1 para 9 subcapas			Ciclo 2 para 9 subcapas			Ciclo 3 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-168	11870	1	-176	11870	1	-190	11870
2	-118	11870	2	-113	11870	2	-107	11870
3	-69	11870	3	-52	11870	3	-26	11870
4	-21	11870	4	8	11870	4	55	11314
5	26	11870	5	68	10752	5	135	8055
6	73	10555	6	129	8307	6	215	4809
7	122	8595	7	189	5860	7	295	100
8	172	6566	8	250	3380	8	377	100
9	224	4444	9	313	100	9	391	100

Mezcla AC16S 50/70 de 9 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1 cm c/u.								
Ciclo 4 para 9 subcapas			Ciclo 5 para 9 subcapas			Ciclo 6 para 9 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-205	11870	1	-183	11870	1	-87	11870
2	-79	11870	2	29	11870	2	217	4740
3	46	11660	3	241	3754	3	515	100
4	171	6586	4	453	100	4	625	100
5	296	100	5	525	100	5	714	100
6	422	100	6	584	100	6	785	100
7	453	100	7	632	100	7	842	100
8	479	100	8	671	100	8	886	100
9	501	100	9	703	100	9	921	100

Mezcla AC16S 50/70 de 9 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1 cm c/u.								
			Ciclo 7 para 9 subcapas					
			Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)			
			1	32	11870			
			2	393	100			
			3	556	100			
			4	689	100			
			5	796	100			
			6	880	100			
			7	947	100			
			8	998	100			
			9	1038	100			

CASO 2

9 subcapas activas

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,02E+02	11870,00	1	-1,06E+02	11870,00	1	-1,07E+02	11870,00
2	-6,96E+01	11870,00	2	-6,95E+01	11870,00	2	-6,91E+01	11870,00
3	-3,89E+01	11870,00	3	-3,50E+01	11870,00	3	-3,30E+01	11870,00
4	-9,64E+00	11870,00	4	-1,81E+00	11870,00	4	1,96E+00	11870,00
5	1,90E+01	11870,00	5	3,09E+01	11870,00	5	3,65E+01	11870,00
6	4,78E+01	11590,99	6	6,40E+01	10934,38	6	7,09E+01	10651,52
7	7,76E+01	10382,46	7	9,75E+01	9574,88	7	1,06E+02	9236,42
8	1,09E+02	9098,45	8	1,32E+02	8156,94	8	1,42E+02	7767,36
9	1,44E+02	7706,48	9	1,70E+02	6639,18	9	1,81E+02	6192,77

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 4 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 5 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 6 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,08E+02	11870,00	1	-1,08E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00
2	-6,90E+01	11870,00	2	-6,89E+01	11870,00	2	-6,89E+01	11870,00
3	-3,21E+01	11870,00	3	-3,16E+01	11870,00	3	-3,14E+01	11870,00
4	3,62E+00	11870,00	4	4,52E+00	11870,00	4	4,87E+00	11870,00
5	3,90E+01	11870,00	5	4,03E+01	11870,00	5	4,09E+01	11870,00
6	7,41E+01	10522,06	6	7,57E+01	10457,54	6	7,65E+01	10427,51
7	1,10E+02	9082,21	7	1,12E+02	9005,11	7	1,12E+02	8968,58
8	1,46E+02	7588,80	8	1,49E+02	7499,51	8	1,50E+02	7458,93
9	1,86E+02	5993,92	9	1,88E+02	5892,47	9	1,89E+02	5843,77

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 7 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 8 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 9 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00
2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00
3	-3,12E+01	11870,00	3	-3,12E+01	11870,00	3	-3,11E+01	11870,00
4	5,15E+00	11870,00	4	5,24E+00	11870,00	4	5,35E+00	11870,00
5	4,13E+01	11854,78	5	4,14E+01	11849,09	5	4,15E+01	11846,25
6	7,69E+01	10410,06	6	7,71E+01	10402,35	6	7,72E+01	10397,88
7	1,13E+02	8948,29	7	1,13E+02	8940,18	7	1,13E+02	8936,12
8	1,50E+02	7434,58	8	1,50E+02	7426,47	8	1,51E+02	7418,35
9	1,90E+02	5815,36	9	1,90E+02	5803,19	9	1,91E+02	5795,07

