

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Posgrado y Educación Continua



Tesis Doctoral

**Desarrollo de Modelos de Fatiga para Mezclas
Asfálticas, en Métodos Empírico Mecanicistas
Argentinos**

Juan Pablo Raffaelli

Director: Dr. Ing. Oscar Giovanon

Miembros del Jurado: Dr. Ing. Francisco Morea
Dr. Ing. Fernando Martinez
Dr. Ing. Ignacio Zapata Ferrero

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura,
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

Doctor en Ingeniería

Marzo de 2025

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de posgrado en ninguna otra Universidad o Institución.


Juan Pablo Raffaelli

El único instrumento que los hombres tenemos tanto para perfeccionarnos como para vivir dignamente es la educación

Santo Tomás de Aquino

“Camino, paisaje y meta”. Es importante trazarse una meta, buscar objetivos, pero no olvidándose de disfrutar del camino elegido y del bello paisaje de la vida.

Jorge R. Tosticarelli

Nada nos pasa por casualidad, si pasa es porque lo buscamos

Gerardo Martino

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios por darme el don de la vida y por las bendiciones concedidas.

Al Dr. Oscar Giovanon por su generosidad y ayuda sostenida para la concreción de esta tesis.

A todo el personal del Laboratorio Vial del IMAE, tanto a los que aún siguen activos, como a los que se han jubilado, por su colaboración y acompañamiento.

Al Ing. Hugo Poncino, por ser uno de mis formadores dentro de la ingeniería vial y por haberme inculcado la necesidad de la capacitación continua.

Por último, muy especialmente, a Florencia mi esposa y a mis hijos Belén, Rocío, Matías y Juan Cruz, por su apoyo incondicional y ser mi motor de cada día.

Resumen

La fisuración debido a la fatiga que sufren las capas asfálticas de un pavimento flexible es una de las dos fallas estructurales relevantes que se producen durante la vida en servicio del mismo.

A medida que esta falla progresa hacia estados más severos de deterioros, se ocasiona una pérdida de serviciabilidad del pavimento, provocando una degradación de las condiciones de confort y seguridad; como también el incremento en los costos de los usuarios y de las tareas de mantenimiento.

El empleo de métodos de diseño sofisticados como son los empíricos mecanicistas, permite una más realista representación de la compleja realidad estructural, contribuyendo a disminuir las dispersiones existentes entre las predicciones y el comportamiento en servicio.

Estos métodos se basan en la determinación de los esfuerzos críticos en cada capa que compone la estructura y en la determinación de su vida útil a partir de la comparación con leyes de falla de cada uno de los materiales.

Estos criterios de fallas se obtienen a partir de ensayos de caracterización, pero los resultados alcanzados no pueden ser directamente utilizados en los métodos de diseño, debido a que no representan exactamente las condiciones reales a los que están expuestos los materiales en el camino, producto del conjunto de simplificaciones que se realizan en el modelo apartándolo de la realidad. Resulta necesario su calibración a partir del comportamiento de tramos a escala real.

Se aborda el desarrollo y calibración de modelos de predicción de la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas utilizadas en Argentina, a partir de ensayos de desempeño y aplicando un Método de Diseño Mecanicista - Empírico desarrollado en nuestro país, capaz de predecir el comportamiento en servicio de los pavimentos.

Los factores de ajuste obtenidos posibilitan, dentro del software BackViDe, la incorporación de nuevos tipos de mezclas asfálticas o fuera del dominio de la experiencia.

Palabras claves: Método de diseño Empírico Mecanicista local, Ensayo 4PBT, Calibración, Mezclas asfálticas

Abstract

Fatigue cracking in the asphalt layers of a flexible pavement structure is one of the two most significant types of structural failure that can occur during its service life. As this type of failure progresses to more severe stages of deterioration, it leads to a loss of pavement serviceability, resulting in a degradation of comfort and safety conditions and in an increase in user costs and maintenance demands.

The use of sophisticated design methods, such as mechanistic-empirical approaches, enables a more realistic representation of the complex structural reality, helping to reduce the discrepancies between predictions and in-service performance. These methods are based on the evaluation of the critical stresses in each structural layer and on the assessment of their lifespan by comparing said stresses with those of each material's failure law.

These failure criteria are obtained from characterization tests, however, the achieved results cannot be directly applied in design methods, because they do not exactly represent the real conditions to which the materials are exposed on the road. This is the result of a series of simplifications that is made to the model, which distances it from reality. Hence, the calibration of the model based on the behaviour of in situ structures is necessary.

The development and calibration of prediction models for the calculation of fatigue resistance of the asphalt mixtures commonly used in Argentina is addressed, based on performance tests and on the application of a Mechanistic-Empirical Design Method developed in our country, capable of predicting the in-service behaviour of pavements. The shift factors obtained make it possible, within the BackViDe software, to incorporate new types of asphalt mixtures or those outside the existing domain of experience.

Key words: Local Mechanistic-Empirical Design Method, 4PBT test, Calibration, Asphalt mixtures

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. FISURACIÓN POR FATIGA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	1
1.2. LOS MÉTODOS DE DISEÑO EMPÍRICO MECANICISTAS.....	4
1.2.1. <i>Modelos en Condiciones Iniciales</i>	5
1.2.2. <i>Modelos en Condiciones Incrementales</i>	6
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS	9
Capítulo 2. ANTECEDENTES Y DESARROLLO TEÓRICO.....	17
2.1. MECANISMO DE FISURACIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	17
2.2. LEYES DE FATIGA	19
2.3. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	21
2.3.1. <i>Tipos de Ensayos de Fatiga</i>	22
2.3.2. <i>Factores Influyentes</i>	25
2.3.3. <i>Condiciones de ensayo a fatiga. Modos de Carga</i>	27
2.3.4. <i>Evolución de las propiedades estructurales</i>	28
2.3.5. <i>Criterios para definir el final de los ensayos</i>	29
2.4. MODELOS DE FISURACIÓN POR FATIGA EN LOS MÉTODOS DE DISEÑO EMPÍRICOS MECANICISTAS	31
2.4.1. <i>Evolución de los criterios de falla por fatiga</i>	31
2.4.2. <i>Criterios de falla por fatiga aplicados en Métodos de diseño internacionales</i>	35
2.5. LEYES DE FALLA POR FATIGA EN MÉTODO DE DISEÑO EMPÍRICO MECANICISTA ARGENTINO.....	47
Capítulo 3. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL ENSAYO 4PBT.....	56
3.1. INTRODUCCIÓN.....	56
3.2. ENSAYO DE FATIGA EN VIGA A FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS (4PBT)	56
3.3. MEZCLAS ASFÁLTICAS DE REFERENCIA	57
3.4. RESULTADOS OBTENIDOS	59
Capítulo 4. CALIBRACIÓN LEYES DE FISURACIÓN POR FATIGA	61
4.1. INTRODUCCIÓN.....	61
4.2. PRIMERA CALIBRACIÓN. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL <i>SHIFT FACTOR</i>	62
4.3. SEGUNDA CALIBRACIÓN. OBTENCIÓN DEL <i>SHIFT FACTOR</i> DEFINITIVO	66
4.3.1. <i>Proceso y Tramos de Calibración</i>	66
4.3.2. <i>Ajuste del Modelo de Fatiga</i>	68

4.3.3.	<i>Resultados Finales de la Calibración</i>	74
4.4.	MEJORA DEL MODELO DE AHUELLAMIENTO	75
4.4.1.	<i>Deformación Permanente en Mezcla asfáltica</i>	76
4.4.2.	<i>Deformación Permanente en Suelos</i>	79
Capítulo 5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	83
Capítulo 6.	PARÁMETROS DE LOS CRITERIOS DE FALLAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN BACKVIDE.....	86
6.1.	CRITERIOS DE FALLA POR FISURACIÓN	86
6.2.	CRITERIOS DE FALLA POR AHUELLAMIENTO	89
6.3.	VALIDACIÓN DE BVD EN LOS VALORES POR DEFECTO ADOPTADOS	91
Capítulo 7.	CONSIDERACIONES FINALES	97
7.1.	CONCLUSIONES DE LA TESIS.....	97
7.2.	RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS	98
Capítulo 8.	PUBLICACIONES PROPIAS RELACIONADAS CON LA TESIS	100
Capítulo 9.	BIBLIOGRAFÍA	101
Anexo I.	ENSAYOS VIGA 4BT.....	106
Anexo II.	TRAMOS DE CALIBRACIÓN.....	125
Anexo III.	SALIDAS BACKVIDE – AJUSTE DE MODELOS.....	157

Índice de Figuras

Figura 1.1.	Evolución de la Fisuración	2
Figura 1.2.	Shift Factor entre Ley de Falla en Laboratorio y en Campo	4
Figura 1.3.	Esquema genérico del Modelo en Condiciones Iniciales	6
Figura 1.4.	Esquema temporal genérico del Modelo en Condiciones Incrementales	7
Figura 2.1.	Ley de Fatiga (Curva de Wöhler)	20
Figura 2.2.	Parámetros Ensayo de Fatiga mezclas asfálticas	21
Figura 2.3.	Esquemas de Ensayos de laboratorio – Fatiga en mezclas asfálticas	22
Figura 2.4.	Evolución del esfuerzo según el número de ciclos de carga en función del tipo de ensayo	27
Figura 2.5.	Fases del Ensayo de Fatiga	28
Figura 2.6.	Vida de Servicio en Ensayo de Fatiga	29
Figura 2.7.	AASHTOWare – Porcentaje de fisuras en función del daño acumulado	44
Figura 2.8.	Distribución lateral de las cargas y ecuación de integración de cada período.	48
Figura 2.9.	Esquema submodelo climático BackViDe	49
Figura 2.10.	BackViDe Modelo Incremental – Porcentaje de fisuras en función del daño acumulado	55
Figura 3.1.	Foto y esquema del ensayo de la viga a fatiga 4PBT	57
Figura 3.2.	Resultados de Ensayo Viga 4PBT para diferentes tipos de mezclas	60
Figura 4.1.	Determinación del N_{FEQUIV} para ϵ_{16} del modelo incremental a partir de ensayo 4PBT	64
Figura 4.2.	Esquema de la metodología de calibración utilizada	67
Figura 4.3.	Resultado del retroajuste modular obtenido para Tramo S11	70
Figura 4.4.	Estructura del Tramo S11 BackViDe Condiciones Incrementales	71
Figura 4.5.	Parámetros de las Leyes de Falla de cada capa adoptados luego del ajuste	71
Figura 4.6.	Comportamiento de superficie con parámetros ajustados para el tramo T11	72
Figura 4.7.	Fisuración estimada versus medida para el conjunto de tramos	73
Figura 4.8.	Vista del equipo de Rueda Cargada del IMAE y gráfica con parámetros típicos	77
Figura 4.9.	Comportamiento de diferentes mezclas asfálticas en el ensayo WTT	78
Figura 4.10.	Variación del coeficiente B con la temperatura	79
Figura 6.1.	Hoja V_Defecto. Introducción resultados ensayo 4PBT	87

Figura 6.2.	Hoja Léame. Determinación parámetros criterio de fatiga	88
Figura 6.3.	Hoja V_Defecto. Definición de materiales. Mezclas asfálticas disponibles en BackViDe	89
Figura 6.4.	Resultado del retroajuste modular obtenido. Estructura característica.....	92
Figura 6.5.	Estructura del tramo a lo largo de los años.....	93
Figura 6.6.	Ecuaciones de Módulo de las mezclas asfálticas	93
Figura 6.7.	Criterios de Fallas de las capas estructurales	93
Figura 6.8.	Comportamiento en servicio medido y estimado. Tramo de validación.....	95

Índice de Tablas

Tabla 3.1.	Características generales de las Mezclas Asfálticas de referencia	58
Tabla 3.2.	Parámetros ensayo 4PBT para cada tipo de mezcla	60
Tabla 4.1.	Parámetros del Criterio de Fatiga en Modelo Incremental para Mezcla Convencional calibrada de referencia	62
Tabla 4.2.	Determinación de $\epsilon_{16\text{ DET}}$ para las Mezclas Asfálticas ensayadas en 4PBT..	64
Tabla 4.3.	Determinación de ϵ_{16} para distintas Mezclas Asfálticas BackViDe.....	65
Tabla 4.4.	Detalle características de los tramos homogéneos utilizados para la calibración	68
Tabla 4.5.	Estructura de pavimento existente. Tramo S11	69
Tabla 4.6.	Número de eje equivalentes anuales por carril. Tramo S11	69
Tabla 4.7.	Variación a lo largo de los años, de indicadores del estado característicos. Tramo S11	70
Tabla 4.8.	Valores calculados de <i>Shift Factor</i> y $\epsilon_{16\text{ CALIBRADO}}$ para cada Tramo	74
Tabla 4.9.	Parámetros ensayo WTT para diferentes tipos de mezclas asfálticas	78
Tabla 4.10.	Valores f_4 por defecto para cada tipo de material	81
Tabla 4.11.	Valores f_1 para cada Tramo de calibración	82
Tabla 5.1.	Valores normalizados de <i>Shift Factor</i> ($\log N_{\text{et}6}$) de cada Tramo de calibración	83
Tabla 5.2.	Intervalos de Confianza de <i>Shift Factor</i> para distintos niveles de significancia	85

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Fisuración por Fatiga de las Mezclas Asfálticas

Los tipos de fallas estructurales más frecuentes que presentan los pavimentos flexibles son la acumulación de deformaciones permanentes en todas las capas que componen la estructura (ahuellamiento) y la fisuración de las capas asfálticas. Esta fisuración puede darse por fatiga, por esfuerzos térmicos o por la reflexión de grietas subyacentes.

Las fisuras de fatiga se originan por una repetición de aplicaciones de carga que impone el tránsito circulante. Dichas cargas, inducen la acción reiterada de esfuerzos de flexión (tensiones o deformaciones) de menor valor que las vinculadas a la resistencia última del material, y que conducen a un deterioro progresivo de las propiedades estructurales del mismo.

La aplicación de estos esfuerzos, generan inicialmente la formación de microfisuras en el interior de las mezclas. Ante la repetición de este estado de tensiones o deformaciones, se produce la unión de estas microfisuras, formando así macrofisuras, las cuales progresan hasta producir la ruptura del material.

La fisuración debido a fatiga, se inicia por la máxima deformación unitaria por tracción, generalmente en las fibras inferiores de las capas asfálticas, y por consiguiente se propagan de abajo hacia arriba, hasta alcanzar la superficie de rodamiento. Se manifiestan como una o más fisuras lineales, generalmente longitudinales, emplazadas en las huellas ya que es la zona de la calzada mayormente solicitada.

La aparición de fisuras en las capas asfálticas desencadena una sinergia con otros aspectos conduciendo a un deterioro acelerado de toda la estructura. Se motiva un aumento de esfuerzos en el resto de los materiales, y a través de estas fisuras comienza el ingreso de agua a las capas subyacentes, generalmente de materiales no ligados, produciendo la degradación de las mismas. Este efecto, se ve finalmente reflejado en el estado general de la calzada, impactando directamente en la seguridad y confort en la circulación; como también en las tareas de mantenimiento y reparación necesarias para dotar nuevamente a la misma de una serviciabilidad adecuada.



Figura 1.1. Evolución de la Fisuración

Por lo antes expuesto, resulta relevante poder predecir con la mayor precisión posible la aparición y evolución de este tipo de deterioro, a partir de la aplicación de métodos de diseño que tengan en cuenta las propiedades, características y ensayos de desempeño de las mezclas asfálticas habitualmente utilizadas.

A tal efecto, los métodos de diseño idóneos a emplear resultan los empíricos mecanicistas, los cuales se basan en la determinación en distintos puntos del pavimento de los esfuerzos que, introducidos en diferentes leyes de falla, permitan establecer si para el período de proyecto, los deterioros del pavimento se mantendrán dentro de ciertos límites de aceptabilidad que no afecten considerablemente el nivel de servicio ofrecido al usuario. Por tanto, para conocer estas leyes de falla de cada una de las capas que componen la estructura, se recurre a ensayos de desempeño en laboratorio y su posterior calibración a las condiciones reales de comportamiento en el campo.

En este sentido, el estudio y caracterización de las fallas por fatiga debido a cargas dinámicas, ha llevado al desarrollo de ensayos de laboratorio que tratan de reproducir el proceso de deterioro. En todos los casos, se genera en algún punto o superficie de las probetas a ensayar, solicitaciones de tracción.

En la actualidad, este estado de tensiones o deformaciones a los que se someten las probetas son aplicados un número suficiente de veces hasta producir la rotura o un grado determinado de degradación del material. Se logra a través de alguna de estas metodologías de ensayo:

- Tracción directa
- Compresión
- Flexión de una viga empotrada en su base (Viga de 2 puntos)

- Flexión de una viga simplemente apoyada sobre dos puntos y carga central (Viga de 3 puntos)
- Flexión de una viga simplemente apoyada sobre dos puntos y dos cargas en los tercios de la misma (Viga de 4 puntos, 4PBT)
- Torsión
- Tracción indirecta

Los resultados de estos ensayos, son expresados generalmente a través de las curvas de Wöhler, las cuales resultan diagramas que relacionan las tensiones o deformaciones fluctuantes impuestas en las probetas con el número de sollicitaciones que determinan el fin del ensayo, ya sea éste el que corresponde a la rotura de las mismas o a un estado de daño seleccionado arbitrariamente asociado a un dado porcentaje de fisuras o una reducción del módulo de deformación. [1].

Estas leyes de fatiga, toman la forma de una ecuación potencial en la que se vincula el esfuerzo (tensión o deformación) con el número de repeticiones que determina el fin del ensayo, siendo dicha expresión genérica:

$$\varepsilon_0 \text{ o } \sigma_0 = k_1 N_f^{k_2} \quad (1.1)$$

Donde:

ε_0 : Deformación de tracción en la ubicación crítica

σ_0 : Tensión de tracción en la ubicación crítica

N_f : Número de repeticiones para la falla

k_1, k_2 : constantes de calibración en laboratorio

Los criterios de falla que surgen de los ensayos de laboratorio no pueden ser directamente aplicados en los métodos de diseño de pavimentos, requiriéndose un proceso de calibración. Esto es consecuencia entre otros aspectos del conjunto de simplificaciones que se realizan en el modelo apartándolo de la realidad.

Las principales diferencias entre las condiciones en laboratorio y el comportamiento en campo, resultan:

- Modo de carga
- Frecuencia de las sollicitaciones
- Punto de aplicación de las cargas (deriva lateral)
- Temperatura

- Estado e historia de tensiones
- Períodos de descanso (*healing*)
- Envejecimiento

Lo antes expuesto, conlleva a la necesidad de obtener, para definir las leyes de fatiga de las mezclas asfálticas, un coeficiente de ajuste o *shift factor*.

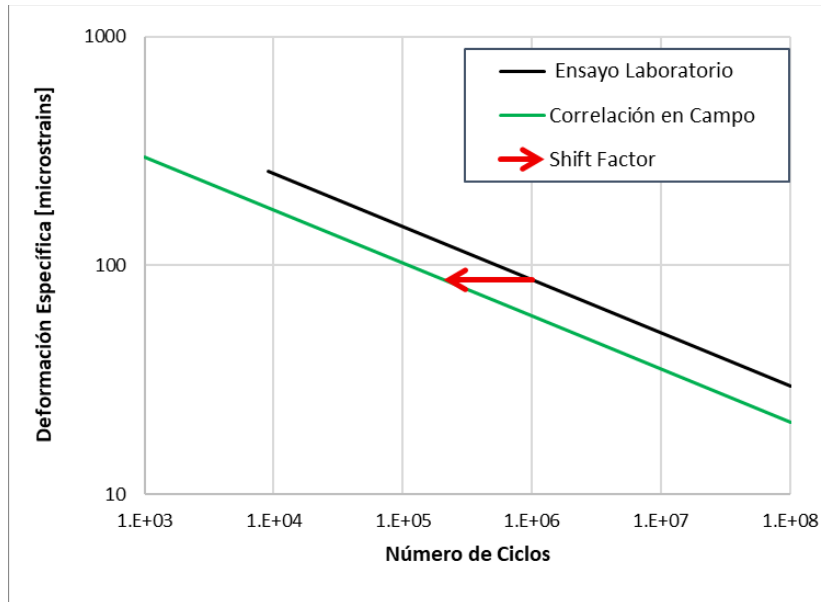


Figura 1.2. Shift Factor entre Ley de Falla en Laboratorio y en Campo

Por tanto, en la presente tesis, se pretende determinar estos coeficientes de ajustes utilizando diferentes tipos de mezclas asfálticas, a fin de obtener leyes de fatiga a ser incorporadas a un método de diseño empírico mecanicista argentino como es el BackViDe.

1.2. Los Métodos de Diseño Empírico Mecanicistas

Es sabido que la construcción y rehabilitación de carreteras es una de las industrias con mayor consumo de recursos y materiales en el mundo, con el consiguiente impacto que esto genera tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Para poder abordar esta temática, han surgido distintas estrategias entre las cuales se encuentran mejorar los diseños estructurales de los pavimentos (lograr espesores de capas más delgadas y con mayores vidas de diseño), utilizar mezclas asfálticas especiales como son las que incorporan asfaltos modificados o materiales reciclados, como también mezclas tibias o frías (menores temperaturas en el mezclado y compactación), desarrollar técnicas más eficientes de conservación de pavimentos, entre otras.

Es en este contexto, que a través de los años se han ido desarrollando métodos de diseño cada vez más sofisticados, que intentan lograr una mejor aproximación de la realidad, de

manera tal de obtener modelos capaces de predecir el comportamiento con cierta certidumbre, posibilitando así la verificación del mismo y/o la elección entre diferentes alternativas de diseño [2].

Estas metodologías resultan las empíricas mecanicistas, las cuales se basan en la mecánica estructural, a partir del cálculo de tensiones, desplazamientos y deformaciones producidas en las estructuras; vinculándolas con los criterios de fallas de cada una de las capas obtenidos a través de distintos tipos de experiencias (ensayos de laboratorio, ensayo a escala natural, y/o seguimiento de tramos en servicio). Estos criterios de fallas, junto a las funciones de transferencia, permiten inferir la evolución de los deterioros de los pavimentos en el tiempo (ahuellamiento, fisuración, rugosidad).

Los Métodos de Diseño Empírico Mecanicistas se pueden diferenciar a partir de las consideraciones realizadas en los mismos, tendientes a representar en ellos la compleja realidad del comportamiento en servicio. Se citan como ejemplo algunas de ellas [2]:

- Respecto a la evolución de la estructura: condiciones fijas (iniciales o ponderadas) o análisis incremental (consideración de la evolución en el tiempo)
- Respecto a la aplicación de las solicitaciones de tránsito:
 - Deriva lateral de las cargas o aplicación en una única línea de análisis
 - Número acumulado de reiteraciones de una carga de referencia o espectros de carga
- Respecto a la caracterización de los materiales:
 - Elástico lineal o No linealidad del módulo en los materiales no ligados; viscoelasticidad en materiales asfálticos.
 - Isotropía o Anisotropía

Por su trascendencia en la configuración general de los modelos de análisis, se resumirán a continuación los conceptos que diferencian a los modelos en Condiciones Iniciales de los en Condiciones Incrementales.

1.2.1. Modelos en Condiciones Iniciales

Los modelos en Condiciones Iniciales plantean el cálculo de las solicitaciones del tránsito con la estructura en condiciones íntegras, sin deterioro y bajo la condición climática media. Los módulos de cada capa son globales o ponderados en todo el período de análisis. Luego a partir de solicitaciones críticas, se plantean criterios de falla que los vinculan con un determinado grado de deterioro adoptado en cada uno de ellos.

MODELO ESTRUCTURAL

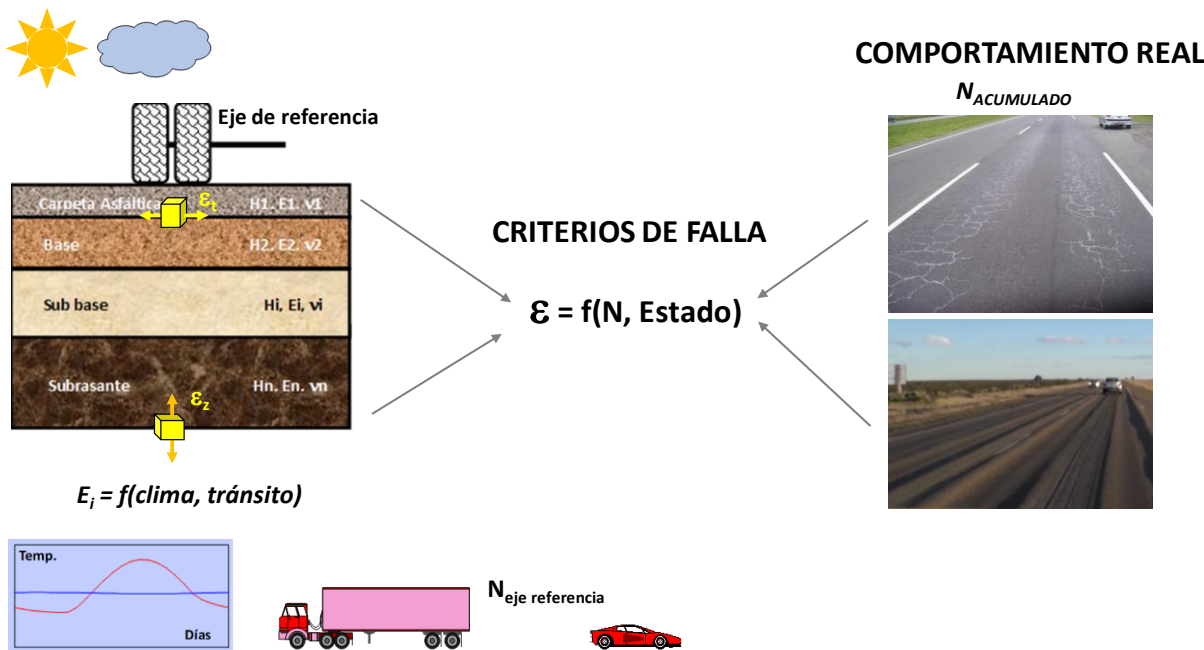


Figura 1.3. Esquema genérico del Modelo en Condiciones Iniciales

Este análisis es el que habitualmente se realiza en los métodos mecanicistas clásicos, y que se encuentra más difundido mundialmente (por ejemplo: CYRCLE de Austroads, LCPC-SETRA de Francia, SAMDM de Sudáfrica).

1.2.2. Modelos en Condiciones Incrementales

Los modelos en Condiciones Incrementales consideran a la estructura como un ente que evoluciona a lo largo de la vida en servicio, planteando el progresivo deterioro de los materiales. Los mismos realizan un proceso por intervalos de tiempo (resolución mediante incrementos finitos) que consideran las alteraciones que producen la historia de tensiones acumuladas de los intervalos anteriores, el clima y el tránsito en dicho intervalo.

Este análisis temporal permite, además, tener en cuenta otros aspectos que se modifican con el paso del tiempo y los ciclos de carga acumulados sobre los materiales, y que influyen en el comportamiento de la estructura respecto al considerado en condiciones iniciales, como son entre otros:

- Deterioro modular de los materiales ligados
- Redistribución de tensiones
- Aparición y progreso de fisuras
- No linealidad en la acumulación de deformaciones plásticas
- Curado de materiales emulsionados o con ligantes hidráulicos

- Envejecimiento de las mezclas asfálticas
- Variación de los efectos dinámicos con el deterioro

En cuanto a los criterios de falla, estos métodos consideran el daño por fatiga de los períodos precedentes, acumulándolos siguiendo en general la ley de Miner. Para representar la historia de solicitaciones por acumulación de deformaciones permanentes, se considera la deformación plástica acumulada.

Finalmente, las condiciones de los diferentes deterioros de superficie considerados en el modelo se calculan, en cada período incremental, mediante las funciones de transferencia.

En la Figura 1.4 se muestra un esquema temporal genérico de este tipo de modelos, en donde se pueden apreciar las interacciones requeridas.

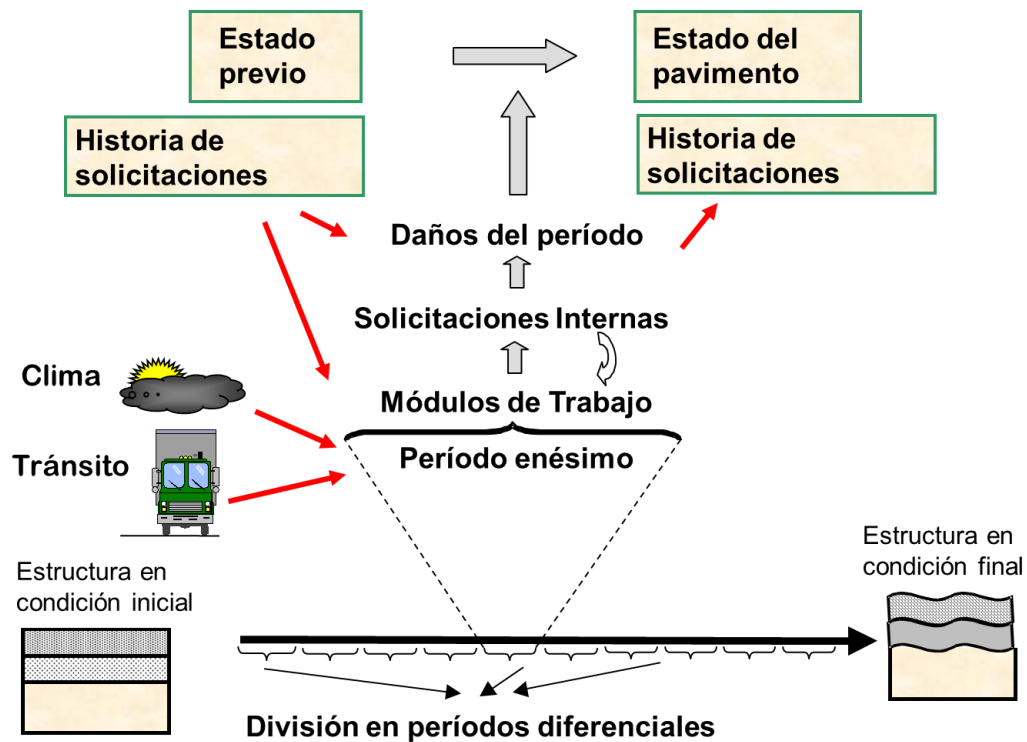


Figura 1.4. Esquema temporal genérico del Modelo en Condiciones Incrementales

Fuente: Modelos obtenidos para el cálculo de pavimentos [2]

En particular, la metodología de este tipo más reconocida y aplicada, resulta la Guía Mecanicista-Empírica de Diseño de Pavimentos (MEPDG *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), desarrollada por la Oficina Estatal de Transportes y Carreteras de Estados Unidos, la cual se basó en los resultados del proyecto de investigación de la NCHRP 1-37A [3].

En este mismo sentido, desde finales de la década del '80 en el Laboratorio Vial del IMAE, se ha desarrollado y se viene calibrando un método de diseño empírico mecanicista

ajustado a las condiciones y materiales de nuestra región, como es el BackViDe, el cual permite efectuar el análisis tanto en Condiciones Iniciales como Incrementales [4].

Por consiguiente, esta metodología de desarrollo local es la que se empleará y recalibrará en la presente tesis.

1.3. Objetivos

La presente tesis tiene como objetivo el desarrollo de leyes de falla para la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas de uso habitual en las estructuras viales de Argentina, basadas en resultados del Ensayo de Fatiga en Viga a flexo-tracción (ensayo de 4 puntos – 4PBT). Estos criterios de fallas deberán tener en cuenta las propiedades de los materiales que componen las diversas mezclas a estudiar, como también el número de solicitaciones a las que las mismas están sometidas, de manera tal de representar lo más fehacientemente posible las condiciones reales a las que se encuentran en servicio.

En este sentido, se pretende efectuar la calibración de las leyes de fatiga obtenidas a través de los ensayos de laboratorio, a las condiciones de trabajo en el campo, empleando un método de diseño empírico mecanicista de uso local como es el BackViDe [5].

Los modelos de los distintos tipos de mezclas asfálticas finalmente obtenidos y calibrados, se incorporarán como Criterios de Falla en el modelo incremental del método de diseño empírico mecanicista BackViDe. De esta manera, se posibilitará la determinación ajustada de la vida útil de las estructuras y la predicción de la evolución de los deterioros en el tiempo (fisuración), con el correspondiente impacto tanto sobre la seguridad en la circulación de los usuarios, como también en la planificación de las tareas de rehabilitación de las calzadas.

Otro objetivo que motivó el enfoque dado a esta tesis, resultó que, si bien existen en nuestro país varios equipos de ensayos de viga a flexotracción en cuatro puntos, habitualmente los mismos sólo se utilizan para el diseño balanceado de mezclas asfálticas específicas, sin abordar el desarrollo de leyes de fatiga generales que permitan emplearse en los métodos de diseño de pavimentos. Por tanto, se pretende a través de este desarrollo, dar un valor agregado al equipamiento de ensayos disponible tanto en entes públicos (Vialidad Nacional, laboratorio LAPIV, Laboratorio de Investigaciones Viales de la UBA, Laboratorio Vial del IMAE) como privados (empresa privada COARCO y el Laboratorio de Asistencia Técnica de la empresa YPF).

1.4. Estructura de la Tesis

En el Capítulo 2 se efectúa una síntesis de los antecedentes disponibles y el estado de conocimiento actual, sobre la falla de fatiga por fisuración en los pavimentos asfálticos y el abordaje que hacen los distintos métodos de diseño sobre este tema. Se describe el mecanismo de falla por fisuración que sufren las estructuras frente al accionar de las solicitaciones de tránsito, planteando las diferencias existentes entre las carreteras en servicio y los ensayos de laboratorio. Se exponen brevemente los distintos procedimientos experimentales de aplicación en el mundo para el estudio y caracterización de las fallas por fatiga en las mezclas asfálticas, profundizando sobre los factores influyentes y los distintos condicionantes del ensayo. Se resume la evolución que experimentaron con el tiempo los criterios de fallas, para finalmente describir la forma en que se consideran los mismos dentro de los Métodos de Diseño Empírico Mecanicistas más difundidos en la actualidad.

En el Capítulo 3, se describe el programa experimental llevado adelante. Se detalla el tipo de ensayo de desempeño a fatiga utilizado de base. Se describen las características de las distintas mezclas asfálticas tomadas como referencia, haciendo especial hincapié en el tipo de ligante y en sus proporciones volumétricas. Por último, se presentan los resultados de los ensayos de viga a flexotracción en 4 puntos, asumidos como representativos de cada tipo de mezcla asfáltica.

En el Capítulo 4, se aborda el problema específico planteado, respecto de poder definir criterios de falla dentro del software BackViDe a partir de contar con resultados de ensayos de desempeño. En una primera instancia, se propone la forma de determinación del *Shift Factor* para vincular los resultados de los ensayos de laboratorio con el comportamiento real en servicio del pavimento. Para esto, se presentan los resultados alcanzados mediante una primera calibración. Luego, a partir de recabar información y definir nuevos tramos homogéneos, se efectuó un segundo ajuste que permitió definir un nuevo *Shift Factor*. En forma complementaria, se presentan las mejoras efectuadas sobre el modelo de ahuellamiento. En particular, para las mezclas asfálticas, se logró referenciar un ensayo de comportamiento muy utilizado en el ámbito vial como es el ensayo de rueda cargada (*Wheel Tracking Test*), con el criterio de falla por ahuellamiento de la metodología BackViDe.

El Capítulo 5 presenta un análisis estadístico, en el cual se muestra el cálculo de la desviación estándar del logaritmo del número de repeticiones obtenidos de los diferentes *Shift Factor* de cada sector estudiado. Además, se procede a comparar los coeficientes

obtenidos mediante ambas calibraciones, aplicando una prueba de hipótesis utilizando la distribución *t de Student*.

A partir del *Shift Factor* asumido como válido, en el Capítulo 6 se describen los procedimientos incluidos dentro de BackViDe para caracterizar una mezcla asfáltica dada, a partir de contar con resultados de distintos ensayos de caracterización. Se incluye además, como validación de los valores por defecto obtenidos, la aplicación de la versión del programa BackViDe2024 08 (la cual surge de las calibraciones desarrolladas en esta tesis), a un caso real de una ruta en servicio.

Finalmente, en el Capítulo 7, se plantean las conclusiones obtenidas del desarrollo de la tesis y se presentan una serie de consideraciones a tener en cuenta para estudios futuros.

En los Capítulos 8 y 9, se indican las publicaciones efectuadas y las referencias bibliográficas citadas en la tesis, respectivamente.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

BackViDe: Método de Diseño Empírico Mecanicista desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE, constituido por los subprogramas BACKMOD, VIDA y DETERIORO

4PBT: Ensayo de fatiga en viga a flexión con carga en cuatro puntos, nombrada así por sus siglas en inglés *Four Point Bending Test*

SF: factor de ajuste o corrimiento, por su expresión en inglés *Shift Factor*

ϵ_0 : deformación específica de tracción en la ubicación crítica en un ensayo de fatiga

σ_0 : tensión de tracción en la ubicación crítica en un ensayo de fatiga

Nf: número de repeticiones para la falla

MEPDG: Guía de Diseño Empírico Mecanicista, corresponde a sus siglas en inglés *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*

NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*, Programa Nacional de Investigación de Carreteras

IMAE: Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras

FCEIA: Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

UNR: Universidad Nacional de Rosario

LAPIV: Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de La Plata

UBA: Universidad de Buenos Aires

N ϵ : número de aplicaciones de carga aplicados en un ensayo de fatiga a deformación controlada

N σ : número de aplicaciones de carga aplicados en un ensayo de fatiga a tensión controlada.

ϵ : deformación impuesta, en un ensayo de fatiga a deformación controlada.

σ : tensión impuesta, en un ensayo de fatiga a tensión controlada.

Alfa ϵt : pendiente de fatiga y es una medida de la susceptibilidad de la mezcla a dicho fenómeno de deterioro (ϵt).

ϵ_{t6} : deformación específica de tracción que provoca la falla al cabo de un millón de ciclos de carga

E: módulo dinámico de las mezclas asfálticas

SCB: *Semi Circular Bending*, ensayo de viga semi circular

Ns: número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial en el ensayo a deformación controlada, o hasta la rotura en el ensayo a tensión controlada

E_0 : módulo de rigidez de la mezcla asfáltica inicial (medido en el ciclo 100 de un ensayo de fatiga)

E_N : módulo de rigidez en el ciclo N

D: Daño

Wn: energía disipada en el ciclo N

Ln: logaritmo neperiano

e: base de los logaritmos neperianos

SR: relación entre el módulo de rigidez en el ciclo N (E_N) y el módulo inicial (E_0)

ϵ_{fat} : deformación específica de fatiga, para ecuación de SHELL

Smix: módulo de rigidez de la mezcla asfáltica, para ecuación de SHELL

Va: volumen de vacíos de aire

Vb: volumen de cemento asfáltico

Nfat: número de ciclos hasta la fatiga

ϵ_t : deformación de tracción en la ubicación crítica

IP: índice de Penetración del cemento asfáltico

hac: espesor de mezcla asfáltica

δ : ángulo de fase de la mezcla (desfasaje entre tensiones y deformaciones para el estado de tensiones aplicado en el ensayo de fatiga)

VFB: relación betún vacíos (vacíos llenos con ligante)

SHRP: Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, por su sigla en inglés *Strategic Highway Research Program*

RF: factor de confiabilidad (para método Austroads)

$\epsilon_{t adm}$: deformación por tracción admisible en la base de la capa asfáltica

HVS: simulador de vehículos pesados, por su expresión en inglés *Heavy Vehicle Simulator*

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, es decir el Laboratorio Central de Puentes y Carreteras de Francia

SETRA: Servicio de Estudios Técnicos de Carreteras y Autopistas, por su sigla en francés *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*

θ_{eq} : temperatura equivalente

SAMDM: Método de Diseño Mecanicista Sudafricano, expresado en sus siglas en inglés (*South African Mechanistic Design Method*)

E_{AC} : módulo dinámico a compresión de la mezcla asfáltica

T: número total de períodos estacionales

N_i : repeticiones de una carga dada durante el período i

AASHTO: Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte, corresponde a sus siglas en inglés *American Association of State Highway and Transportation Officials*

LTPP: programa de seguimiento del comportamiento de carreteras durante tiempo prolongado llamado así por corresponder a las siglas en inglés *Long-Term Pavement Performance*

UCPRC: Centro de Investigación en Pavimentos de la Universidad de California, por sus siglas en inglés *University California Pavement Research*

DOT: Departamento de Transporte de Estado, por su sigla en inglés *Department of Transportation*

ω : daño por fatiga (programa CalME)

MN: número de repeticiones de la carga, en millones (programa CalME)

MNp: número de repeticiones de la carga hasta la falla, en millones. (programa CalME)

FSF: factor de transferencia de fatiga (programa CalME)

t_r : tiempo reducido

t : temperatura de diseño

Lanamme: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (UCR)

GDP 2024: Guía mecanística empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos de Costa Rica, en su versión 2024.

AT: área fisurada en porcentaje (método MeDINa)

N_{ADM} : número de reiteraciones admisibles en millones

F_{TD} : Factor Top Down, que minora las solicitaciones admisibles en el caso que éstas se produzcan en la superficie de la calzada

%Asf: porcentaje de asfalto en volumen de la mezcla asfáltica

%Fis: porcentaje de fisuras totales

Vr: vida remanente

Alfa ϵ_i : coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el nivel de deformaciones

Alfa E: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el módulo

Alfa Asf: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el porcentaje de asfalto.

E_{20-10} : módulo de la mezcla asfáltica a 20 °C y 10 Hz (MPa)

F_{TD} : factor asociado a fisuras iniciando desde la superficie (Top Down)

F_{CT} : factor asociado a la concentración de tensiones

D_D : diferencia de daños en la interface entre capas

F_{AD} : factor que atenúa la concentración de tensiones dada por la diferencia de daños

E_m : módulo a la edad m para el material sin daño (MPa)

$E_{Daño}$: módulo en la condición de daño del período (MPa)

F_{ed} : factor de ponderación

F_e : factor de envejecimiento

m: edad (meses)

m_e : coeficiente de envejecimiento (meses)

C_e : coeficiente de envejecimiento

$C_{d1}, C_{d2}, C_{d3}, E_{dmin}$: parámetros de la función de daño que caracterizan al material

Lf_i : longitud de fisuras del período i (mm)

Lf_{i-1} : longitud de fisuras del período anterior (mm)

ΔD_i : daño acumulado del material en el período i

C_{PF} : parámetro que caracteriza al material, velocidad de progreso de fisuras en milímetros por unidad de daño (mm)

Fis_{Tra} : porcentaje de fisuras por acción del tránsito

D_{iT} : daño en superficie para el período por tránsito

C_F, C_{Fe} : parámetros de calibración del sub modelo

CAC D: Concreto Asfáltico en Caliente Denso

CA30: ligante asfáltico convencional tipo CA30, clasificado por viscosidad según Norma IRAM 6835

AC 70-100: ligante asfáltico convencional tipo III, clasificado por penetración según Norma IRAM 6604

AM1: ligante asfáltico modificado tipo AM1, clasificado según Norma IRAM 6596

AM3: ligante asfáltico modificado tipo AM3, clasificado según Norma IRAM 6596

MAC F-10: Microaglomerado Asfáltico en Caliente tipo F

SMA: *Stone Mastic Asphalt*

HiMA: concreto asfáltico en caliente altamente modificado

MAAC: Mezcla Arena Asfalto en Caliente

RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*, pavimento asfáltico recuperado

SAE: Suelo Arena Emulsión

TAA: Tosca Arena Asfalto

Pen: Penetración

N_{EQUIV} : número de reiteraciones de cargas equivalentes en el ensayo 4PBT

DCP: *Dynamic Cone Penetrometer*, penetrómetro dinámico de cono

FWD: *Falling-Weight Deflectometer*, deflectógrafo dinámico por impacto

TMDA: Tránsito Medio Diario Anual

IRI: Índice Internacional de Rugosidad (m/km)

Se: desvío estándar

Log: logaritmo en base diez

ϵ_p : deformación específica permanente

ϵ_e : deformación específica elástica

Temp: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

WTT: *Wheel Tracking Test*, ensayo de rueda cargada

PRD: Profundidad media de la huella

WTS: Pendiente media de deformación expresada en mm/1000 ciclos de carga

H_{5000} : profundidad de huella obtenida a los 5.000 ciclos

H_{10000} : profundidad de huella obtenida a los 10.000 ciclos

h: altura de la probeta ensayada

Ah: profundidad de huella en el ciclo de carga N

ϵ_r : deformación axial específica resiliente

Mr: módulo resiliente

\bar{X} : media aritmética muestral

s: desviación estándar muestral

n: tamaño de la muestra

$t_{n-1;\alpha}$: valor de la distribución t para n-1 grados de libertad y un nivel de significancia α .