CASO 2

9 subcapas activas

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 10 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 11 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 12 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00	1	-1,09E+02	11870,00
2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00	2	-6,88E+01	11870,00
3	-3,11E+01	11870,00	3	-3,11E+01	11870,00	3	-3,11E+01	11870,00
4	5,36E+00	11870,00	4	5,39E+00	11870,00	4	5,40E+00	11870,00
5	4,15E+01	11845,44	5	4,15E+01	11844,22	5	4,16E+01	11843,01
6	7,72E+01	10397,07	6	7,73E+01	10395,04	6	7,73E+01	10393,42
7	1,13E+02	8932,06	7	1,13E+02	8932,06	7	1,13E+02	8928,00
8	1,51E+02	7414,29	8	1,51E+02	7414,29	8	1,51E+02	7410,23
9	1,91E+02	5795,07	9	1,91E+02	5791,01	9	1,91E+02	5791,01

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discreteizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>								
			<i>Ciclo 13 para 9 subcapas</i>					
			<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>			
			1	-1,09E+02	11870,00			
			2	-6,88E+01	11870,00			
			3	-3,11E+01	11870,00			
			4	5,40E+00	11870,00			
			5	4,16E+01	11843,01			
			6	7,73E+01	10393,42			
			7	1,13E+02	8928,00			
			8	1,51E+02	7410,23			
			9	1,91E+02	5791,01			

CASO 2**8 subcapas activas**

Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.								
Ciclo 1 para 8 subcapas			Ciclo 2 para 8 subcapas			Ciclo 3 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-1,19E+02	11870,00	1	-1,21E+02	11870,00	1	-1,22E+02	11870,00
2	-7,14E+01	11870,00	2	-6,95E+01	11870,00	2	-6,81E+01	11870,00
3	-2,64E+01	11870,00	3	-2,05E+01	11870,00	3	-1,63E+01	11870,00
4	1,74E+01	11870,00	4	2,76E+01	11870,00	4	3,47E+01	11870,00
5	6,12E+01	11044,76	5	7,53E+01	10475,39	5	8,49E+01	10084,99
6	1,05E+02	9256,72	6	1,23E+02	8542,47	6	1,35E+02	8051,43
7	1,51E+02	7414,29	7	1,72E+02	6558,01	7	1,86E+02	5973,63
8	1,99E+02	5450,12	8	2,23E+02	4463,98	8	2,40E+02	3798,44

Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.								
Ciclo 4 para 8 subcapas			Ciclo 5 para 8 subcapas			Ciclo 6 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-1,23E+02	11870,00	1	-1,33E+02	11870,00	1	-1,35E+02	11870,00
2	-6,70E+01	11870,00	2	-6,70E+01	11870,00	2	-5,99E+01	11870,00
3	-1,30E+01	11870,00	3	-3,78E+00	11870,00	3	1,32E+01	11870,00
4	4,03E+01	11870,00	4	5,90E+01	11135,66	4	8,56E+01	10058,21
5	9,26E+01	9774,14	5	1,21E+02	8607,40	5	1,57E+02	7154,57
6	1,45E+02	7661,84	6	1,85E+02	6034,50	6	2,29E+02	4232,66
7	1,98E+02	5511,00	7	2,51E+02	3339,86	7	3,03E+02	0,00
8	2,53E+02	0,00	8	2,58E+02	0,00	8	3,06E+02	0,00

Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.								
Ciclo 7 para 8 subcapas			Ciclo 8 para 8 subcapas			Ciclo 9 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-1,44E+02	11870,00	1	-1,48E+02	11870,00	1	-1,13E+02	11870,00
2	-4,74E+01	11870,00	2	-1,11E+01	11870,00	2	1,51E+02	7385,89
3	4,73E+01	11611,28	3	1,25E+02	8469,42	3	4,17E+02	0,00
4	1,41E+02	7803,88	4	2,59E+02	0,00	4	4,94E+02	0,00
5	2,35E+02	4001,35	5	3,94E+02	0,00	5	5,51E+02	0,00
6	3,31E+02	0,00	6	4,13E+02	0,00	6	5,91E+02	0,00
7	3,40E+02	0,00	7	4,27E+02	0,00	7	6,18E+02	0,00
8	3,48E+02	0,00	8	4,36E+02	0,00	8	6,37E+02	0,00

CASO 2

8 subcapas activas

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 13,5 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 1,5 cm c/u.</i>					
<i>Ciclo 10 para 8 subcapas</i>			<i>Ciclo 11 para 8 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	2,71E+01	11870,00	1	2,38E+02	3863,37
2	4,50E+02	0,00	2	5,09E+02	0,00
3	5,99E+02	0,00	3	7,07E+02	0,00
4	7,05E+02	0,00	4	8,46E+02	0,00
5	7,79E+02	0,00	5	9,41E+02	0,00
6	8,28E+02	0,00	6	1,00E+03	0,00
7	8,58E+02	0,00	7	1,04E+03	0,00
8	8,74E+02	0,00	8	1,05E+03	0,00

CASO 3**9 subcapas activas**

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-6,75E+01	11870,00	1	-6,91E+01	11870,00	1	-6,94E+01	11870,00
2	-4,40E+01	11870,00	2	-4,42E+01	11870,00	2	-4,43E+01	11870,00
3	-2,29E+01	11870,00	3	-2,19E+01	11870,00	3	-2,16E+01	11870,00
4	-3,45E+00	11870,00	4	-1,09E+00	11870,00	4	-5,12E-01	11870,00
5	1,52E+01	11870,00	5	1,90E+01	11870,00	5	1,99E+01	11870,00
6	3,39E+01	11870,00	6	3,93E+01	11870,00	6	4,06E+01	11870,00
7	5,36E+01	11353,59	7	6,05E+01	11075,19	7	6,20E+01	11015,95
8	7,52E+01	10478,64	8	8,32E+01	10153,17	8	8,49E+01	10084,99
9	9,96E+01	9487,22	9	1,09E+02	9118,74	9	1,11E+02	9041,63

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 4 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 5 para 9 subcapas</i>			<i>Ciclo 6 para 9 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-6,95E+01	11870,00	1	-6,95E+01	11870,00	1	-6,95E+01	11870,00
2	-4,42E+01	11870,00	2	-4,43E+01	11870,00	2	-4,43E+01	11870,00
3	-2,15E+01	11870,00	3	-2,15E+01	11870,00	3	-2,15E+01	11870,00
4	-3,42E-01	11870,00	4	-3,29E-01	11870,00	4	-3,29E-01	11870,00
5	2,02E+01	11870,00	5	2,02E+01	11870,00	5	2,02E+01	11870,00
6	4,10E+01	11866,95	6	4,10E+01	11865,73	6	4,10E+01	11865,73
7	6,24E+01	10999,31	7	6,24E+01	10997,28	7	6,24E+01	10997,28
8	8,53E+01	10066,73	8	8,54E+01	10064,30	8	8,54E+01	10064,30
9	1,11E+02	9021,34	9	1,11E+02	9021,34	9	1,11E+02	9021,34

CASO 3

8 subcapas activas

Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 1 para 8 subcapas			Ciclo 2 para 8 subcapas			Ciclo 3 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-7,82E+01	11870,00	1	-7,95E+01	11870,00	1	-7,98E+01	11870,00
2	-4,72E+01	11870,00	2	-4,68E+01	11870,00	2	-4,67E+01	11870,00
3	-1,89E+01	11870,00	3	-1,69E+01	11870,00	3	-1,62E+01	11870,00
4	7,95E+00	11870,00	4	1,17E+01	11870,00	4	1,28E+01	11870,00
5	3,45E+01	11870,00	5	4,01E+01	11870,00	5	4,18E+01	11834,89
6	6,20E+01	11012,29	6	6,89E+01	10732,28	6	7,10E+01	10650,30
7	9,13E+01	9826,89	7	9,94E+01	9495,34	7	1,02E+02	9398,75
8	1,24E+02	8510,01	8	1,33E+02	8128,54	8	1,36E+02	8014,91

Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 4 para 8 subcapas			Ciclo 5 para 8 subcapas			Ciclo 6 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-7,99E+01	11870,00	1	-7,99E+01	11870,00	1	-8,00E+01	11870,00
2	-4,66E+01	11870,00	2	-4,66E+01	11870,00	2	-4,66E+01	11870,00
3	-1,61E+01	11870,00	3	-1,60E+01	11870,00	3	-1,59E+01	11870,00
4	1,31E+01	11870,00	4	1,33E+01	11870,00	4	1,33E+01	11870,00
5	4,22E+01	11817,85	5	4,24E+01	11807,70	5	4,25E+01	11806,08
6	7,16E+01	10625,55	6	7,18E+01	10616,21	6	7,19E+01	10614,18
7	1,03E+02	9370,35	7	1,03E+02	9358,17	7	1,03E+02	9358,17
8	1,37E+02	7982,44	8	1,37E+02	7970,27	8	1,37E+02	7966,21

Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 5 para 8 subcapas			Ciclo 6 para 8 subcapas			Ciclo 7 para 8 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-7,99E+01	11870,00	1	-8,00E+01	11870,00	1	-8,00E+01	11870,00
2	-4,66E+01	11870,00	2	-4,66E+01	11870,00	2	-4,66E+01	11870,00
3	-1,60E+01	11870,00	3	-1,59E+01	11870,00	3	-1,59E+01	11870,00
4	1,33E+01	11870,00	4	1,33E+01	11870,00	4	1,33E+01	11870,00
5	4,24E+01	11807,70	5	4,25E+01	11806,08	5	4,25E+01	11806,08
6	7,18E+01	10616,21	6	7,19E+01	10614,18	6	7,19E+01	10614,18
7	1,03E+02	9358,17	7	1,03E+02	9358,17	7	1,03E+02	9358,17
8	1,37E+02	7970,27	8	1,37E+02	7966,21	8	1,37E+02	7966,21