N_{80KN} : número acumulado de reiteraciones del eje estándar, equivalentes en efecto destructivo al espectro real de cargas, en un carril, y a lo largo del período de diseño

DNV: Dirección Nacional de Vialidad

D_0 : deflexión máxima, bajo la carga

RC: radio de curvatura

BLI: *Base Layer Index*, índice de capa de base a partir del cuenco de deflexiones

Frec: Frecuencia (Hz)

PAV: *Pressure Aging Vessel*, ensayo de envejecimiento en vasija a presión

RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*, ensayo de envejecimiento de película fina rotativa

Capítulo 2. ANTECEDENTES Y DESARROLLO TEÓRICO

2.1. Mecanismo de fisuración en mezclas asfálticas

La fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas resulta una falla del tipo estructural, ya que se debe a la repetición de las sollicitaciones que introduce el tránsito pasante.

Esta falla se produce para niveles de sollicitaciones muy por debajo de la resistencia a rotura del material, y no se presenta inmediatamente en superficie, sino que se manifiesta con el tiempo.

La acción reiterada de las cargas produce esfuerzos de tracción en diferentes puntos de la base de la capa asfáltica, los cuales originan una concentración de tensiones hasta la aparición de fisuras. Estas fisuras comienzan a interconectarse y propagarse en el espesor de la mezcla, produciendo una reducción paulatina de la sección útil del material, disminuyendo progresivamente sus módulos efectivos de trabajo y motivando esto una redistribución de las tensiones inducidas en toda la estructura. Esta variación de los esfuerzos es dependiente del aporte de estas capas asfálticas a la rigidez global de la estructura. Finalmente, se produce la fractura completa de la capa y por tanto se ponen de manifiesto en la superficie de rodamiento, en una primera instancia como fisuras lineales para que a medida que se repiten las cargas, ir interconectándose hasta conformar mallas cerradas identificadas como piel de cocodrilo. Este tipo de fisuras se las conoce habitualmente como *bottom up*.

Por otra parte, el mecanismo de fisuración que se da en los pavimentos en servicio, difiere del que se puede mensurar a través de los ensayos de laboratorio, como consecuencia de diferentes aspectos, de los que se citan a continuación los considerados más relevantes.

El entorno climático motiva variaciones a lo largo de toda su vida en servicio, tanto de las temperaturas de trabajo como de los contenidos humedad, parámetros que condicionan el comportamiento de toda la estructura y específicamente de los módulos de las mezclas asfálticas, mientras que en laboratorio se encuentran prefijados y controlados.

Las cargas de tránsito actuantes sobre un pavimento en servicio, son variables en sus valores de intensidad, frecuencia y configuración, como también en su distribución lateral (*wander*). En cambio, en los ensayos de laboratorio se emplean cargas preestablecidas, tanto en magnitud como frecuencia, y que siempre se aplican en un mismo punto. Por consiguiente, los esfuerzos que motivan la aparición y progreso de los deterioros de una estructura, difieren considerablemente entre ambos escenarios.

Otro aspecto vinculado a la repetición de cargas es el *healing* o auto reparación del daño en las mezclas. En pavimentos en servicio pueden transcurrir varios minutos entre la

aplicación de las cargas pesadas, lo que se traduce en períodos de reposo/descanso entre cargas/deformaciones, con la consecuente recuperación significativa del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Este efecto se ve favorecido, además, con el aumento de la temperatura.

El envejecimiento de las capas asfálticas por acción del clima es otro condicionante a tener en cuenta al momento de comparar el comportamiento de las mezclas in situ y en laboratorio. Este fenómeno genera una variación relativa del módulo de las capas asfálticas, especialmente en las de superficie. Por tanto, la acumulación de daño, no es lineal, sino que se acelera hacia el final de su vida útil.

Finalmente, se deben tener en cuenta cuáles son los criterios de falla asumidos en cada caso. Para los ensayos de laboratorio, el criterio de falla no está habitualmente relacionado a la ruptura de la probeta, sino que está vinculado al modo de ensayo. En los ensayos a tensión controlada, debido al deterioro del material, la deformación resultante se incrementa a medida que progresa el ensayo y por consiguiente la resistencia a fatiga del material se asocia al ciclo en que se produce la rotura del mismo. En los ensayos a deformación controlada, a medida que transcurre el ensayo la tensión aplicada disminuye y por lo tanto no se alcanza la rotura completa del material. En este tipo de ensayos, el fallo a fatiga se vincula a la caída del módulo de la mezcla asfáltica ensayada.

Por su parte, en una carretera en servicio, la condición final de su vida útil no viene dada por los criterios empleados en laboratorio, sino que está vinculada a un estado de severidad o porcentaje de calzada fisurada.

Algunos de estos aspectos pueden ser considerados en los modelos de comportamiento mecanicistas, planteando diferentes aproximaciones a la realidad del complejo proceso en la estructura y su vinculación con los ensayos de laboratorio. Ocasionando dificultad para extrapolar las conclusiones obtenidas en el modelo, sin un profundo conocimiento de las diferencias en las hipótesis de cada metodología.

En particular el modelo BackViDe, en su opción incremental permite, entre otros aspectos, modelar la dispersión lateral de las cargas, la variación de agresividad con el nivel de rugosidad, el envejecimiento de la carpeta de rodamiento, el inicio de la fisura, su propagación dentro de la estructura hasta la superficie y la vinculación del daño de la capa de rodamiento con la gravedad del estado de fisuración.

2.2. Leyes de Fatiga

El conocer el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es básico para proceder al dimensionamiento del pavimento a partir del empleo de los actuales y más sofisticados métodos de diseño como son los Empíricos Mecanicistas. Además, se debe tener en cuenta que las leyes de fatiga empleadas en estos métodos de dimensionamiento, pueden estar influidas por el proceso y criterio de ensayo utilizado en su determinación.

Desde los primeros estudios sobre la falla por fatiga en metales (Wöhler 1852) se dedujo que podía establecerse una relación entre la tensión o deformación impuesta y el número de ciclos hasta la ruptura o falla del material: Estas relaciones conocidas como Curvas de Whöler o Curvas S-N, pueden representarse en una escala doble logarítmica (Figura 2.1), dando como resultado una línea llamada Ley de Fatiga y que está definida por las siguientes expresiones matemáticas [6]:

$$\log \varepsilon = a - b \log N_{\varepsilon} \quad (2.1)$$

$$\log \sigma = c - d \log N_{\sigma} \quad (2.2)$$

Donde:

N_{ε} , N_{σ} : número de aplicaciones de carga aplicados en un ensayo de fatiga a deformación o tensión controlada.

ε : deformación impuesta, en un ensayo de fatiga a deformación controlada.

σ : tensión impuesta, en un ensayo de fatiga a tensión controlada.

a , b , c y d : características del material ensayado.

Estos modelos son denominados genéricamente como “leyes fenomenológicas” por cuanto vinculan una causa (la tensión o la deformación aplicada reiteradamente) con el efecto del número de ciclos soportados hasta alcanzar la rotura. Estos modelos están basados en las condiciones iniciales de ensayo, pero no tienen en cuenta el daño que se acumula durante el proceso de fatiga [7].

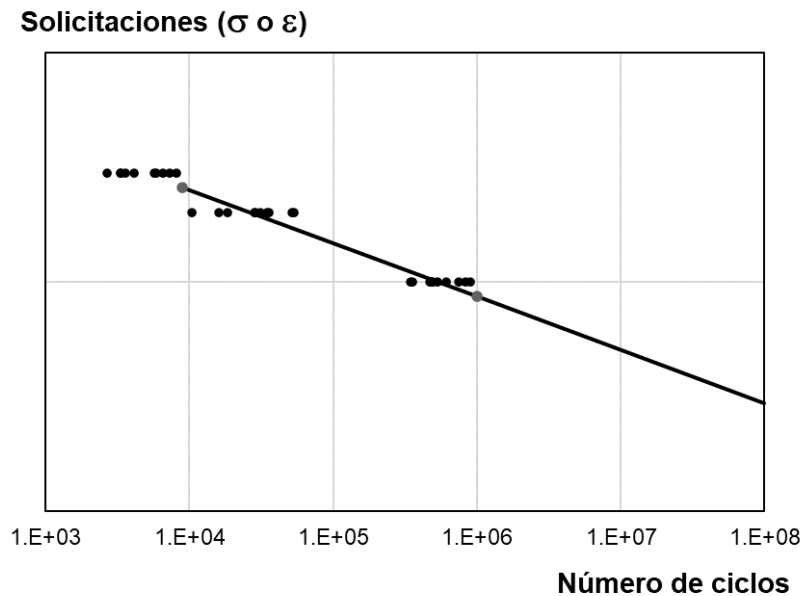


Figura 2.1. Ley de Fatiga (Curva de Wöhler)

Esta misma ley ha sido también empleada en el análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, donde se aplicaron diferentes tipos de ensayo, fundamentalmente a flexotracción.

En este sentido, a principios de la década de 1960 Monismith et al. [8] y Pell [9], han expresado los resultados de estos ensayos según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_t = A N f^{\left(\frac{1}{\text{Alfa} \varepsilon_t}\right)} \quad (2.3)$$

Donde A y Alfa ε_t son constantes que surgen de los ensayos.

La ecuación descripta corresponde a una línea recta, en la cual el parámetro Alfa ε_t se denomina “pendiente de fatiga” y es una medida de la susceptibilidad de la mezcla a dicho fenómeno de deterioro.

Finalmente, se destaca que, para definir habitualmente la ley de fatiga de la mezcla bituminosa, se consideran dos parámetros fundamentales como son el ε_{t6} y el Alfa ε_t . El valor de ε_{t6} representa la deformación específica de tracción para la que resulta una vida de fatiga de un millón de ciclos de carga (Figura 2.2).

Deformación específica (microstrain)

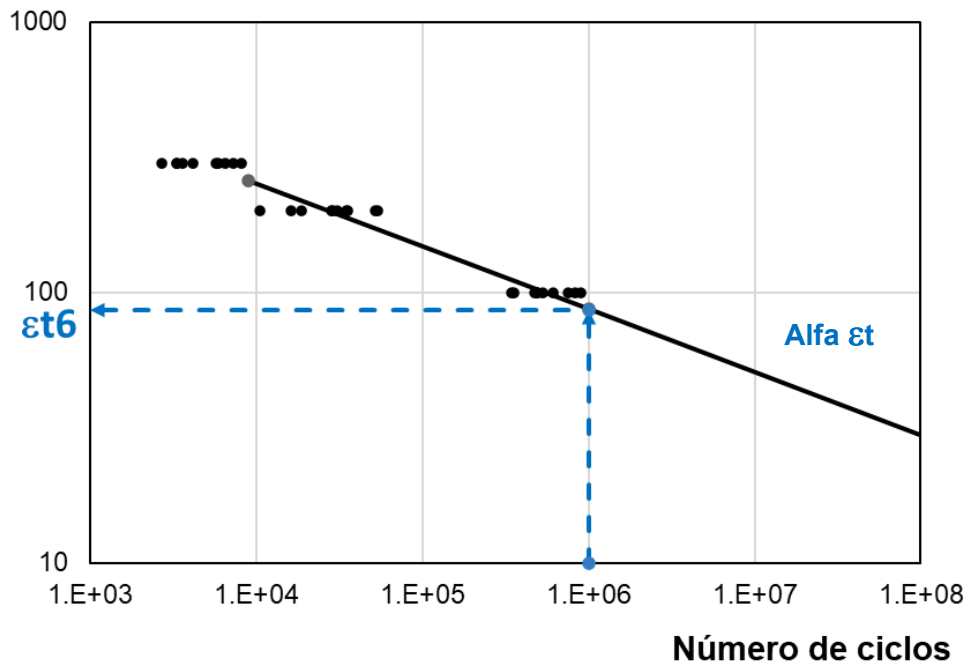


Figura 2.2. Parámetros Ensayo de Fatiga mezclas asfálticas

2.3. Procedimientos experimentales

El estudio y caracterización de las fallas por fatiga debido a cargas dinámicas, ha llevado al desarrollo de ensayos de laboratorio que traten de reproducir el problema. En todos los casos, se genera en algún punto o superficie de las probetas a ensayar, esfuerzos de tracción. Este estado de tensiones o deformaciones a los que se someten las probetas son aplicados en forma cíclica y en un número suficiente de veces, de manera tal que permitan conocer la evolución de las propiedades de los materiales, y producir un dado deterioro en los mismos.

Los tipos de ensayos de laboratorio más difundidos para la determinación de las leyes de fatiga son los esquematizados en la Figura 2.3.

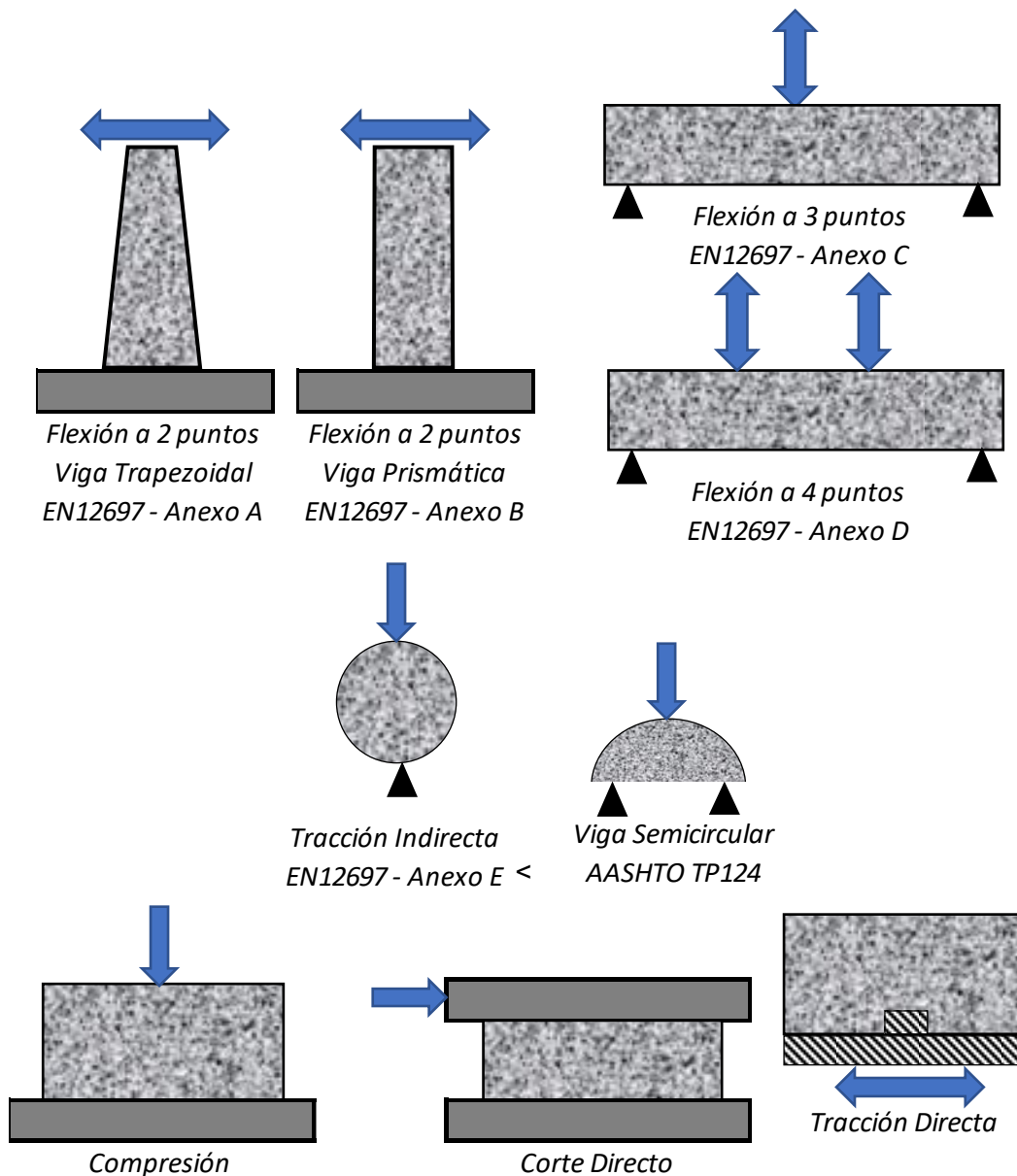


Figura 2.3. Esquemas de Ensayos de laboratorio – Fatiga en mezclas asfálticas

2.3.1. Tipos de Ensayos de Fatiga

Se describen resumidamente algunos de los ensayos a fatiga más difundidos.

En una primera instancia, se describen los establecidos en la Norma de ensayo Europea EN 12697-24 [10]. Los mismos, se diferencian entre sí en la forma de la probeta, la manera de aplicar la fuerza y los puntos de apoyo.

Ensayo de fatiga a flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales:

Este método se describe en el Anexo A de la Norma EN 12697-24, y caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga con un desplazamiento controlado por flexión en dos puntos, utilizando probetas de forma trapezoidal isósceles. Dichas probetas se fijan en su base mayor y se procede a la

aplicación de la carga en el otro extremo de la muestra, la cual consiste en un desplazamiento sinusoidal con una frecuencia fija (generalmente 25 Hz). El procedimiento se debe realizar sobre diversos elementos, ensayados en una atmosfera ventilada y a una temperatura controlada. La forma particular de la probeta posibilita que el esfuerzo máximo se produzca fuera de la zona de empotramiento.

Este método puede ser utilizado para 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. Para mezclas con una granulometría máxima, comprendida entre 20 mm y 40 mm, el ensayo puede realizarse utilizando el mismo principio, pero adaptando las medidas de las probetas.

Ensayo de fatiga a flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas:

Este ensayo se detalla en el Anexo B de la Norma EN 12697-24. El método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga por flexión (flexotracción) en dos puntos, utilizando probetas prismáticas cuadradas. La carga a aplicar resulta un desplazamiento sinusoidal en la cabeza de la muestra con una frecuencia fija (25 Hz). La prueba se realiza con al menos 3 niveles de tensión con un mínimo de 6 repeticiones por nivel.

Este método puede ser utilizado para 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.

Ensayo de fatiga a flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas:

Esta modalidad de ensayo se encuentra desarrollada en el Anexo C de la ya mencionada norma.

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga con desplazamiento controlado en tres puntos, utilizando probetas prismáticas. El comportamiento se caracteriza mediante la determinación de la ley de fatiga en términos de deformación (relación entre la deformación y el número de ciclos de carga en el momento de la rotura) y la ley de energía asociada.

El ensayo consiste en aplicar un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante en el punto medio de la luz de una probeta en forma de viga apoyada en ambos extremos. Si bien, no se logra un estado de flexión pura en el centro de la viga, se alcanza un esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la probeta que permite estimar la resistencia a la flexión.

El resultado se obtiene de la correlación de la deformación inicial máxima en la sección media de la viga y el número de ciclos necesarios para reducir a la mitad la rigidez inicial de la muestra.

Este método puede ser utilizado para mezclas bituminosas con áridos de granulometría máxima de 22 mm, sobre probetas preparadas en el laboratorio u obtenidas del pavimento con un espesor de 50 mm como mínimo. Para una frecuencia de desplazamiento sinusoidal dada, el método debe realizarse sobre diversos elementos ensayados a una temperatura controlada.

Ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas:

Este ensayo se encuentra detallado tanto en el Anexo D de la Norma EN 12697-24, como también en la Norma AASHTO T321.

El método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga, a partir de probetas prismáticas rectangulares esbeltas y utilizando un equipo de ensayo de flexión en cuatro puntos, en el cual las mordazas interiores y exteriores están colocadas simétricamente. Las vigas prismáticas son sometidas a cargas periódicas de flexión en cuatro puntos, con rotación y traslación libres en todos los puntos de la carga y de la reacción de éstas. La flexión se realiza por la aplicación de la carga en dos puntos interiores (mordazas interiores), en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta; mientras que se mantienen fijas en su posición vertical a las mordazas exteriores. Esta configuración de carga crea un momento constante y, por tanto, una deformación constante, entre las dos abrazaderas interiores. La carga aplicada resulta sinusoidal. Durante el ensayo se miden en función del tiempo, la carga necesaria para la flexión de la probeta, la deflexión y el desfase entre estas dos señales. Las características de fatiga del material ensayado se determinan finalmente a partir de estas mediciones.

Se efectúan varios ensayos de probetas en atmósfera ventilada, a temperatura controlada para una frecuencia determinada de aplicaciones de carga sinusoidal.

Ensayo de tracción indirecta en probetas cilíndricas:

Este método se describe en el Anexo E de la norma europea, y caracteriza el comportamiento de mezclas bituminosas bajo ensayos de fatiga aplicando repeticiones de una carga constante por tracción indirecta. Esta tipología de ensayo se diferencia de los anteriores en que se genera un estado biaxial de tensiones. Las probetas cilíndricas se exponen a cargas de compresión repetidas a través del plano diametral vertical. Esta carga desarrolla un esfuerzo de tracción relativamente uniforme perpendicular a la dirección de

la carga aplicada y a lo largo del plano vertical, lo que hace que la muestra falle al dividirse en la parte central de la probeta, en coincidencia con el diámetro. Se mide la deformación horizontal resultante de la muestra y se aplica la relación de Poisson adoptada para calcular la deformación por tracción en el centro de la misma. La vida útil a fatiga se define como el número total de aplicaciones de carga antes de que se produzca la fractura de la muestra. En esta prueba se puede utilizar una probeta cilíndrica fabricada en un laboratorio o un testigo extraído de una capa de un pavimento existente.

Ensayo de Viga Semicircular (SCB):

En forma complementaria, se menciona además brevemente el ensayo en Viga Semicircular. Si bien no es específicamente un ensayo a fatiga, actualmente está siendo muy utilizado para determinar la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas, debido a su simplicidad y rápida ejecución. Este tipo de ensayos ha formado parte de recientes estudios de investigación llevados adelante por el Dr. Ignacio Zapata Ferrero (UTN, Facultad Regional de La Plata [11]).