CASO 3

7 subcapas activas

Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 1 para 7 subcapas			Ciclo 2 para 7 subcapas			Ciclo 3 para 7 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-8,98E+01	11870,00	1	-9,12E+01	11870,00	1	-9,17E+01	11870,00
2	-4,80E+01	11870,00	2	-4,63E+01	11870,00	2	-4,55E+01	11870,00
3	-9,05E+00	11870,00	3	-4,14E+00	11870,00	3	-1,94E+00	11870,00
4	2,88E+01	11870,00	4	3,71E+01	11870,00	4	4,08E+01	11870,00
5	6,73E+01	10797,61	5	7,84E+01	10349,59	5	8,31E+01	10158,45
6	1,07E+02	9171,49	6	1,21E+02	8619,58	6	1,27E+02	8384,20
7	1,51E+02	7385,89	7	1,67E+02	6740,63	7	1,74E+02	6464,67
Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 4 para 7 subcapas			Ciclo 5 para 7 subcapas			Ciclo 6 para 7 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-9,20E+01	11870,00	1	-9,21E+01	11870,00	1	-9,21E+01	11870,00
2	-4,52E+01	11870,00	2	-4,49E+01	11870,00	2	-4,48E+01	11870,00
3	-1,06E+00	11870,00	3	-5,27E-01	11870,00	3	-2,55E-01	11870,00
4	4,23E+01	11812,57	4	4,31E+01	11781,73	4	4,35E+01	11763,87
5	8,52E+01	10073,63	5	8,62E+01	10033,86	5	8,67E+01	10013,57
6	1,29E+02	8282,75	6	1,31E+02	8234,05	6	1,31E+02	8209,70
7	1,77E+02	6342,93	7	1,79E+02	6286,11	7	1,79E+02	6257,71
Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
Ciclo 7 para 7 subcapas			Ciclo 8 para 7 subcapas			Ciclo 9 para 7 subcapas		
Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)	Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)
1	-9,22E+01	11870,00	1	-9,22E+01	11870,00	1	-9,22E+01	11870,00
2	-4,48E+01	11870,00	2	-4,48E+01	11870,00	2	-4,48E+01	11870,00
3	-1,76E-01	11870,00	3	-1,44E-01	11870,00	3	-1,13E-01	11870,00
4	4,37E+01	11758,19	4	4,37E+01	11756,16	4	4,38E+01	11753,73
5	8,69E+01	10005,45	5	8,69E+01	10002,21	5	8,70E+01	9998,96
6	1,31E+02	8197,53	6	1,32E+02	8193,47	6	1,32E+02	8189,41
7	1,80E+02	6245,53	7	1,80E+02	6241,47	7	1,80E+02	6237,41
Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.								
			Ciclo 10 para 7 subcapas					
			Subcapa	μ deformación XX	Módulo (MPa)			
			1	-9,22E+01	11870,00			
			2	-4,48E+01	11870,00			
			3	-1,13E-01	11870,00			
			4	4,38E+01	11753,73			
			5	8,70E+01	9998,96			
			6	1,32E+02	8189,41			
			7	1,80E+02	6237,41			

CASO 3

6 subcapas activas

<i>Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 7 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,02E+02	11870,00	1	-1,03E+02	11870,00	1	-1,04E+02	11870,00
2	-4,24E+01	11870,00	2	-3,65E+01	11870,00	2	-3,20E+01	11870,00
3	1,48E+01	11870,00	3	2,79E+01	11870,00	3	3,75E+01	11870,00
4	7,20E+01	10606,47	4	9,14E+01	9819,59	4	1,05E+02	9252,66
5	1,30E+02	8242,17	5	1,56E+02	7219,50	5	1,74E+02	6484,96
6	1,93E+02	5705,79	6	2,23E+02	4468,04	6	2,45E+02	3591,47
<i>Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 7 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-1,05E+02	11870,00	1	-1,12E+02	11870,00	1	-1,12E+02	11870,00
2	-2,86E+01	11870,00	2	-1,53E+01	11870,00	2	3,26E+01	11870,00
3	4,51E+01	11698,94	3	7,95E+01	10303,73	3	1,76E+02	6371,34
4	1,17E+02	8773,79	4	1,73E+02	6493,08	4	3,23E+02	100,00
5	1,89E+02	5855,94	5	2,71E+02	100,00	5	3,43E+02	100,00
6	2,63E+02	100,00	6	2,79E+02	100,00	6	3,55E+02	100,00
<i>Mezcla AC16S 50/70 de 18 cms de espesor discretizada en 9 subcapas de 2 cm c/u.</i>								
<i>Ciclo 1 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 2 para 7 subcapas</i>			<i>Ciclo 3 para 7 subcapas</i>		
<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Subcapa</i>	<i>μdeformación XX</i>	<i>Módulo (MPa)</i>
1	-8,12E+01	11870,00	1	4,39E+01	11747,64	1	3,17E+02	100,00
2	1,64E+02	6894,84	2	4,70E+02	100,00	2	6,02E+02	100,00
3	4,07E+02	100,00	3	5,86E+02	100,00	3	7,83E+02	100,00
4	4,54E+02	100,00	4	6,58E+02	100,00	4	8,89E+02	100,00
5	4,83E+02	100,00	5	6,98E+02	100,00	5	9,43E+02	100,00
6	4,99E+02	100,00	6	7,17E+02	100,00	6	9,62E+02	100,00