Estos ensayos responden a la norma AASHTO TP 124-18 y consisten en someter vigas semicirculares simplemente apoyadas, a una carga estática constante (a una velocidad de 50 mm/min y a una temperatura preestablecida) en el centro de la luz. La distancia entre apoyos es de 80% la longitud del diámetro. Además, se debe efectuar una entalladura en el centro de la probeta a fines de guiar el proceso de fisuración. El resultado del ensayo consiste en obtener la energía de fractura, la cual se calcula como el área bajo la curva carga-deformación [12].

Dentro de las ventajas que presenta este tipo de ensayos, se encuentran la velocidad de ejecución y la posibilidad de utilizar las probetas confeccionadas mediante el compactador Marshall, o bien testigos extraídos de la carretera.

2.3.2. Factores Influyentes

Las leyes de fatiga no resultan únicas para cada mezcla asfáltica, ya que los resultados que se obtienen de cada tipo de ensayo, difieren entre sí debido a una serie de factores. Estos factores se dividen en tres grupos [1, 13]:

a) Factores de Carga

- Modo de solicitación: tipo de ensayo y forma de distribución geométrica de la solicitación dentro de la probeta

- Nivel de sollicitación: Tiene en cuenta que, a mayores sollicitaciones, el número de ciclos alcanzados hasta la falla, resulta menor.
- Distribución del tiempo de Cargas: Considera el intervalo entre sollicitaciones sucesivas (continua o intermitente, es decir con períodos de descanso entre las aplicaciones de la carga), la forma del pulso de carga (triangular, rectangular) y la duración de la sollicitación.
- Método de ensayo propiamente dicho, el cual tiene en cuenta el tipo de sollicitación (flexión, tracción, corte) y el modo en que se aplica dicha sollicitación (a tensión controlada o a deformación controlada).

b) Factores de Formulación

- Agregados minerales: está relacionado con el tamaño máximo de la mezcla y su distribución granulométrica.
- Forma de las partículas, Textura superficial y Angularidad.
- Ligante asfáltico: se considera lo referido al tipo (convencional, modificado), la viscosidad del mismo y la cantidad o porcentaje presente en la mezcla.
- Contenido de Vacíos. Porcentaje, tamaño de estos vacíos y su distribución dentro de la mezcla (por ejemplo, la presencia de vacíos de mayor tamaño y menos distribuidos en la mezcla, puede resultar en una concentración de esfuerzos que acelere el fenómeno de fatiga).
- Densidad de la mezcla asfáltica

c) Factores ambientales

- Temperatura: este parámetro modifica las propiedades del cemento asfáltico que compone la mezcla.
- Humedad
- Alteración de las propiedades: Edad (envejecimiento), Curado o maduración, y Densificación de la mezcla asfáltica.

A partir de diferentes estudios efectuados a través de los años, se concluye que los factores más influyentes resultan el nivel de sollicitaciones, el modo de sollicitación, la temperatura y los parámetros de formulación de las propias mezclas asfálticas (tipo de cemento asfáltico y contenido de vacíos) [1].

2.3.3. Condiciones de ensayo a fatiga. Modos de Carga

En los ensayos antes mencionados, se utilizan dos tipos de señales de carga: solicitaciones sinusoidales en fuerza o solicitaciones sinusoidales en desplazamiento. En relación a la condición en servicio, el tipo de sollicitación más representativa depende del espesor de la capa y de su rigidez relativa al conjunto del paquete estructural.

En el primer caso, tensión controlada, corresponde a ensayos de fatiga en que se mantiene constante la tensión o la carga impuesta al material. Normalmente se va registrando la deformación producida, aunque esto no sea estrictamente necesario, 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 el segundo caso, se mantiene constante la deformación o desplazamiento impuesto, y se registra la evolución de la carga durante el ensayo. Se considera que se ha producido el fallo por fatiga cuando el módulo del material ensayado se reduce a la mitad.

ENSAYO A TENSIÓN CONTROLADA

ENSAYO A DEFORMACIÓN CONTROLADA

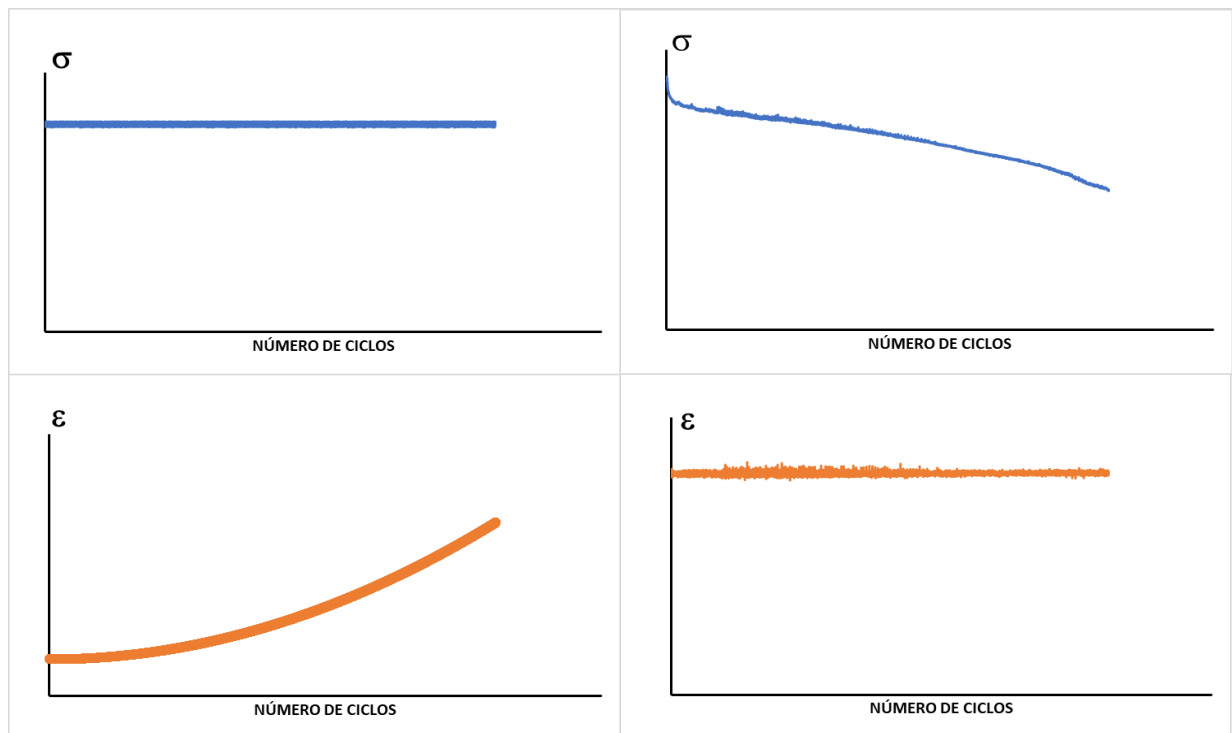


Figura 2.4. Evolución del esfuerzo según el número de ciclos de carga en función del tipo de ensayo

En general se verifica que, aquellos factores de formulación de las mezclas que tiendan a aumentar la rigidez de las mismas (viscosidad del asfalto, envejecimiento, etc) producen vidas de fatiga mayores cuando los ensayos son llevados a cabo en la modalidad de

tensión controlada, en tanto que producen menores vidas de fatiga cuando los ensayos son a deformación controlada [1].

Generalmente se considera que el modo de sollicitación de capas gruesas (espesores mayores a 15 centímetros), se asocia a tensión constante; mientras que para capas delgadas (espesores menores a 6 centímetros), el modo de sollicitación se aproxima a deformación controlada [14].

2.3.4. Evolución de las propiedades estructurales

Durante el ensayo de fatiga, independientemente de la sollicitación impuesta, se distinguen tres fases de evolución de las propiedades estructurales de las mezclas, en función del número de ciclos. Estas propiedades se representan a través de la medición del módulo de rigidez de las mismas.

En la primera fase, se produce un rápido descenso del módulo debido a que se produce un calentamiento de la mezcla por su comportamiento viscoso, dando lugar a una pérdida de módulo en el que también tiene influencia la tixotropía y fenómenos locales. La fase II es la que muestra una pérdida continua del módulo que es la que realmente se debería asociar con el proceso de fatiga. En esta fase es cuando se van produciendo los pequeños fallos y microfisuras en la mezcla, que al ir aumentando en densidad, dan lugar a la formación de macrofisuras. La fase III, conocida como de ruptura, se caracteriza por el rápido decremento del módulo de la mezcla. Se presentan zonas de concentración de esfuerzos y un desarrollo rápido de macrofisuras, de igual forma que la aparición de perturbaciones térmicas en los puntos de fisuración [6, 15].

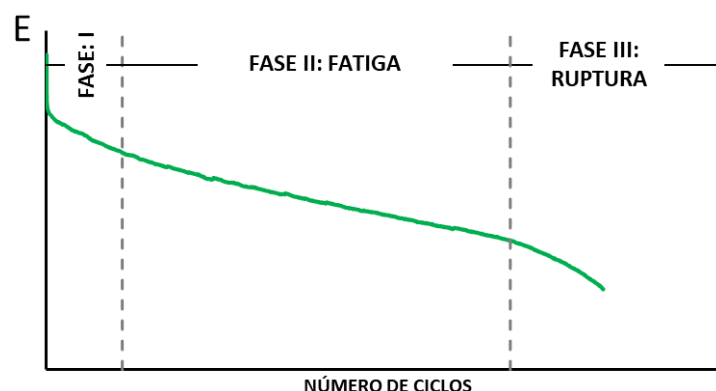


Figura 2.5. Fases del Ensayo de Fatiga

2.3.5. Criterios para definir el final de los ensayos

En la mayoría de los ensayos de laboratorio, la falla por fatiga no se produce en forma brusca, sino que tiene lugar un progresivo deterioro continuo del material sin alcanzar la rotura o fisuración completa de la probeta. Por tanto, resulta necesario definir un criterio que indique el fin del ensayo.

El criterio que se emplea en la mayoría de los ensayos que se realizan en nuestro país, resulta el "Tradicional o de Vida en Servicio", en el cual, la probeta se considera en "ruptura" si su módulo llega a la mitad de su valor inicial bajo las mismas condiciones de ensayo (misma temperatura y frecuencia). La vida útil (N_s) es entonces el número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial (medido en el ciclo 100 de carga).

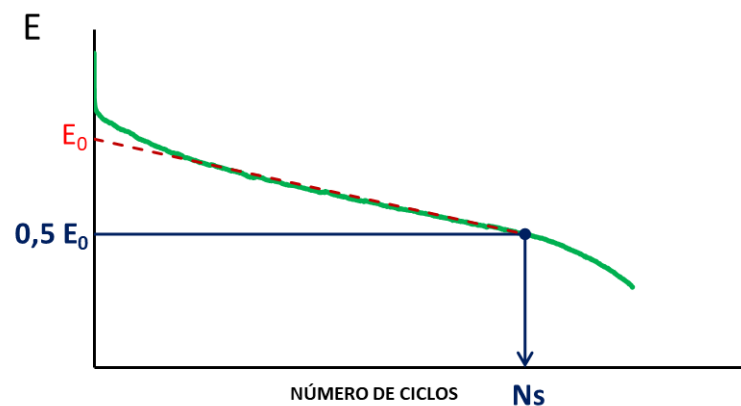


Figura 2.6. Vida de Servicio en Ensayo de Fatiga

Este enfoque tradicional, difiere del concepto de falla en una mezcla en servicio, dado que no se relaciona directamente con la fisura. Tampoco considera cambios en la condición del pavimento a lo largo de su vida en servicio, como ser la concentración de tensiones asociadas con el inicio y propagación de las fisuras; ni tiene en cuenta el proceso de *healing* (auto-reparación). Estas condiciones deben ser abordadas a partir de la calibración, de forma tal de relacionar el daño obtenido en laboratorio con el que realmente acontece en campo.

Además del enfoque tradicional, se utilizan otros criterios para definir el final del ensayo de fatiga, los cuales se describen muy brevemente a continuación [16], [17].

- **Criterio de Ruptura:** Se define el número de ciclos N_s como aquel que produce la rotura de la probeta. Este criterio sólo se aplica para ensayos a Tensión

controlada. De distintas experiencias, se ha concluido que los resultados alcanzados, no difieren significativamente respecto al enfoque tradicional.

- **Curva de Weibull:** Este criterio propone presentar el ensayo de fatiga en los ejes $[\ln(\ln(N)) - \ln(-\ln(SR))]$. En esta representación, SR es definida como la relación entre el módulo de rigidez en el ciclo N (E_N) y el módulo inicial (E_0). Se distinguen tres fases del ensayo a partir de esta curva, siendo la Fase III la que se adopta como la de falla o ruptura. Esta curva se corresponde con la esquematizada en la Figura 2.5.
- **Daño acumulado (Criterio de Miner):** Es una ecuación que permite acumular el daño (D) a través de la fatiga en la vida del material, que va produciendo la aplicación de sucesivos ciclos de carga. El daño es considerado como una degradación progresiva de las propiedades mecánicas del material hasta su ruptura. Para esto, se miden alguna de sus magnitudes, siendo la más habitual la pérdida relativa del módulo entre el estado inicial (E_0) y el estado del material al instante t (E_t). La aplicación de esta metodología al ensayo de fatiga del tipo tracción compresión en probetas cilíndricas ha permitido demostrar que el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas es independiente del modo de sollicitación. Siendo posible realizar los ensayos en deformación o tensión y comparar los resultados entre los dos modos [18].
- **Enfoque energético:** Para determinar el número de ciclos a la ruptura, es necesario calcular la energía disipada acumulada en los diferentes ciclos hasta la falla. En un material viscoelástico como la mezcla asfáltica y en un ensayo de fatiga en una viga a flexión, el área dentro de la curva de histéresis esfuerzo-deformación resulta la energía disipada. Si bien la definición del número de ciclos a la ruptura, difiere según el modo de carga, diversos autores proponen la utilización de la relación de energía (relación entre la energía disipada en el primer ciclo y la energía disipada en el ciclo n). Para determinar el número de repeticiones críticas, se traza en una gráfica el valor de la relación de energía disipada (W_n) en función del número de ciclos, de la cual se obtiene una recta en la primera fase del ensayo. Para el número de ciclos crítico N, se presenta una desviación de esta recta, indicando el cambio a la fase de ruptura.

2.4. Modelos de fisuración por fatiga en los Métodos de Diseño Empíricos Mecanicistas

En los métodos Empíricos Mecanicistas (M-E), el estado inducido de tensiones y deformaciones en una estructura de pavimento debido a la carga del tránsito y a las condiciones ambientales, se estima utilizando la teoría de la mecánica. A fin de determinar la vida útil de dicha estructura, estas respuestas estructurales, se vinculan con la predicción de los deterioros admisibles en la misma. Por tanto, resulta imperioso poder definir, de la forma lo más precisa posible, estos criterios de predicción de cada uno de los deterioros a los cuales está sujeta la estructura.

En este sentido, en la mayoría de las metodologías de diseño que se han desarrollado a través de los años, los criterios de fallas debidos a la fisuración por fatiga surgieron a partir de vincular los resultados obtenidos en laboratorio con el comportamiento real de los materiales en servicio. Es por esto, que las expresiones matemáticas de estas leyes de falla, han ido evolucionando e incorporando mayor cantidad de parámetros, en paralelo con la evolución de dichos métodos de diseño.

En una primera instancia, las ecuaciones consideraban como única variable al Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas. Con el devenir de los estudios, se tuvieron en cuenta además las propiedades de las mismas a través de distintas relaciones volumétricas, como ser el porcentaje y tipo de ligante y los vacíos de aire. Ya en la actualidad, se introducen otros factores de ajuste, como por ejemplo el espesor de mezcla, de manera tal de tener en cuenta el modo de ensayo (tensión o deformación controlada).

2.4.1. Evolución de los criterios de falla por fatiga

Se presenta un breve resumen histórico de las leyes de fatiga desarrolladas a lo largo de los años, por distintos autores y en función de la evolución de los métodos de diseño en los cuales se aplicaron.

En 1960 Saal & Pell publicaron el uso de la deformación específica por tracción horizontal en la fibra inferior de la capa asfáltica para determinar la fisuración por fatiga, siendo empleada por primera vez para el diseño de pavimentos, por Dormom y Metcalf en 1965 [19]. Su expresión genérica es:

$$Nf = K_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{K_2} \quad (2.4)$$

Donde:

K_1 y K_2 : constantes para cada material.

N_f : número de repeticiones hasta la falla por fatiga

ε_0 : deformación específica de tracción

Posteriormente, tanto el método SHELL [20], como el método de la *Asphalt Institute* [21] incorporaron en sus métodos, criterios de fallas por fatiga, en los cuales además del módulo dinámico, consideraban el porcentaje de ligante presente en las mezclas asfálticas. Vale destacar, que incorporar el módulo dinámico en las expresiones resulta una manera indirecta de considerar la temperatura y frecuencia.

SHELL (1977):

$$\varepsilon_{fat} = (0.856 V_b + 1.08) S_{mix}^{-0.36} N_{fat}^{-0.2} \quad (2.5)$$

Donde:

V_b : contenido volumétrico de cemento asfáltico (%)

S_{mix} : módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (N/m^2)

N_{fat} : número de ciclos hasta la fatiga

ε_{fat} : deformación específica de fatiga

Asphalt Institute (1982):

$$N_f = 0.00432 C (\varepsilon)^{-3.291} (E)^{-0.854} \quad (2.6)$$

Donde : $C = 10^M$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.69 \right)$$

V_a : volumen de vacíos de aire (%)

V_b : volumen de cemento asfáltico (%)

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi)

ε : deformación específica a tracción

En últimos años, gran cantidad de estudios han avanzado en estas técnicas mecanicistas-empíricas, siendo la más relevante la Guía de Diseño de Pavimento Empírico-Mecanicista (M-E PDG) desarrollada por la NCHRP [3]. Sin embargo, la mayor parte de los trabajos llevados a cabo resultan ser variantes de los criterios oportunamente desarrollados por SHELL y el *Asphalt Institute*.

En este sentido, a continuación, se citan alguna de las expresiones más recientes planteadas para el diseño de pavimentos flexibles por diversos autores [1, 22].

Bonnaure et al (1980):

Efectúa un desarrollo en el cual considera, además de la cantidad de ligante presente en la mezcla, el tipo a través del índice de Penetración, como también tiene en cuenta el modo de ensayo (a deformación o tensión controlada), resultando dos posibles ecuaciones:

Para deformación controlada:

$$Nf = [0.17 IP - 0.0085 IP Vb + 0.454 Vb - 0.112]^5 (\epsilon t)^{-5} (E)^{-1.8} \quad (2.7)$$

Para tensión controlada:

$$Nf = [0.0252 IP - 0.00126 IP Vb + 0.00673 Vb - 0.0167]^5 (\epsilon t)^{-5} (E)^{-1.4} \quad (2.8)$$

Donde :

Vb: contenido volumétrico de cemento asfáltico (%)

IP: índice de Penetración del cemento asfáltico

E: módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi)

Nf: número de repeticiones para la falla

εt: deformación de tracción en la ubicación crítica

Witczak y Mirza (2000):

Plantean una ecuación genérica similar a la de Bonnaure et al, en la cual se introduce el espesor de la mezcla de manera tal de poder considerar a través del mismo, los modos de ensayos. En este sentido, para bajos espesores, la ecuación se aproxima a la de deformación controlada, y para altos espesores a la de tensión controlada.

$$Nf = \left(1 + \frac{13909 E^{-0.4} - 1}{1 + e^{(1.354 hac - 5.408)}}\right) \cdot (0.0252 IP - 0.00126 \cdot IP \cdot Vb + 0.0067 Vb - 0.0167)^5 \epsilon_t^{-5} E^{-1.4} \quad (2.9)$$

Donde :

Vb: contenido volumétrico de cemento asfáltico (%)

IP: índice de Penetración del cemento asfáltico

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi)

N_f : número de repeticiones para la falla

ε_t : deformación de tracción en la ubicación crítica

h_{ac} : espesor de mezcla asfáltica (pulgadas)

Witczak y El-Basyouny (2005):

Posteriormente, el mismo autor junto a otro colega, presentan una variante de la ecuación del *Asphalt Institute*, en la cual se introduce un término dependiente del espesor de mezcla a fin de también considerar el modo de ensayo, resultando:

$$N_f = 0.00432 K_1 C (\varepsilon_t)^{-3.9492} (E)^{-1.281} \quad (2.10)$$

Donde : $C = 10^M$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.69 \right)$$

$$K_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49h_{ac})}}}$$

V_a : volumen de vacíos de aire (%)

V_b : volumen de cemento asfáltico (%)

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi)

ε_t : deformación específica a tracción

h_{ac} : espesor de mezcla asfáltica (pulgadas)

SHRP (1993):

Finalmente, se aborda la expresión propuesta oportunamente en el Programa Estratégico de Carreteras llevado a cabo en EEUU, en la cual además de parámetros volumétricos, se tuvo en cuenta el ángulo de fase de la mezcla.

$$N_f = 2.738 \cdot 10^5 e^{(0.077 V_{FB})} (\varepsilon_t)^{-3.624} (Sm \text{ sen } \delta)^{-2.720} \quad (2.11)$$

Donde :

$$\delta = 260.096 - 17.172 \cdot \ln(Sm)$$

δ : ángulo de fase de la mezcla (desfasaje entre tensiones y deformaciones para el estado de tensiones aplicado en el ensayo de fatiga)

Sm: módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (MPa)

VFB: relación betún vacíos (vacíos llenos con ligante en porcentaje)

Nf: número de repeticiones para la falla

εt: deformación de tracción en la ubicación crítica (microstrains)

e: base de los logaritmos Neperianos

2.4.2. Criterios de falla por fatiga aplicados en Métodos de diseño internacionales

En este punto, se presenta un resumen sobre la forma en que los principales métodos empírico mecanicistas utilizados en distintos países, abordan el diseño estructural de pavimentos, en especial en lo que se refieren a los criterios de falla por fatiga en las mezclas asfálticas adoptados.

Acorde a lo expresado en el punto 1.2, dada su trascendencia en la configuración general de los modelos, se diferencian las metodologías que efectúan el análisis en Condiciones Iniciales de las que lo realizan en Condiciones Incrementales.

2.4.2.1. Métodos en Condiciones Iniciales

Australia y Nueva Zelanda:

El método de diseño utilizado es conocido como AUSTROADS (a través del software CIRCLY).

Valora el daño total causado por el tránsito de diseño como la suma del producido por cada grupo de ejes, asumiendo que para que la estructura propuesta sea aceptable, este daño total no debe exceder de 1,0 para cualquier material asfáltico o material cementado dentro del pavimento.

Los materiales se caracterizan como homogéneos, elásticos e isótropos, salvo los materiales no ligados y la subrasante que se califican como anisotrópicos.

Este procedimiento no tiene en cuenta la deriva lateral del tránsito, ya que considera que las respuestas críticas dentro del pavimento ocurren a lo largo del eje vertical directamente debajo de la llanta del grupo de llantas individuales y la llanta más interna del grupo de llantas dobles o a lo largo del eje vertical ubicado simétricamente entre un par de llantas dobles [23].

Para el criterio de falla por fisuración en las mezclas asfálticas, emplea la ecuación genérica de SHELL (de los años 70), posteriormente modificada por AUSTROADS para incluir un factor de confiabilidad y un factor de ajuste al comportamiento en campo (Jameson 2013) [24].

$$N = \frac{SF}{RF} \left[\frac{6918 (0.856 V_b + 1.08)}{E^{0.36} \varepsilon_t} \right]^5 \quad (2.12)$$

Donde :

N: número admisible de repeticiones de ε_t

E: módulo de la mezcla asfáltica (MPa)

ε_t : deformación específica por tracción inducida por carga en la base de la capa asfáltica (microstrains)

V_b: contenido volumétrico de cemento asfáltico (%)

SF: factor de ajuste entre la vida de fatiga en el laboratorio y en servicio (valor por defecto igual a 6)

RF: factor de confiabilidad (varía de 1 a 9, de acuerdo al porcentaje de confiabilidad asumido)

Por otra parte, si bien este método permite incorporar una Ley de Fatiga de una mezcla asfáltica específica obtenida a partir de ensayos de laboratorio de fatiga por flexión de cuatro puntos (AGPT/T274), el AGPT02 actualmente no proporciona una metodología para determinar los factores apropiados de ajuste, tanto de confiabilidad del proyecto como de desempeño del laboratorio al campo. Es por esto, que cada uno de los departamentos asumen para sus diseños la ecuación genérica anterior [24].

Reino Unido: (Design Manual for Roads and Bridges)

La Agencia de Carreteras desarrolló una ecuación para la determinación de la vida a fatiga de mezclas asfálticas convencionales a partir del ensayo a fatiga de empuje y tracción (TRL - Nunn 2004). Esta agencia también proporciona un procedimiento para desarrollar una relación de fatiga para materiales nuevos y usar otros tipos de ensayos de fatiga. Los resultados de fatiga del nuevo material deben normalizarse a las características del material estándar y la nueva relación debe conservar un exponente de daño.

La ecuación genérica para determinar la vida de fatiga, resulta [24]:

$$\frac{N}{10^6} = \left(\frac{\varepsilon_t}{K_{Flex} K_{Safety} \varepsilon_6} \right)^{-4.16} \quad (2.13)$$

Donde :

N: vida de fatiga en número de millones de ejes estándar

ε_t : deformación por tracción en la base de la capa asfáltica (microstrains)

$$K_{Flex} = 1.089 \times E^{-0.172}$$

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica (MPa)

K_{Safety} : factor de riesgo de diseño de pavimento (predeterminado = 1)

ε_6 : deformación por tracción en la que se produce la falla por fatiga a 1 millón de ciclos, 25 Hz y 20 °C (microstrains)

Francia: (Guía Francesa de Estructuras de Pavimento)

En Francia, el LCPC-SETRA ha desarrollado un método de diseño racional de pavimentos, aplicable a través del software Alizé [25, 26].

Esta metodología valora a las solicitaciones debidas al tránsito a través del pasaje de un número de ejes equivalentes al eje simple de ruedas duales de 130 KN.

Considera a la estructura como apropiada, cuando la deformación específica debida al tránsito calculada por el modelo, resulta menor o igual a la deformación específica admisible de cada material. Este valor admisible, representa el nivel máximo de deformación, aplicado tantas veces como el número de pasadas de carga de tráfico, que el material es capaz de soportar antes de ser sometido a un nivel de daño determinado. Este nivel de daño admisible no está especificado, sino que depende del nivel de servicio esperado para el pavimento, y se expresa como el riesgo de rotura del pavimento durante toda su vida útil.

En particular, el criterio de resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, en la metodología de LCPC-SETRA, se determina a partir de las propiedades presuntivas o específicas de la mezcla, obtenidas de ensayos de laboratorio (AFNOR 2011).

Los ensayos de laboratorio a fatiga se realizan de acuerdo con la Norma EN 12697-24 (Anexo A) para probetas trapezoidales, con una frecuencia de carga de 25 Hz y una temperatura de 10 °C.

A partir de la relación obtenida en laboratorio, se obtiene la ley de falla por fatiga para el diseño aplicando una serie de coeficientes de ajuste, de acuerdo a la siguiente expresión: [27]

$$\varepsilon_{t adm} = \varepsilon_6 \sqrt{\frac{E(10\text{ °C}; 10\text{ Hz})}{E(\theta_{eq}; 10\text{ Hz})}} \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b K_c K_r K_s \quad (2.14)$$

Donde :

$\varepsilon_{t adm}$: deformación por tracción admisible en la base de la capa asfáltica (microstrains)

ε_6 : deformación por tracción en la que se produce la falla por fatiga a 1 millón de ciclos, 25 Hz y 10 °C (microstrains)

E (10°C; 10 Hz): módulo complejo medido a 10°C y 10 Hz (MPa)

E (θ_{eq} ; 10 Hz): módulo complejo medido bajo la temperatura equivalente y 10Hz (MPa)

NE : número de ciclos de carga hasta la falla (considerado igual al número de ejes equivalentes de referencia para el pavimento)

b : pendiente de la relación de fatiga de la mezcla asfáltica obtenida del ensayo de laboratorio ($-1 < b < 0$)

K_s : factor de penalización debida a la baja capacidad de la subrasante (dependen del tipo de suelo que la compone)

K_C : factor de ajuste entre el modelo y el comportamiento real obtenido en pruebas a escala real realizadas con la instalación de pruebas aceleradas de pavimento LCPC (varía entre 1 y 1,3)

K_r = factor de riesgo de diseño

Sudáfrica: (SAMDM)

El desarrollo de un procedimiento de diseño de pavimentos flexibles basados en métodos empíricos mecanicistas se ha llevado a cabo en Sudáfrica desde la década del '70 (Van Vuuren et al., 1974, Walker et al., 1977, Paterson y Maree, 1978, Maree y Freeme, 1981, Jordaan, 1993), resultando su implementación a través del software mePADS en 1996 [28].

Al igual que la mayoría de estos tipos de métodos, efectúa el cálculo de las tensiones y deformaciones críticas impuestas por las solicitaciones de tránsito (repeticiones de eje equivalente de 80KN), considerando un modelo multicapas, elástico, lineal e isótropo. Los parámetros críticos de respuesta del pavimento, se emplean como entrada de los criterios de falla de determinados tipos de materiales y modos de falla. Los criterios de falla que relacionan la deformación unitaria con el número de cargas que pueden ser soportadas a ese nivel de esfuerzo antes de que sea alcanzada una condición terminal para un modo particular de deterioro, fueron obtenidos a partir de ensayos de HVS (*Heavy Vehicule Simulator*). Para el caso particular de las mezclas asfálticas, estos criterios de falla se desarrollaron como función de la deformación específica a tracción en la base de la capa e indican el inicio del agrietamiento por fatiga [29].

Esta relación de fatiga, fue llevada a cabo por la Agencia Nacional de Carreteras de Sudáfrica, siendo función, además, del módulo dinámico de la misma. También incluye constantes propias del modelo que dependen del tipo de mezcla, el módulo y el espesor de capa. [24, 29, 30]

$$N_f = 10^{\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta}\right)} \quad (2.15)$$

Donde :

N_f: vida de fatiga en número de repeticiones del eje estándar

ε_t: deformación por tracción en la base de la capa asfáltica (microstrains)

α y *β*: constantes del modelo (valores basados en el tipo y módulo de la mezcla, la confiabilidad y la categoría de la carretera). Se muestra a modo de ejemplo, los valores que asumen estos parámetros para el caso de carpetas de rodamiento, de granulometría continuas:

Caminos categoría A (confiabilidad de 95%): α = 17,40 y β = 3,40

Caminos categoría B (confiabilidad de 90%): α = 17,46 y β = 3,41

Caminos categoría C (confiabilidad de 80%): α = 17,54 y β = 3,42

Caminos categoría D (confiabilidad de 50%): α = 17,71 y β = 3,46

Cabe destacarse, que la relación de fatiga que se muestra en la ecuación anterior se encuentra en revisión como parte de un proyecto de estudio más grande de Sudáfrica (Agencia Nacional de Carreteras de Sudáfrica). Si bien se ha desarrollado una ecuación que incorpora el daño por fatiga y el módulo dinámico por compresión de la mezcla asfáltica, la misma, aún no se ha implementado [24].

Brasil (MeDINA):

El método de diseño empírico mecanicista desarrollado en Brasil es conocido como Método Nacional de Dimensionamiento de Pavimentos, tiene su aplicación a través del software MeDINa (consta de 3 partes: AEMC, BackMedina y MeDINa) y ha sido adoptado por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT) para su aplicación en el país. Surgió como el trabajo conjunto entre el Instituto de Investigaciones Viales (IPR) y el Instituto Alberto Luiz Coimbra de Posgrado e Investigación en Ingeniería, de la Universidad Federal de Río de Janeiro (COPPE), así como de la colaboración del Centro de Investigaciones de Petrobras (CENPES) y de diversas Universidades de Brasil [31].

Entre otros aspectos similares a todos los métodos mecanicistas, considera a los materiales como homogéneos, pudiendo definirse como elásticos lineales o no lineales, a través de sus ecuaciones constitutivas.

Por otra parte, este método no considera directamente la deriva lateral del tránsito, sino que calcula el promedio de 20 puntos bajo el semieje de carga, siendo la misma evaluada a través de la repetición de ejes equivalentes en efecto destructivo de una carga de referencia de 8,2 toneladas.

En esta metodología, la vida útil por fatiga del recubrimiento asfáltico se define como el número de vehículos expresado en número de Ejes Estándar (N) que soporta el pavimento antes de que se observe un porcentaje de área agrietada superior a la admisible para la estructura del pavimento.

Esta superficie se determina a través de una función sigmoïdal, que tiene en cuenta el daño producido por la aplicación de las cargas, las características propias de cada mezcla asfáltica (a través de su curva de fatiga) y de factores de calibración obtenidos a partir del estudio de 6 tipos de mezclas asfálticas y 45 pistas experimentales con diferentes condiciones de tránsito (Fritzen 2016).

Para obtener la curva de fatiga de las mezclas asfálticas, se emplea el ensayo de compresión diametral por tracción indirecta a tensión constante y se define según la siguiente expresión genérica:

$$N_{fad} = k_1 \varepsilon_t^{k_2} \quad (2.16)$$

Donde:

N_{fad}: número de aplicaciones de carga

ε_t: deformación específica a tracción

k₁, k₂: coeficientes obtenidos del ensayo que dependen de la mezcla asfáltica

En lo que respecta al cálculo del daño, utilizando la tensión provocada por el paso del eje estándar, el espesor del recubrimiento y sus propiedades elásticas, el software MeDiNA determina el estado de tensiones en 10 puntos de la cara superior y 10 puntos de la cara inferior de la capa de asfáltica.

De cada punto se determina la deformación específica y utilizando la curva de fatiga del material asfáltico, se valora su respectiva vida útil por fatiga (*N_{fad}*). El daño promedio de los 20 puntos se calcula dividiendo una aplicación de eje de carga de carretera estándar por el número permitido de aplicaciones de eje de carga.

Finalmente, se define la Función de Transferencia, que transforma el daño promedio en estos 20 puntos con el área agrietada predicha. A fin de tener en cuenta las condiciones de la estructura del pavimento, como ser el tipo de material asfáltico, su espesor y el estado de tensión que le aplica, se incorpora un factor de desplazamiento que se obtiene de forma tal de minimizar el error entre la evolución del área fisurada y la curva sigmoïdal estándar, resultando dos constantes $C1=1993.7$ y $C2=0.3737$ obtenidas del proceso de calibración. A continuación, se presenta la expresión final del modelo de fatiga de la capa asfáltica en términos de área agrietada, tal como se expresa en la bibliografía citada [32]:

$$AT (\%) = \frac{\left\{ e^{-\left[\frac{N \left(1.993 \left(\frac{1}{20} \sum \frac{1}{N_{fad}} \right)^{0.3737} \right) 10^{-10}}{0.25-1} \right]^5} \right\}}{1 - \left\{ e^{-\left[\frac{-1}{0.25-1} \right]^5} \right\}} \quad (2.17)$$

Siendo:

AT : área fisurada (%)

N : número del eje estándar en el período

N_{fad} : número de repeticiones admisibles

2.4.2.2. Métodos en Condiciones Incrementales

Estados Unidos - MEPDG (AASHTOWare):

Este es el método empírico mecanicista más reconocido y difundido a nivel mundial. Surge como un estudio a gran escala en EEUU y comienza su aplicación a partir del 2004 a partir del proyecto NCHRP Project 1-37A [3].

Este método considera entre otros aspectos: la no linealidad de los materiales no ligados, las diferentes condiciones climáticas y su influencia en el comportamiento sobre todo de los materiales asfálticos, las solicitaciones de tránsito a través de un espectro de carga, la distribución lateral del mismo (*wander*), entre muchos aspectos que mejor aproximan el modelo a la realidad.

Como en todos los métodos que efectúan el análisis en condiciones incrementales, los resultados que arrojan, corresponden a la predicción de la evolución de distintos deterioros de la calzada para una estructura propuesta. Los deterioros considerados son: deformación

permanente (ahuellamiento), fisuración por fatiga de tipo “piel de cocodrilo” (de abajo hacia arriba), fisuración “longitudinal” (de arriba hacia abajo), fisuración térmica y rugosidad.

En particular, en lo que respecta a las mezclas asfálticas y su comportamiento a fatiga, la relación que se emplea en AASHTOWare para predecir el número admisible de repeticiones por fisuración, se basa en el modelo original de la *Asphalt Institute*, como también de los sucesivos estudios llevados a cabo por Witczak et al.[14, 19].

De la calibración efectuada por la Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (2020), surge que este modelo es el que mejor se ajusta, tanto para las fisuras de abajo hacia arriba (*bottom up*) como de arriba hacia abajo (*top down*). La relación obtenida, es principalmente una función de la deformación por tracción en la base de la capa asfáltica, el espesor de la misma, el módulo de compresión dinámico y las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica (es decir, contenido del aglutinante efectivo y porcentaje de vacíos de aire) [24].

$$Nf = K_{f1} C C_H \beta_{f1} (\varepsilon_t)^{K_{f2}\beta_{f2}} (E_{AC})^{K_{f3}\beta_{f3}} \quad (2.18)$$

Donde:

Nf: número admisible de repeticiones de una carga determinada

ε_t : deformación específica a tracción en el punto crítico (pulgada/pulgada)

E_{AC} : módulo dinámico a compresión de la mezcla asfáltica (psi)

K_{f1} , K_{f2} , K_{f3} : coeficientes de calibración global en campo (para mezclas asfálticas densas, $K_{f1} = 3.75$, $K_{f2} = 2.87$, $K_{f3} = 1.46$)

β_{f1} , β_{f2} , β_{f3} : coeficientes de calibración de campo específica local o propios de la mezcla (definidos con valor unitario, a modificar en cada calibración particular)

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{Vb}{Vb + Va} - 0.69 \right)$$

El Factor de corrección por espesor, se obtiene como:

$$C_H = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49h_{ac})}}}$$

Va : volumen de vacíos de aire en porcentaje (%)

Vb : volumen efectivo de ligante, en porcentaje (%)

h_{ac} : espesor de mezcla asfáltica (pulgadas)

Una vez obtenido el número de repeticiones admisibles de carga por eje, AASHTOWare calcula el índice de daño incremental dividiendo el número real de cargas por eje con el número permitido de cargas por eje definido anteriormente, dentro de un incremento de tiempo específico y en un intervalo de carga para cada tipo de eje. El daño resultante de una carga dada, se determina a partir del número de repeticiones utilizando la Ley de Miner.

$$D_i = \sum_{i=1}^T \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (2.19)$$

Donde:

D_i: daño

T: número total de períodos estacionales

N_i: tránsito real durante el período *i*

N_{fi}: repeticiones de una carga dada para provocar una falla en el período *i*

Finalmente, la fisuración por fatiga de abajo hacia arriba, se calcula a partir del daño total a través del tiempo, utilizando una función de transferencia de forma sigmoideal que convierte al mismo en un área de calzada fisurada, siendo la misma [19]:

$$FC = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C1 \cdot C1' + C2 \cdot C2' \cdot \log(100D))}} \right) \left(\frac{1}{60} \right) \quad (2.20)$$

Donde:

C1 = C2 = 1.0 (constantes de regresión)

C2' = -2.40874 - 39.748 (1 + h_{ac})^{-2.856}

*C1' = -2 * C2*

Realizando un análisis de estas fórmulas, se puede observar que el modelo planteado asume que el daño unitario se corresponde con el 50% de fisuras, tal como se muestra en la Figura 2.7.

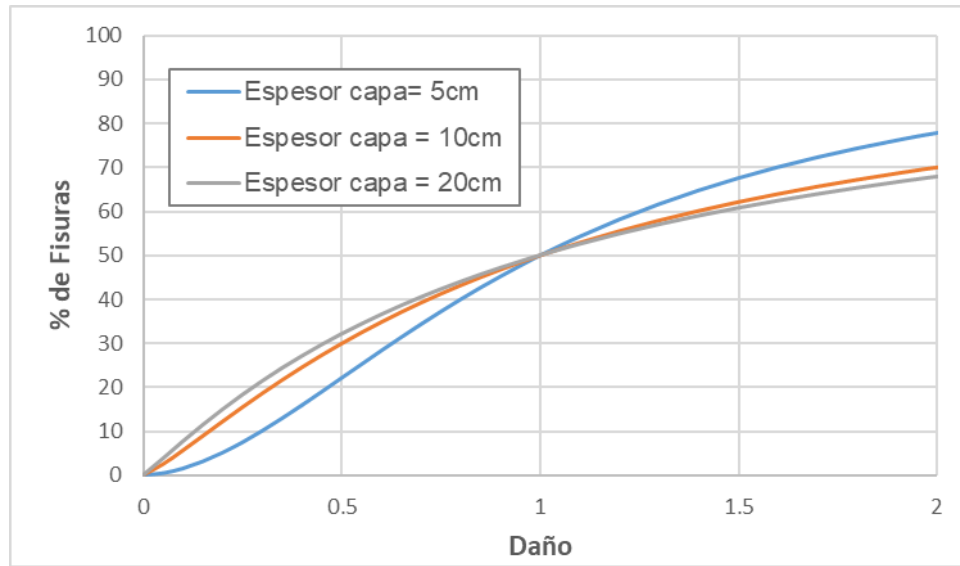


Figura 2.7. AASHTOWare – Porcentaje de fisuras en función del daño acumulado

Departamento de Transporte de California:

Si bien el desarrollo de la Guía de Diseño Empírico – Mecanicista por parte del NCHRP, proporcionó un marco genérico para obtener los datos necesarios para ejecutar la calibración global, no todos los tipos de pavimento o aspectos de diseño pudieron ser incluidos (como por ejemplo, los materiales, tránsito o climas, de cada uno de los estados). En este contexto, el Centro de Investigación en Pavimentos de la Universidad de California (UCPRC), desarrolló un programa informático conocido como CalME para el análisis y diseño de pavimentos flexibles nuevos y la rehabilitación de pavimentos existentes, a fines de obtener criterios de fallas para sus condiciones particulares. CalME. es un programa que incorpora los métodos de diseño empíricos existentes del DOT de California, así como un procedimiento de análisis incremental-recursivo basado en el método mecanicista-empírico, para estimar el daño incremental (reducción de la rigidez o deformación permanente), además del cambio resultante en los deterioros del pavimento [33, 34].

La relación de daño por fatiga de los materiales asfálticos adoptada por este procedimiento M-E se muestra en la Ecuación (2.21).

$$\omega = \left(\frac{MN}{FSF \times MN_p} \right)^{\alpha f} \quad (2.21)$$

Donde :

ω : *daño por fatiga*

MN : *número de repeticiones de la carga (en millones)*

MN_p : número de repeticiones de la carga hasta la falla (en millones)

α_f : parámetro del modelo dependiente del material

FSF: factor de transferencia de fatiga

El FSF resulta el factor empírico que el Departamento de Transporte de California introduce para estimar el daño en servicio a partir de los resultados obtenidos en laboratorio. Este factor de ajuste también considera el efecto de los períodos de descanso entre cargas y se determinó a partir de la diferencia entre el seguimiento de tramos de pavimento a gran escala y los ensayos de fatiga realizados en el laboratorio [24]. El valor por defecto fijado es igual a 1.0.

El número de reiteraciones de carga admisibles se obtiene como una función de la deformación horizontal en la parte inferior de la capa de asfalto, el módulo dañado en el período anterior, así como el módulo intacto (es decir, sin daños). La misma se muestra en la Ecuación (2.22) [24, 34].

$$MN_p = A \left(\frac{\mu\varepsilon}{\mu\varepsilon_r} \right)^\beta \left(\frac{E}{E_r} \right)^\gamma \left(\frac{E_i}{E_r} \right)^\delta \quad (2.22)$$

Donde :

$\mu\varepsilon$: deformación horizontal en la base de la capa asfáltica (en millones)

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica dañado (MPa)

E_i : módulo dinámico de la mezcla asfáltica intacto (MPa)

$A, \beta, \gamma, \delta, \mu\varepsilon_r, E_r$: constantes del modelo

$$\log(E) = \delta + \frac{\alpha(1-\omega)}{1+\exp(\beta+\gamma \log tr)}$$

$$\alpha = \exp\left(\alpha_0 + \alpha_1 \frac{t}{1^\circ C}\right)$$

tr : tiempo reducido en función del tiempo de carga y de la viscosidad del aglutinante (segundos)

t : temperatura de diseño ($^\circ C$)

$\delta, \alpha_0, \alpha_1$: constantes del modelo

Los distintos parámetros relacionados al daño por fatiga, se obtienen a partir de Ensayo en el laboratorio de fatiga en viga a flexión en cuatro puntos (4PBT).

Costa Rica: (GDP 2024)

El método de diseño de aplicación en Costa Rica es la Guía mecánica empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos GDP 2024 [35], la cual fue desarrollada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme) de la Universidad de Costa Rica (UCR), y consta tanto de un documento como de un conjunto de softwares de aplicación conocidos genéricamente como CR-ME. [36].

Esta metodología se basa en el estudio y adaptación de la MEPDG-2004, AASHTOWare Pavement ME, y de los avances realizados en Costa Rica sobre la mecánica de materiales para pavimentos y calibración de modelos de desempeño.

El estudio de las posibles leyes de fatiga en las mezclas asfálticas, ha sido abordado desde comienzos de los años 2000, a través de diversas investigaciones llevadas adelante por el Laname UCR. En el mismo, se desarrollaron y evaluaron varios modelos de fatiga, a partir de ensayos de viga a flexotracción en 4 puntos (AASHTO T321-03) de distintas mezclas asfálticas de uso habitual en Costa Rica, teniendo en cuenta diferentes variables, como por ejemplo la rigidez de la mezcla, el contenido de vacíos y la resistencia a la tensión diametral en estado seco. [37, 38].

Finalmente, en la reciente GDP 2024 se propone el modelo para determinar la resistencia a fatiga en mezclas asfálticas recomendado por la AASHTOWare ME (AASHTO, 2015), con los factores de calibración locales para Costa Rica, siendo la misma [35]:

$$Nf = 0.007566 C k'_1 \beta_{f1} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.9492\beta_{f2}} \left(\frac{1}{E^*}\right)^{1.281\beta_{f3}} \quad (2.23)$$

Donde:

Nf: cantidad máxima de repeticiones a fatiga para la falla

ε_t: deformación específica a tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica
(pulg/pulg)

*E**: módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi)

$$\beta_{f1} = 0.9739$$

$$\beta_{f2} = 0.9948$$

$$\beta_{f3} = 1.0907$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{Vb}{Vb + Va} - 0.69 \right)$$

$$k'_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49h_{ac})}}}$$

Va: volumen de vacíos de aire (%)

Vb: volumen efectivo de ligante (%)

h_{ac}: espesor de mezcla asfáltica (pulgadas)

Los factores de calibración locales presentados, son una primera versión y se desarrollaron con información obtenida de ensayos acelerados en Costa Rica, sobre estructuras de pavimentos con espesores de capa de mezcla asfáltica menores a 20 cm.

En lo que respecta a la Función de transferencia, esta guía asume la misma ecuación que la planteada para el método AASHTOWare, con los correspondientes factores de calibración locales [35].

$$FC_{B-U} = \left(\frac{6000}{1 + e^{(C_1 * C'_1 + C_2 * C''_2 * \log(100D_B))}} \right) \left(\frac{1}{60} \right) \quad (2.24)$$

Donde:

FC_{B-U}: fisuración de abajo hacia arriba por fatiga, porcentaje por área de carril

D_B: daño por fatiga de abajo hacia arriba

$$C_1 = 4.0$$

$$C_2 = 3.7969$$

$$C'_1 = -2 * C''_2$$

$$C''_2 = -2.40874 - 39.748 (1 + h_{ac})^{-2.856}$$

h_{ac}: espesor de la capa asfáltica (pulgadas)

2.5. Leyes de falla por fatiga en Método de diseño Empírico Mecanicista Argentino

Si bien actualmente en Argentina, los organismos estatales (vialidades) siguen implementando métodos de diseño empíricos (como es la Guía de Diseño AASHTO 93), existe una tendencia cada vez mayor de consultores y universidades a la aplicación de metodologías Mecanicista Empíricas [39].

En este sentido, desde los años 80, en el Laboratorio Vial del IMAE, FCEIA, UNR, se viene desarrollando el software BackViDe [40], el cual considera las condiciones particulares de nuestro país, en especial lo correspondiente a los materiales de empleo habitual en el ámbito vial.

Al igual que en la mayoría de este tipo de métodos, el mismo se basa en la mecánica del continuo para un medio estratificado. Plantea un modelo multicapa pseudo dinámico, isótropo y homogéneo, con la posibilidad de considerar el comportamiento no lineal de los materiales.

Por otra parte, la metodología BackViDe determina la deformación específica de tracción en la dirección tangencial (ϵt) en las fibras inferior y superior de la mezcla asfáltica, a lo largo del perfil transversal, bajo la carga de un extremo de eje estándar con ruedas duales (por defecto se asume el de 80 KN), y considera la deriva lateral del mismo modelizada mediante una distribución gaussiana. Los cálculos de deterioros se realizan para todos los puntos i discretizados acumulando los efectos producidos por cada posición k de la carga, según se puede apreciar en la Figura 2.8.

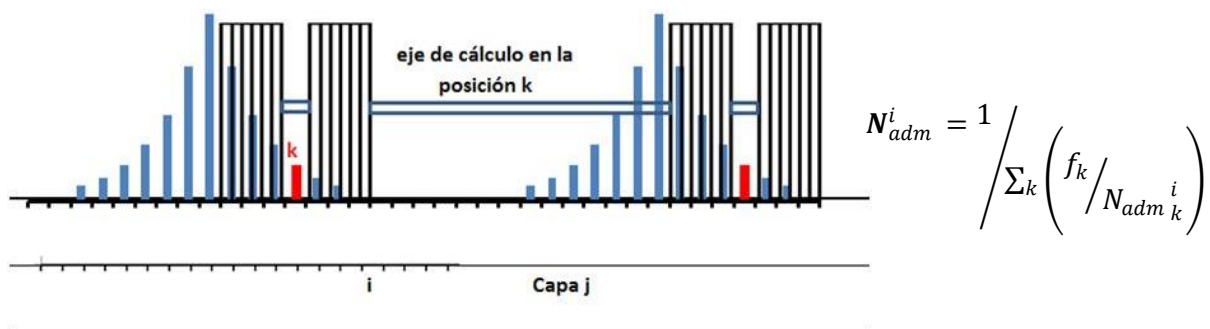


Figura 2.8. Distribución lateral de las cargas y ecuación de integración de cada período.

Fuente: Léame software BackViDe [41]

En lo que respecta a las solicitaciones climáticas, BackViDe presenta un submodelo de simulación de clima, el cual representa las variaciones de las temperaturas de trabajo, discretizados en períodos climáticos.

El conocimiento de la variable temperatura, y particularmente la correspondiente a la mezcla asfáltica, es de fundamental importancia para la estimación del comportamiento en servicio, ya que condiciona tanto su módulo como su resistencia a la fisuración y su tasa de acumulación de deformaciones plásticas. Por tanto, el Dr Giovanon desarrolló para su estimación, un modelo de incrementos finitos que, a partir del clima caracterizado por velocidad del viento, radiación solar, temperatura del aire, latitud, longitud; y de las características térmicas de los materiales, arriba a la variación de temperatura a lo largo del día típico de cada mes para distintas profundidades [5].

El modelo simula los diferentes procesos de intercambio térmico durante cada día del año, para el cual contempla:

- Radiación: vinculada al calentamiento de la superficie del pavimento y que considera la radiación solar efectiva de cada mes con una distribución semi sinusoidal entre la hora de salida y puesta del sol obtenidas a partir de la latitud y la longitud del lugar.
- Convección: enfriamiento de la superficie del pavimento o emisión de calor al ambiente, directamente relacionado a la velocidad del viento.
- Conducción: propagación del calor dentro de la estructura en función de las características físicas y geométricas de los materiales.

La Figura 2.9 esquematiza estos procesos.

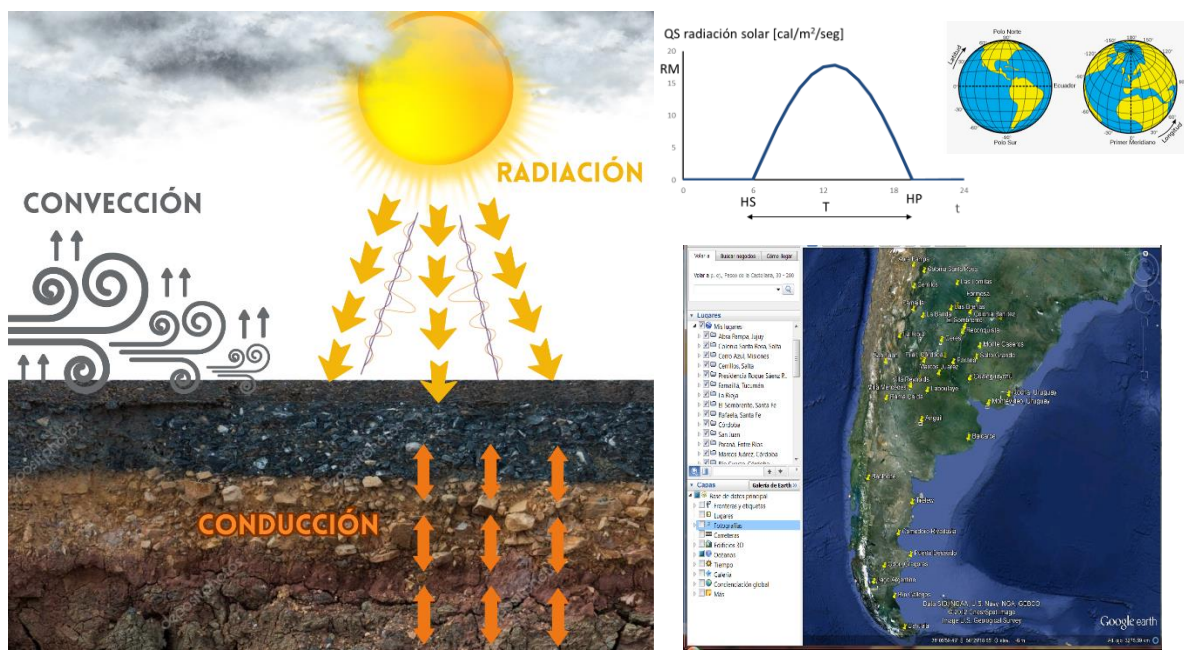


Figura 2.9. Esquema submodelo climático BackViDe.

En particular, este submodelo tiene su mejor aplicación dentro del Modelo en Condiciones Incrementales, recomendándose para el Modelo en Condiciones Iniciales adoptar una condición representativa, ya sea promedio o ponderada, de manera de lograr que el daño producido en la estructura bajo los variables escenarios climáticos, se aproxime al logrado manteniendo esta condición a lo largo del año.

A partir de la modelización de la estructura (programa Backmod), es posible efectuar un análisis en Condiciones Iniciales (programa Vida) o considerar la evolución de los materiales en el período de evaluación y arribar, por relaciones empírico mecanicistas, a la variación de los parámetros de superficie en el tiempo (programa Deterioro) [41].

A continuación, se abordan los distintos criterios incluidos en el programa que permiten caracterizar el comportamiento a fatiga por fisuración de las mezclas asfálticas, según las condiciones de análisis antes indicadas.

Modelo en Condiciones Iniciales “VIDA”:

El criterio de falla por fisuración se basa en el sugerido por la *International Society for Asphalt Pavements* (ISAP) según la siguiente ecuación [41]:

$$N_{ADM} = \left[\frac{\varepsilon_{t6}}{\varepsilon_t FTD} \left(\frac{\% Fis}{30} \right)^{0.1} \right]^{Alfa\varepsilon_t} \left(\frac{3000}{E} \right)^{AlfaE} \left(\frac{\% Asf}{10} \right)^{AlfaAsf} Vr \quad (2.25)$$

Siendo:

N_{ADM} : número de reiteraciones admisibles en millones

ε_t : deformación específica de tracción en el punto de análisis

ε_{t6} : deformación específica de tracción para la cual soporta un millón de reiteraciones (para una dada condición de fisuración en superficie)

F_{TD} : Factor Top Down, que minorra las solicitaciones admisibles en el caso que éstas se produzcan en la superficie de la calzada

E : módulo dinámico de la mezcla asfáltica integra (MPa)

$\%Asf$: porcentaje de asfalto en volumen de la mezcla asfáltica

$\%Fis$: porcentaje de fisuras totales asociados a la condición final

Vr : vida remanente contemplando los casos con daño acumulado previo al período de análisis

$Alfa\varepsilon_t$: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el nivel de deformaciones

$AlfaE$: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el módulo

$AlfaAsf$: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el porcentaje de asfalto.

En este modelo (Condiciones Iniciales), los valores por defecto suponen una condición final del 30% de fisuras totales (aproximadamente 15% de fisuras grado 4) con 50% de riesgo, criterios que pueden ser modificados por el usuario.

El módulo dentro de cada capa se considera fijo, si bien es posible diferenciar períodos climáticos. Se utiliza en este material un modelo seudo viscoso dado que el valor a adoptar se corresponde con: la frecuencia, la temperatura y la condición de integridad del material, pero se mantiene fijo dentro de la capa una vez declarado.

Adicionalmente, para una mayor versatilidad, se incorporan en la fórmula el porcentaje de vida remanente del material y el porcentaje de fisuras totales asociado a la condición final de la superficie.

Modelo en Condiciones Incrementales “DETERIORO”:

Dado que este tipo de modelo tiene en cuenta la historia de solicitaciones y la evolución de la estructura en el tiempo, la caracterización del comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se considera a partir del daño acumulado, el cual se obtiene como la acumulación de los daños de los distintos períodos incrementales analizados, mediante criterios de falla aptos para tal fin.

En particular, el Modelo en Condiciones Incrementales de BackViDe lo aborda a través de la conocida expresión de Miner (1945) habitualmente utilizada en la mayoría de las metodologías mecanicistas [4]:

$$D_n = \sum_{i=1}^n \frac{F_S N_i}{N_{iadm}} \quad (2.26)$$

Donde:

D_n : daño acumulado del material hasta el período n

N_i : número de reiteraciones del esfuerzo en el período i

N_{iadm} : número de reiteraciones del eje estándar de ruedas duales admisibles del esfuerzo en el período i

F_S : factor de seguridad asociado a la confiabilidad asumida en el deterioro y la dispersión de la predicción

En este caso, el criterio asociado al número de ejes equivalentes en efecto destructivo admisibles respecto a un eje estándar de ruedas duales, se obtiene a partir de la siguiente ecuación.

$$N_{iadm} = \left(\frac{\varepsilon_{t6}}{\varepsilon_t F_{TD}} A_{cot} \right)^{Alfa\varepsilon_t} \left(\frac{E_{20-10}}{E_{pon}} \right)^{AlfaE} \quad (2.27)$$

Donde:

N_{iadm} : número de reiteraciones requeridas para el inicio de fisuras en la condición del período i (millones)

ε_{t6} : deformación específica de tracción para la cual soporta un millón de reiteraciones (microstrains), el inicio de la fisura en un punto

ϵ_t : máxima deformación específica de elongación en millonésimas (microstrains)

E_{20-10} : módulo de la mezcla asfáltica a 20 °C y 10 Hz (MPa)

E_{pon} : módulo ponderado de la mezcla asfáltica del período (MPa)

F_{TD} : factor asociado a fisuras iniciando desde la superficie (Top Down), 1 si no es la superficie

$\text{Alfa}ct$: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el nivel de deformaciones

$\text{Alfa}E$: coeficiente que proporciona la susceptibilidad con el módulo de la mezcla

A_{cot} : factor asociado a concentración de tensiones

$$A_{cot} = F_{CT} \left(1 + \frac{D_D}{F_{AD}} \right) \quad (2.28)$$

F_{CT} : factor asociado a la concentración de tensiones, dado por el modo de fisuración del material adjunto, próximo a uno en materiales que se microfisuran y por lo tanto con reducido efecto de concentración de tensiones

D_D : diferencia de daños en la interface entre capas

F_{AD} : factor que atenúa la concentración de tensiones dada por la diferencia de daños

Como se indica en la ecuación anterior, para determinar el número de repeticiones del eje estándar admisible en cada período, se considera un módulo de rigidez de la mezcla asfáltica ponderado. Este parámetro tiene en cuenta el fenómeno de envejecimiento y la caída modular que sufre la mezcla en función del daño, siendo su ecuación genérica:

$$E_{PON} = E_m F_{ed} + E_{Daño} (1 - F_{ed}) \quad (2.29)$$

Donde:

E_m : módulo a la edad m para el material sin daño (MPa)

$E_{Daño}$: módulo en la condición de daño del período (MPa)

F_{ed} : factor de ponderación, varía entre 0 y 1 (para 0, el E_{pon} corresponde al módulo en la condición dañado)

Para poner de manifiesto el fenómeno de envejecimiento, se plantea una variación relativa del módulo por unidad de tiempo mediante el factor F_e :

$$E_m = E F_e \quad (2.30)$$

Donde:

E_m : módulo a la edad m para el material sin daño (MPa)

E : módulo del material E_d (MPa)

F_e : factor de envejecimiento en la mezcla asfáltica, sólo si es capa de superficie

$$F_e = 1 + \frac{m C_e}{m_e} \quad (2.31)$$

m : edad (meses)

m_e : tiempo de envejecimiento en meses para el valor de C_e definido

C_e : crecimiento porcentual del envejecimiento en el tiempo m

Para determinar la caída modular debida al daño, el Dr. Giovanon en su tesis doctoral [5] plantea una función sigmoïdal que relaciona el valor del material en su condición de integridad (Daño nulo) y un valor del módulo mínimo para su condición de máximo deterioro; siendo la misma:

$$E_{Daño} = E_{dmin} + \frac{(E_m - E_{dmin})}{1 - e^{C_{d1}} + e^{C_{d1} + C_{d2} D_i^{0.5}}} \quad (2.32)$$

Donde:

E_m : módulo a la edad m para el material sin daño (MPa)

$E_{Daño}$: módulo considerando daño por fatiga (MPa)

D_i : daño acumulado del material hasta el período i

e : base de los logaritmos neperianos

$C_{d1}, C_{d2}, C_{d3}, E_{dmin}$: parámetros de la función de daño que caracterizan al material

Otro aspecto a considerar es que, en estos modelos incrementales, el inicio de la fisura se corresponde cuando el daño ha alcanzado la unidad y no a una condición de deterioro de la superficie como el caso del análisis en condiciones fijas.

Este planteo, obliga a poner de manifiesto la propagación de fisuras dentro de la estructura hasta la superficie y la vinculación del daño de la capa de superficie con la gravedad del estado de fisuración. En particular, BackViDe aplica un modelo simplificado que permite arribar a la valoración de la condición de falla en superficie, considerando que, una vez iniciada la fisura, la misma progresa con una velocidad de propagación función del daño

que sigue acumulando el punto de inicio de la fisura, hasta interesar a la totalidad de la capa. A partir de este momento la totalidad de la capa progresa a la misma tasa de daño [4]. A continuación, se muestra la ecuación propuesta en el software:

$$Lf_i = Lf_{i-1} + C_{PF} \Delta D_i \quad (2.33)$$

Donde:

Lf_i : longitud de fisuras del período i (mm)

Lf_{i-1} : longitud de fisuras del período anterior (mm)

ΔD_i : daño acumulado del material en el período i

C_{PF} : parámetro que caracteriza al material, velocidad de progreso de fisuras en milímetros por unidad de daño (mm)

Finalmente, el porcentaje de fisuras en superficie se calcula a través de una función de transferencia. Los parámetros de las mismas constituyen parámetros de calibración del modelo, y se muestran a continuación:

$$Fis_{Tra} = C_F (D_{iT} - 1)^{C_{Fe}} \quad (2.34)$$

Donde:

Fis_{Tra} : porcentaje de fisuras por acción del tránsito

D_{iT} : daño en superficie para el período por tránsito

C_F, C_{Fe} : parámetros de calibración del sub modelo

Al igual que lo efectuado para el Método de AASHTOWare, asumiendo los valores por defecto incluidos en el software para los parámetros de calibración ($C_F = 12$; $C_{Fe} = 0.70$), se grafica la variación del porcentaje de fisuras en función del daño en superficie. En la Figura 2.10. se pone de manifiesto que, para este método, el daño unitario se corresponde con el inicio de la fisuración. Esta es una de las diferencias que se plantea respecto a AASHTOWare, donde el daño igual a 1 representaba un 50% de calzada fisurada, para cualquier espesor de mezcla analizado (Figura 2.7).

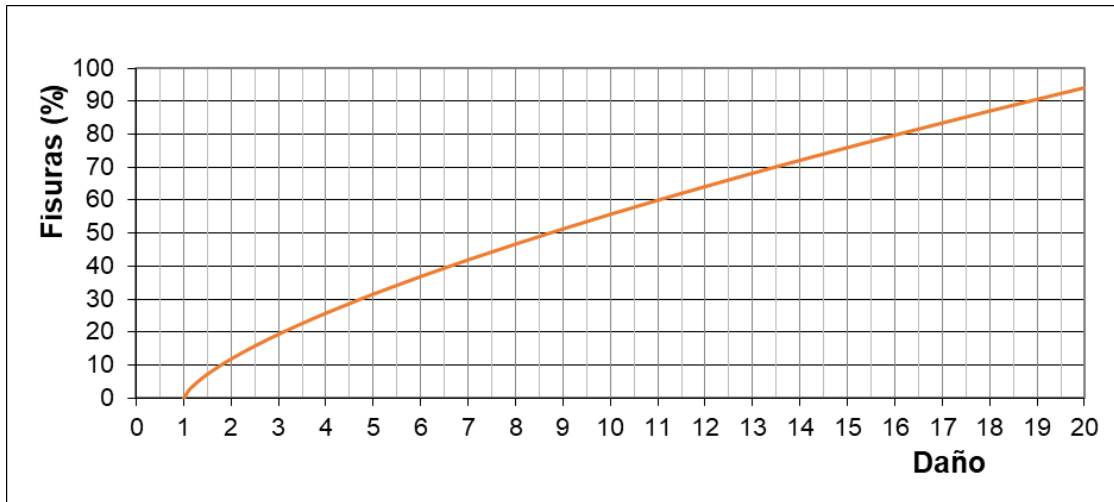


Figura 2.10. BackViDe Modelo Incremental – Porcentaje de fisuras en función del daño acumulado

Capítulo 3. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DEL ENSAYO 4PBT

3.1. Introducción

Tal como ya se mencionara, para poder definir las leyes de falla a fatiga de las mezclas asfálticas es necesario contar con ensayos de desempeño en laboratorio, a partir de los cuales se procede a la calibración de las distintas ecuaciones teniendo en cuenta las condiciones reales de comportamiento en el campo.

Para esto, se llevó adelante un programa experimental, considerando cuales eran los tipos y equipamiento de ensayos a flexotracción disponibles en nuestro país.

A partir del relevamiento efectuado, se identificó que el tipo de ensayo a flexotracción más difundido hasta el momento (tanto en el ámbito público como privado), y que por consiguiente se asumió como de referencia, es el ensayo de fatiga a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PBT).

Adicionalmente, se adoptó el ensayo a deformación controlada, dado que responde a la ecuación del criterio de fatiga del BackViDe (Ecuación 2.27), acorde a lo desarrollado por la mayoría de las leyes de falla y descriptas previamente en el punto 2.4.

3.2. Ensayo de fatiga en viga a flexión en cuatro puntos (4PBT)

Este ensayo consiste en una viga prismática esbelta de pequeñas dimensiones, simplemente apoyada y sometida a esfuerzos de flexo-tracción mediante cargas aplicadas en los tercios medios de la misma, generando un cortante igual a cero en el tramo central de la viga y momento puro de magnitud constante.

Para la ejecución de las probetas, se mezclan y compactan bloques de mezcla asfáltica haciendo uso de un compactador de rodillo para laboratorio con el fin de alcanzar los vacíos de aire especificados para la mezcla asfáltica. Dichos bloques son posteriormente cortados para obtener las vigas a ser ensayadas.

En la Figura 3.1 puede verse un esquema del ensayo y fotografías del equipo perteneciente al Laboratorio Vial del IMAE.

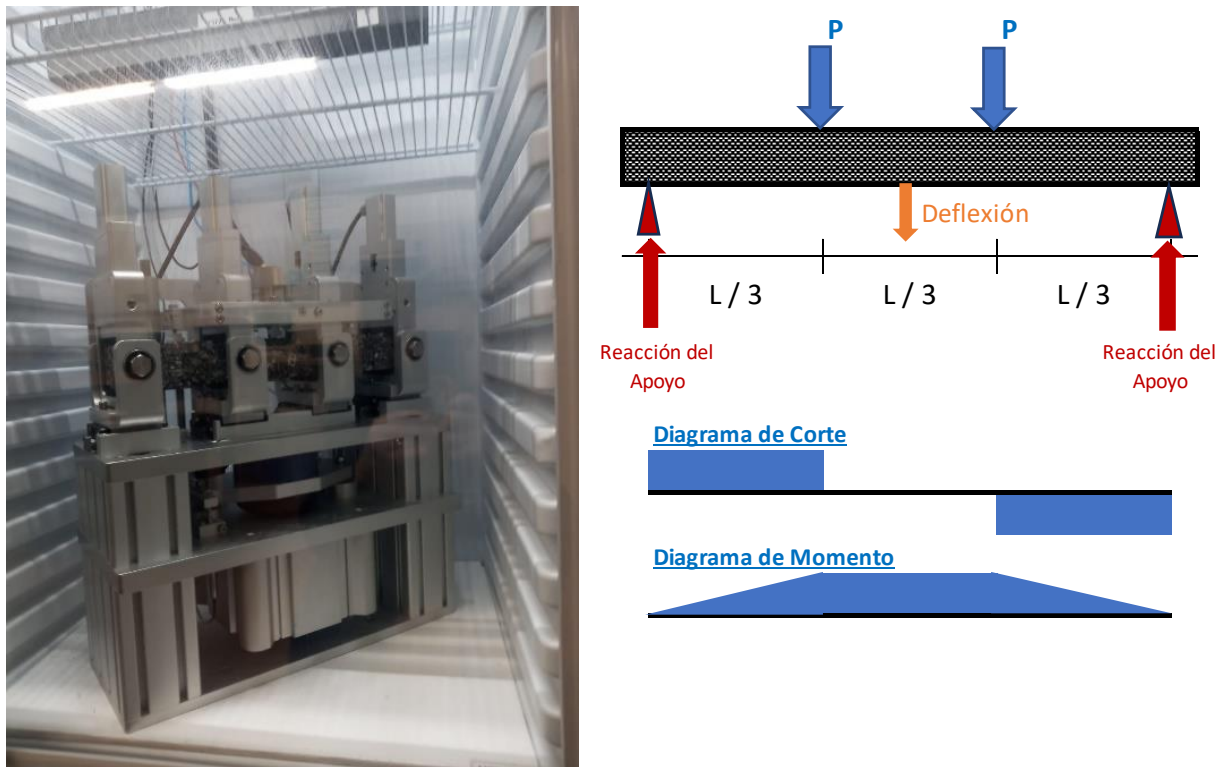


Figura 3.1. Foto y esquema del ensayo de la viga a fatiga 4PBT

Los ensayos considerados para este estudio, se realizaron según lo estipulado en la norma UNE-EN 12697-24, Anexo D [10].

Las probetas se ensayaron dentro de una cámara ambientada que permite mantener la temperatura constante y un sistema que aplica un esfuerzo sinusoidal repetido, siendo factible variar la frecuencia.

Los ensayos se realizaron siguiendo el modo de carga de deformación unitaria constante.

El criterio para definir el final del ensayo empleado fue el tradicional o de vida en servicio, es decir el número de ciclos correspondientes a un módulo de rigidez igual a la mitad de su módulo inicial (medido en el ciclo 100 de carga).

3.3. Mezclas Asfálticas de referencia

Con el propósito de caracterizar el comportamiento a fatiga de aquellas mezclas asfálticas que se emplean con asiduidad en las obras viales tanto en nuestro país como en la región, se procedió a recabar información de ensayos 4PBT efectuados por distintos laboratorios, sobre diferentes tipos de concreto asfáltico en caliente.

Se dispuso de resultados de ensayos de laboratorio correspondientes a seis tipos de mezclas asfálticas, las cuales se diferencian entre sí principalmente por su granulometría y clase de cemento asfáltico que las componen.

En particular, para el caso de la mezcla más habitual como es el la de concreto asfáltico denso con asfalto convencional, se contó con ensayos efectuados sobre varios tipos de mezclas, adoptándose aquella que se consideró más representativa.

En la Tabla 3.1, se presentan las características más relevantes de cada una de las mezclas asfálticas tomadas de referencia en el presente estudio.

Tabla 3.1. Características generales de las Mezclas Asfálticas de referencia

Características	Tipo de Mezcla Asfáltica					
	CAC D20 CA30	CAC D20 AM1	CAC D12 AM3	MAC F-10 AM3	SMA 10 AM3	CAC D12 HiMA
Descripción	Concreto asfáltico denso con asfalto convencional	Concreto asfáltico denso con asfalto modificado	Concreto asfáltico denso con asfalto modificado	Microaglomerado discontinuo del tipo F-10 con asfalto modificado	Concreto Asfáltico en Caliente del tipo <i>Stone Mastic Asphalt</i>	Concreto asfáltico denso con asfalto altamente modificado
Tamaño máximo (mm)	19	19	12	12	12	12
Tipo de asfalto	CA30	AM1	AM3	AM3	AM3	HIMA
Contenido de asfalto en peso (%)	4.5	4.4	4.8	4.75	5.75	5.0
Contenido de asfalto en volumen (%)	11.0	10.7	11.6	11.3	13.6	12.1
Vacios (%)	3.9	4.3	4.5	5.7	4.5	4.7
VAM (%)	14.9	15.1	16.1	17.0	18.1	16.7
RBV (%)	73.8	71.3	72.3	66.1	75.0	71.8
Densidad Teórica Máxima (kg/dm ³)	2.544	2.552	2.533	2.509	2.472	2.538

Características	Tipo de Mezcla Asfáltica					
	CAC D20 CA30	CAC D20 AM1	CAC D12 AM3	MAC F-10 AM3	SMA 10 AM3	CAC D12 HiMA
Densidad Marshall (kg/dm ³)	2.444	2.442	2.419	2.366	2.361	2.418
Módulo a 20° y 10 Hz (MPa)	6150	10250	4400	8235	4865	2500

Los datos e información de ensayos de cada una de las mezclas asfálticas utilizadas en este estudio, han sido amablemente brindados por las empresas YPF S.A. y COARCO S.A., por el Dr. Ing. Francisco Morea de la Facultad de Ingeniería, UNLP y obtenidas de la tesis de grado de Pfeiff, C. y Kroger, I. [42]. Si bien en el Laboratorio Vial del IMAE se cuenta con un equipo recientemente adquirido, al momento de llevar adelante esta tesis, el mismo no se encontraba operativo a fines de poder efectuar experiencias propias.

Cabe destacarse, la importancia de poder contar con información de las mezclas asfálticas no convencionales, como son la MAC F-10 y la SMA, las cuales hace ya más de veinte años se han venido utilizando como carpeta de rodamiento en rutas de gran envergadura pero que aún no se cuenta con la necesaria información debidamente documentada sobre sus propiedades, características y desempeño en servicio, de forma tal que permita una correcta modelización al momento del diseño.

3.4. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga en viga a flexión en cuatro puntos (4PBT) de las seis mezclas estudiadas, se presentan en el Anexo I. Ensayos 4PBT.

Acorde a lo mencionado en el punto 2.2., a partir de estos ensayos, se obtienen como parámetros característicos para cada una de los tipos de mezclas evaluadas, la pendiente de fatiga y la deformación específica de tracción al cabo de un millón de ciclos de carga (Figura 2.2). En la Tabla 3.2, se resumen los valores obtenidos.

Tabla 3.2. Parámetros ensayo 4PBT para cada tipo de mezcla

Mezcla	Alfa ϵ_t	ϵ_{t6} (μst)
CAC D20 CA30	4.3	86
CAC D20 AM1	5.0	147
CAC D12 AM3	5.7	167
MAC F-10 AM3	6.0	247
SMA10 AM3	5.0	326
CAC D12 HiMA	7.6	306

En la Figura 3.2., pueden apreciarse las Curvas de Fatiga de cada una de las mezclas ensayadas.

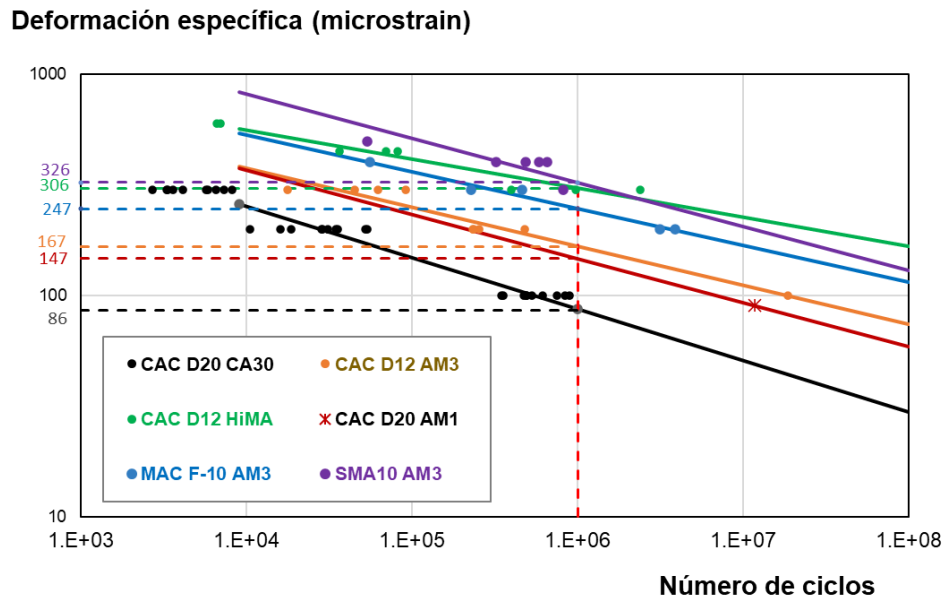


Figura 3.2. Resultados de Ensayo Viga 4PBT para diferentes tipos de mezclas

A partir de la tabla y figura anteriores, se puede inferir el diferente comportamiento a fatiga que presentan las distintas mezclas asfálticas ensayadas.

En particular, se resalta la influencia del tipo de ligante asfáltico, donde aquellas mezclas con cementos asfálticos modificados (o altamente modificados como es el caso de la HiMA), presentan menores pendientes de las curvas (mayor Alfa ϵ_t), lo que repercute en una marcada mejor respuesta a la fatiga. Esto se puede apreciar, por ejemplo, comparando las mezclas CAC D20 CA30 y CAC D12 AM3, en donde para un mismo valor de ϵ_t , (147 ustr), el número de repeticiones admisibles para la segunda resulta del orden de 10 veces del obtenido para la primera.

Capítulo 4. CALIBRACIÓN LEYES DE FISURACIÓN POR FATIGA

4.1. Introducción

Tal como se describiera en el punto 1.2. y se abordara más específicamente en el punto 2.5., actualmente existen dos tipos de Modelos Empírico Mecanicistas, de acuerdo al análisis que efectúan: uno en “Condiciones Iniciales o Fijas” y el otro es el “Modelo de Comportamiento o en Condiciones Incrementales”.

En particular, el objetivo de la presente tesis es efectuar la calibración de las leyes de fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas incluidas en el Modelo en Condiciones Incrementales del método de diseño empírico mecanicista BackViDe, a partir de contar con ensayos de caracterización en laboratorio y con las condiciones de comportamiento de estructuras a escala real (tramos de calibración).

Esta metodología considera a la estructura como un ente que evoluciona a lo largo de la vida, planteando el progresivo deterioro de los materiales. La principal mejora en la aproximación de la realidad, consiste en representar en el modelo, diferentes condiciones climáticas con su tránsito asociado. Se determina la evolución de la estructura en función del daño acumulado en el tiempo y el progreso de distintos parámetros de estado (fisuración, ahuellamiento y rugosidad), para de esta manera poder evaluar y decidir en qué momento se considera que la estructura ha alcanzado el fin de su vida útil.

En lo que respecta específicamente a la modelización y caracterización de la resistencia a la fisuración por fatiga en las mezclas asfálticas, dentro del Modelo en Condiciones Incrementales de BackViDe, se encuentra detallado y desarrollado en el punto 2.5, en el cual se indican las distintas ecuaciones y parámetros intervinientes.

Otro aspecto relevante a considerar al momento de calibrar la metodología incremental, es que las capas subyacentes compuestas por materiales no ligados, presentan una importante influencia sobre el comportamiento global de la estructura, ya que los mismos son tenso dependientes. A medida que las capas asfálticas se fisuran, se produce una sinergia con los suelos que van modificando su módulo y, por tanto, la capacidad de recibir esfuerzos. Esto a su vez, repercute sobre las capas asfálticas superiores y la evolución de su deterioro.

A continuación, se describen los pasos seguidos en el desarrollo de esta tesis, que permitieron ajustar en el sub modelo de fisuración, la ecuación que vincula el daño con el porcentaje de fisuras.

Complementariamente, si bien no era el objetivo principal, se presentan las mejoras efectuadas sobre el modelo de ahuellamiento, tanto para las mezclas asfálticas como para las capas de materiales estabilizados y suelos.

4.2. Primera Calibración. Procedimiento para la determinación del *Shift Factor*

Para efectuar la mencionada calibración, se comenzó planteando los coeficientes del criterio de falla a fisuración de las mezclas asfálticas de BackViDe (Ecuación (2.27)) a partir de los resultados de los ensayos de comportamiento del tipo 4PBT disponibles y descriptos en el Capítulo 3, los cuales se asumen como referencia para cada tipo de ligante asfáltico. Se adoptó la susceptibilidad con el nivel de tensiones ($\text{Alfa}\epsilon_t$) como la pendiente que surge de los ensayos de fatiga 4PBT (Tabla 3.2).

En cuanto al ϵ_{t6} , debido a las diferencias entre las condiciones en laboratorio y el comportamiento en campo ya mencionadas en puntos anteriores, no resulta válido asociar directamente el obtenido en los ensayos dentro del modelo de cálculo.

Por consiguiente, se procedió a efectuar una primera aproximación, que permitió determinar un *Shift Factor* entre los resultados del ensayo 4PBT y el modelo de falla del software, para una mezcla asfáltica convencional [43].

Se asumen los parámetros del criterio de falla de BackViDe para una mezcla asfáltica del tipo CAC D 19 con asfalto AC 70-100 tomada de referencia, obtenidos a través de una calibración efectuada empleando los 11 tramos homogéneos utilizados originalmente por el Dr Giovanon, al momento de efectuar el desarrollo de esta metodología (2013) y que era la que más se asemejaba al tipo de mezcla asfáltica que componían los tramos de calibración hasta ese momento disponibles [5].

En la Tabla 4.1. se muestran los distintos parámetros que caracterizan a la mezcla de referencia y el ϵ_{t6} que surgió como resultado de la calibración.

Tabla 4.1. Parámetros del Criterio de Fatiga en Modelo Incremental para Mezcla Convencional calibrada de referencia

ϵ_{t6} [μstr]	Alfa Asfalto	Alfa ϵ_t	Alfa Módulo	% Asfalto	Módulo E_{20-10} [MPa]
89.5	3.5	4.3	2.7	12.5	6150

Para determinar el ajuste con el ensayo 4PBT, se toman los resultados obtenidos para la mezcla CAC D 20 CA30 (Tabla 3.2) por constituir la mezcla con asfalto convencional de la cual se disponen los resultados del ensayo de comportamiento.

Si bien se propicia caracterizar cada mezcla asfáltica mediante el ensayo de comportamiento 4PBT de la propia mezcla a utilizar, se asume como hipótesis que para un mismo tipo de asfalto son válidas las variaciones del comportamiento a fatiga asumidas en el modelo.

Se corrige por porcentaje de asfalto y por módulo de la mezcla (a 20° y 10 Hz), el ϵ_{t6} con respecto al de la adoptada como referencia.

Con los valores de las Tabla 3.2. y Tabla 4.1, los factores de ajuste resultan:

$$F_{\%asf} = \left(\frac{\%Asf_{4PBT}}{\%Asf_{CAC}} \right)^{Alfa\ Asfalto} = 0.64 \quad (4.1)$$

$$F_{Mod} = \left(\frac{E_{CAC}}{E_{4PBT}} \right)^{Alfa\ E} = 1.00 \quad (4.2)$$

Finalmente, se determina el ϵ_{t6} ajustado. Este proceso es requerido por no disponer de resultados del ensayo para la mezcla de referencia con la que se calibró el modelo incremental.

$$\epsilon_{t6\ ajust} = \epsilon_{t6\ Det} (F_{\%asf} F_{Mod})^{\left(\frac{1}{Alfa\ \epsilon_t} \right)} = 81 \quad (4.3)$$

El $\epsilon_{t6\ ajust}$ resulta menor que el de la mezcla de referencia por tener menor porcentaje de asfalto y un módulo (a 20 °C y 10 Hz) muy similar.

Cabe mencionarse, que en las ecuaciones de falla por fatiga de BackViDe (Ecuación (2.27), se incluyó el módulo correspondiente a la condición del ensayo, a fin de reducir el error por posibles diferencias en la susceptibilidad al módulo del criterio de falla “Alfa E”, resultando así más próximo al de la condición de trabajo de cada mezcla, valor a considerar en cada intervalo temporal del análisis (4 horas de cada día típico de cada mes). Modificando de esta manera, lo existente en anteriores versiones del software donde se referenciaba a un único valor de 3000 MPa, independiente del tipo de mezcla asfáltica [5].

El proceso de ajuste continúa determinando el número de reiteraciones equivalentes N_{EQUIV} que representa para la mezcla de referencia, el ϵ_{t6} del criterio de falla, en el ensayo de viga 4PBT (ver Figura 4.1).

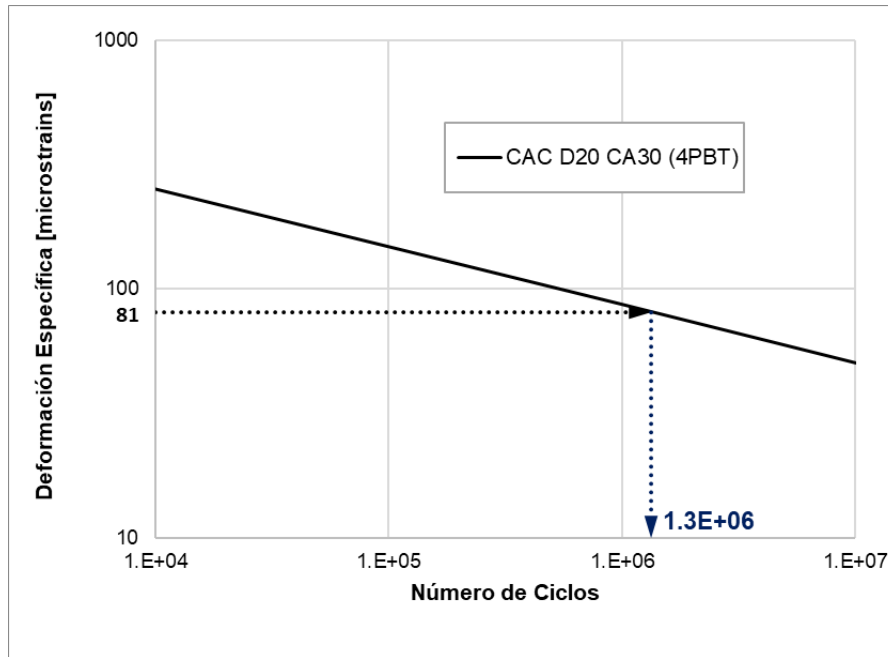


Figura 4.1. Determinación del N_{FEQUIV} para ϵ_{t6} del modelo incremental a partir de ensayo 4PBT

Se tiene que el ϵ_{t6} de Deterioro resultó equivalente al de **1.3 millones** en 4PBT. Este valor es el que inicialmente se adoptó como *Shift Factor*.

Asumiendo como válido este *Shift Factor*, es posible definir una relación que aplicada a las demás mezclas asfálticas de las que se cuenta con resultados de ensayo de comportamiento a fatiga, posibilite determinar los correspondientes ϵ_{t6} del modelo incremental (Ecuación 4.4).

$$\epsilon_{t6 Det} = \frac{\epsilon_{t6 4PBT}}{SF^{(1/Alfa\epsilon_t)}} \quad (4.4)$$

Tabla 4.2. Determinación de $\epsilon_{t6 DET}$ para las Mezclas Asfálticas ensayadas en 4PBT

Mezcla	$\epsilon_{t6 4PBT}$ [μst]	Alfa ϵ_t	$\epsilon_{t6 Det}$ [μst]
CAC D20 AM1	147	5.0	139
CAC D12 AM3	167	5.7	159
CAC D12 HiMA	306	7.6	295
MAC F-10 AM3	247	6.0	236
SMA10 AM3	325	5.0	308

Adoptando estas mezclas (de las que se cuenta con resultados de ensayos a fatiga 4PBT), como referencia para cada tipo de cemento asfáltico, es factible determinar los valores del Criterio a Fatiga en Condiciones Incrementales del modelo BackViDe ϵ_{t6} y $\text{Alfa}\epsilon_t$, para cada una de las mezclas asfálticas disponibles por defecto en el programa. Considerando para ello además, la susceptibilidad al módulo dinámico y al porcentaje de asfalto que presenta cada una de las mismas (Ecuaciones (4.1) y (4.2)).

En la Tabla 4.3, se presentan los valores obtenidos en la primera calibración.

Tabla 4.3. Determinación de ϵ_{t6} para distintas Mezclas Asfálticas BackViDe

Mezcla Asfáltica	Tipo de Ligante	% Asfalto	Módulo 20°-10Hz [MPa]	Alfaϵ_t	ϵ_{t6} 4PBT [μst]	ϵ_{t6} [μst]
CAC D 19 AC 50-60 SF	Pen 50-60	12.0	9926	4.30	68	64.0
CAC D 19 AC 70-100	Pen 70-100	12.5	6151	4.30	95	89.4
CAC D 19 CA30	CA30	11.4	5965	4.30	90	84.7
MAAC 9 AC 70-100	Pen 70-100	14.5	1926	4.30	229	215.4
CAC D 19 AC 150-200	Pen 150-200	12.5	3705	4.30	131	123.2
CAC D 19+RAP SF	Pen 50-60	11.3	10768	4.70	66	62.4
Asfáltica SAE	s/d	6,0	1529	4.30	126	118.5
Asfáltica TAA	Pen 70-100	11,0	1552	4.30	204	191.9
CAC D 19 AM3	AM 5% SBS	10.8	7928	5.70	121	115.6
SMA 19 AM3	AM3	14.9	4406	5.70	195	186.2
SMA 12 AM3	AM3	14.7	3640	5.70	211	201.5
SMA 19 AM3 SF	AM3	14.5	5444	5.70	181	172.9
CAC D 19 AM3 SF	AM3	12.0	4987	5.70	158	150.9
CAD 20 AM3	AM3	10.4	4008	5.70	163	155.7
CAC D 19 AC MULTIG.	Multigrado	11.4	5265	5.00	230	218.2
CAC HIMA 19	AM2 / Pen 20-30	12.8	15490	7.60	164	158.4
CAC HIMA 19 AC MULTIG	Multigrado	12.8	13659	7.60	172	166.2

4.3. Segunda Calibración. Obtención del *Shift Factor* definitivo

La obtención del primer *Shift Factor* permitió definir la ecuación que vincula los resultados del ensayo 4PBT de una mezcla asfáltica genérica, con los parámetros a introducir dentro del BackViDe, como también definir para las mezclas asfálticas disponibles por defecto en el software las constantes tanto del criterio de falla como del ensayo 4PBT teórico asociado. Pero la misma surge de un proceso de calibración realizado sobre tramos homogéneos antiguos, con diferentes metodologías de medición de deflectometría y con caracterización de los parámetros de estado según la Metodología de Evaluación de Estado de los Pavimentos de la DNV del año 1981 [44].

Es por esto, que a fines de validar o corregir el *Shift Factor* anteriormente obtenido, se procedió a recabar información con el objetivo de definir nuevos tramos homogéneos que permitan ser empleados como tramos de calibración.

4.3.1. Proceso y Tramos de Calibración

El objetivo del presente punto consiste en describir someramente el proceso que se llevó adelante para la calibración del criterio de falla, a partir de contar con la historia constructiva del pavimento y con la evolución de distintos deterioros (ahuellamiento, fisuración y rugosidad) de una serie de tramos de rutas en servicio.

La metodología utilizada para la determinación de los tramos homogéneos y posterior calibración, se esquematiza en la Figura 4.2 y consiste en [45, 46]:

- a. Definición de tramos homogéneos. Se identifican sectores que presentan similares características de su estructura, tránsito, clima, deformabilidad y comportamiento en servicio.
- b. Modelización estructural. En cada tramo homogéneo se adoptaron espesores y módulos semillas de las capas estructurales en base a la información disponible:
 - Antecedentes estructurales
 - Medición de espesores sobre testigos calados
 - Ensayos con el penetrómetro dinámico de cono (DCP).
 - Deformabilidad estructural medida mediante *Falling Weight Deflectometer* (FWD)
 - Con dicha información se realizó un retroajuste modular para lograr el modelo estructural de cada tramo.
- c. Determinación de las solicitaciones debidas al tránsito y clima.
 - La valoración de las solicitaciones debidas al tránsito, se efectuó a través del número de ejes equivalentes en efecto destructivo para una carga de referencia de

- 80KN. Para su determinación, se contó con información de TMDA y clasificación vehicular, para la serie de años en estudio, asumiendo los valores de agresividad por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997 [47].
- La acción climática, muy influyente en el comportamiento en servicio de las mezclas asfálticas, se asumió de los archivos climáticos del software correspondiente a una de las estaciones más próxima al emplazamiento de los tramos utilizados.
- d. Para cada tramo homogéneo definido, se procedió al ajuste de los criterios de falla, de manera de obtener la mejor aproximación posible entre la prognosis y los comportamientos evaluados tanto de fisuración total, ahuellamiento y rugosidad.
- e. Se efectúa un proceso de optimización de los parámetros de calibración, de manera tal de minimizar las diferencias entre las constantes de ajuste tramo a tramo.
- f. Valoración de las dispersiones y análisis de la validez de la constante genérica adoptada.

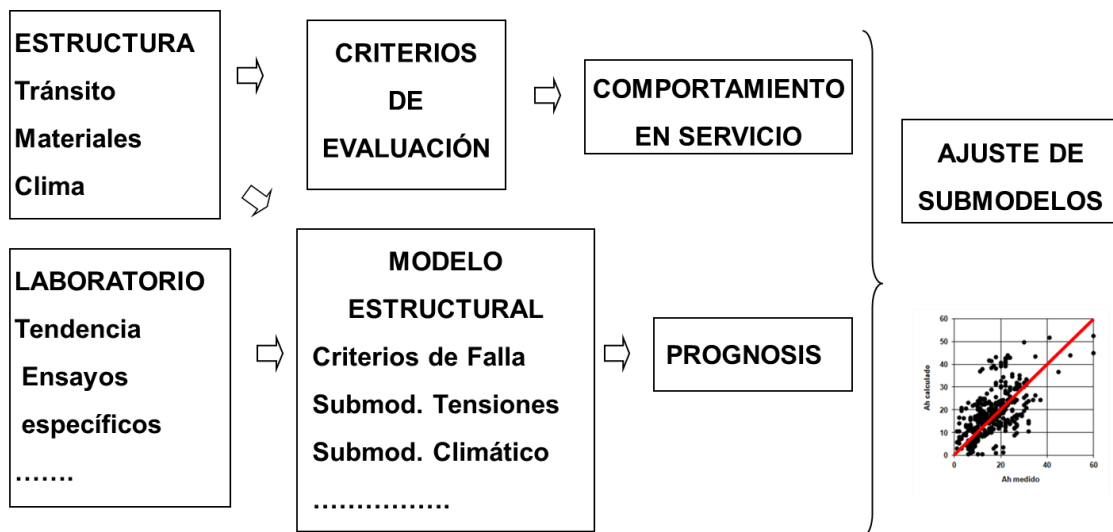


Figura 4.2. Esquema de la metodología de calibración utilizada

Fuente: Aspectos Relevantes en los Criterios de Falla. O. Giovanon, M. Pagola [46]

En particular para la presente tesis, los datos recopilados y disponibles para la calibración del modelo de comportamiento, corresponden a una importante Ruta Nacional del área central de nuestro país, de la que se contó con información de sus capas estructurales, deflectometría (medida a través de equipo FWD), tránsito y comportamiento a lo largo de sus años en servicio.

Se destaca la importancia de contar en este caso con datos confiables para la realización del ajuste/calibración de los modelos de comportamiento, en especial el referido a fisuración de las mezclas asfálticas por fatiga.

En la Tabla 4.4., se resumen algunas de las características de los tramos homogéneos empleados, como ser la estructura que los componen, el tránsito y las evaluaciones de estado disponibles. Se destaca la presencia de dos tipos de mezclas asfálticas, bases de mezcla convencional y carpetas con asfaltos modificados con polímeros.

Tabla 4.4. Detalle características de los tramos homogéneos utilizados para la calibración

Tramo Homogéneo	Espesor Estructural (cm)	Espesor Carpeta (MAC F-10 AM3) (cm)	Espesor Bases Asfálticas (CAC D19 CA30) (cm)	Edad (años)	Datos de Comport. (años)	Tránsito Anual (ejes 80KN / carril)
S1	57	3	14	16	3	1 203 000
S4	57	3	14	17	3	1 239 000
S7	56	3	14	17	3	1 094 000
S8	57	3	14	17	3	1 094 000
S9	57	3	14	17	3	1 094 000
S11	55	3	14	16	4	1 151 000
S12	57	3	14	16	4	1 203 000
S17	67	3	14	16	4	1 151 000
S19	67	3	14	16	4	1 151 000
S21	67	3	14	16	4	1 151 000

En el Anexo II Tramos de Calibración, se detalla la información relativa a cada uno de los tramos homogéneos definidos.

4.3.2. Ajuste del Modelo de Fatiga

A partir de la información recabada y procesada de cada tramo homogéneo, se procedió a efectuar el nuevo ajuste del submodelo de fisuración.

Debido a que no se contaba con ensayos de caracterización de las mezclas asfálticas propiamente ejecutadas en los tramos, se tomaron como referencia a las disponibles por defecto en BackViDe (según la primera calibración como se muestra en Tabla 4.3) y que más se asemejaban en cuanto al tipo de asfalto y composición volumétrica.

El proceso se realizó en forma iterativa para cada tramo en particular, determinando un nuevo ϵ_{t6Det} para las mezclas utilizadas, de manera tal que se minimicen las diferencias entre el modelo de fisuración y el deterioro efectivamente evaluado.

Los ϵ_{t6Det} para cada tramo, se determinaron aplicando la Ecuación (4.4) a partir de los ϵ_{t6PBT} anteriormente calculados, y asumiendo la hipótesis ya realizada respecto a la validez de aplicar un mismo *Shift Factor* para los diferentes tipos de mezclas asfálticas.

Por consiguiente, se obtuvo un nuevo *Shift Factor* por tramo homogéneo analizado.

Se ejemplifica el procedimiento realizado con el Tramo Homogéneo denominado **S11**. En el Anexo III Salidas BackViDe – Ajuste de Modelos, se resumen los datos y resultados obtenidos para el conjunto de tramos.

La Tabla 4.5 esquematiza la estructura existente, mientras que la tabla 4.6. resume el tránsito por carril y la tabla 4.7 las evaluaciones de estado de la superficie.

Tabla 4.5. Estructura de pavimento existente. Tramo S11

CAPA	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICA
CAC MAC F-10	3	
CAC D19 CA30	14	
Base Estabilizado Granular	19	CBR=48%
Subbase Suelo Arena	19	CBR=8%
Subrasante	Suelo tipo A4	DN =8,5mm/g

Tabla 4.6. Número de eje equivalentes anuales por carril. Tramo S11

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N_{80KN} [x10 ⁶]	1.00	1.03	1.08	1.27	1.02	0.99	0.99	1.05	1.36	1.34	1.32	1.31	1.26	0.55	1.28	1.57

Tabla 4.7. Variación a lo largo de los años, de indicadores del estado característicos.
Tramo S11

Fecha	Meses desde Habilitación	Deterioro			
		Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI [mm/km]	Fisuras Totales [%]	Baches [%]
nov-10	43	5.7	1.454		
ene-12	57	--	--	4.70%	0.005%
ago-18	136	6.8	1.590	6.51%	0.009%
feb-23	190	9.1	1.793	15.81%	0.091%

En la Figura 4.3. se muestra el modelo estructural obtenido luego de realizar el retroajuste hasta lograr la convergencia del proceso (BackMod). Se asume como representativa de la estructura característica, observándose módulos acordes a los valores semillas y muy reducidos errores en el cuenco calculado respecto al medido, inferiores a 10 micrones

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados

Número de iteraciones 28, Convergencia de módulos,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA FWD

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)								Error promedio 3.8				Error promedio caso anterior 3.40			
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800								
Medida	414	315	271	152	93	63	51	41								
Calculada	415	317	264	156	98	66	47	37								
Error	1	2	7	4	5	3	4	4								

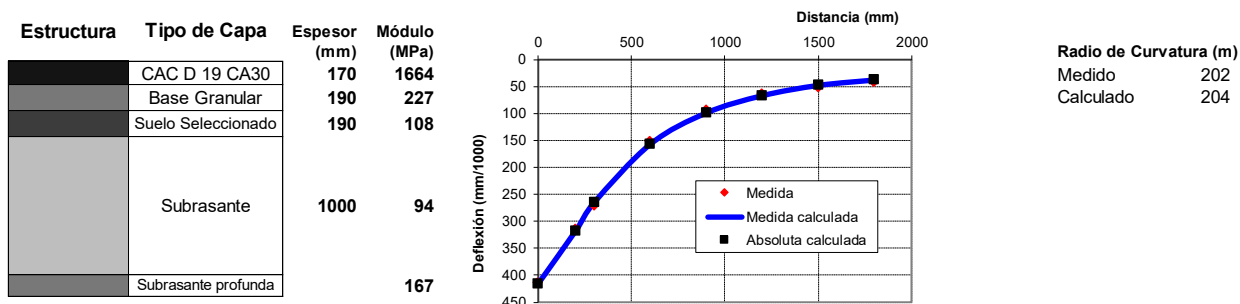


Figura 4.3. Resultado del retroajuste modular obtenido para Tramo S11

Las Figura 4.4 y 4.5., muestran la estructura del Tramo S11 desde la pantalla del Modelo en Condiciones Incrementales de BackViDe y las correspondientes constantes de los criterios de fallas de cada una de las capas respectivamente. A diferencia del modelo obtenido del retroajuste modular, se requiere en el modelo incremental definir en forma individual cada una de las capas constructivas.

Estructura		Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	17	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)	
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1200	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1		
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1		
3 Base Granular		190	227	2.10	0.40	Adherida	1		
3 Suelo Seleccionado		190	108	1.12	0.40	Adherida	1		
3 Subrasante			94		0.40	Adherida	1		

Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

Figura 4.4. Estructura del Tramo S11 BackViDe Condiciones Incrementales

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3	1	245.00	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.98	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.98	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Seleccionado	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.480	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

Figura 4.5. Parámetros de las Leyes de Falla de cada capa adoptados luego del ajuste

En particular, en esta figura se resaltan en amarillo aquellos parámetros que se ajustan a efectos de lograr la calibración de los mencionados criterios de falla.

La Figura 4.6 muestra las gráficas correspondientes a los parámetros de estado de la superficie generadas por BackViDe luego de haber realizado el ajuste de los sub modelos, observándose una adecuada correspondencia entre los valores medidos (marcas puntuales) y estimados (líneas de trazo continuas).

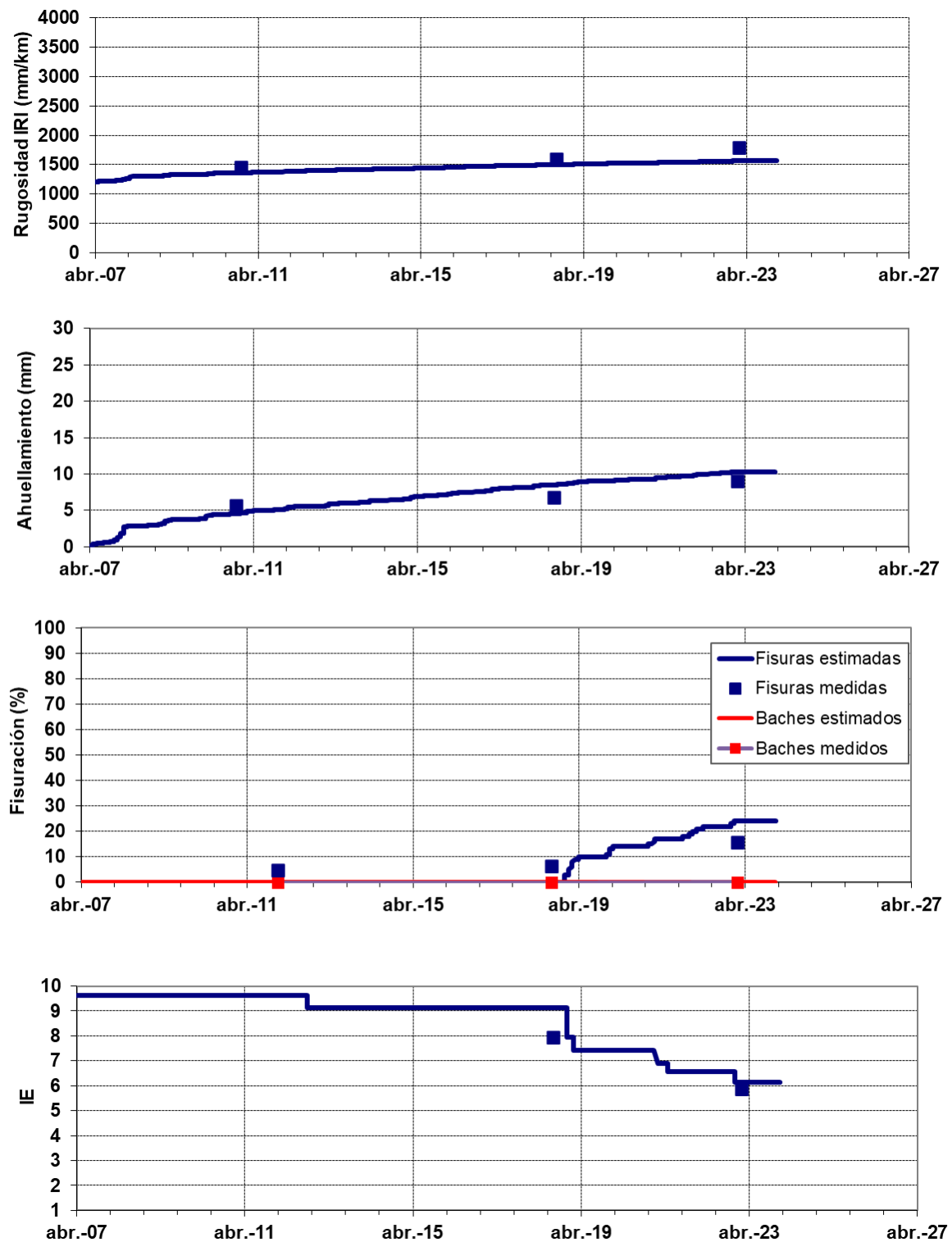


Figura 4.6. Comportamiento de superficie con parámetros ajustados para el tramo T11
Se indica finalmente, el *Shift Factor* calculado para el Tramo S11, tomando de referencia la mezcla asfáltica CAC D19 CA30:

$$SF = \left(\frac{\varepsilon_{t6\ 4PBT}}{\varepsilon_{t6\ Det}} \right)^{Alfa\varepsilon_t} \quad (4.5)$$

$$SF = \left(\frac{90ustr}{89ustr} \right)^{4,3} = 1,05$$

Completado el proceso de calibración de todos los tramos, en la Figura 4.7. se presenta una comparación entre los porcentajes de fisuración efectivamente medidos y los obtenidos a través de los cálculos. Se grafica, además, la recta correspondiente a la igualdad entre mediciones y estimaciones, como también se informa el desvío estándar de los errores residuales.

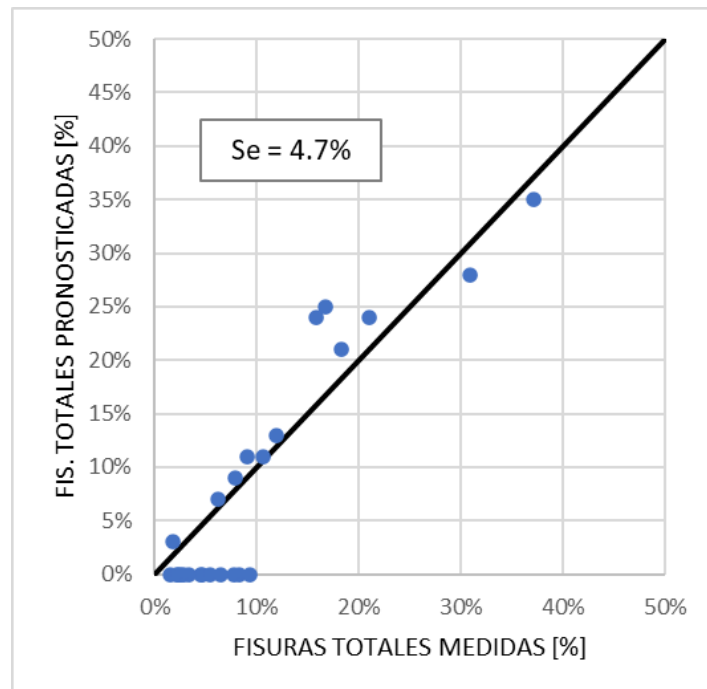


Figura 4.7. Fisuración estimada versus medida para el conjunto de tramos

De la Figura anterior, se concluye que se obtuvo una buena concordancia entre los valores medidos y los obtenidos con el modelo de falla. Incluso el desvío estándar de los errores residuales resulta inferior al de la calibración original (año 2013), el cual era de 9,4% [5].

Se destaca además que, cuando se efectúa la calibración, se intenta reducir la dispersión entre los valores medidos en campo y los estimados por el modelo. Por esto, en algunos puntos / años, el porcentaje de fisuras calculado resulta menor que el medido y en otros casos resulta a la inversa. Dado que en cada tramo de calibración se contaba con datos de varios años, en general se cumple que lo estimado para los primeros años resulta menor que el porcentaje de fisuras medido en campo, siendo lo contrario para los últimos años de medición.

4.3.3. Resultados Finales de la Calibración

Como se detallara en el punto anterior, para cada tramo homogéneo, a partir de un mismo valor de *Shift Factor*, se determinó un valor de la variable ϵ_{t6} para ambos tipos de mezclas consideradas, de manera tal de aproximar las prognosis del modelo a los deterioros evaluados. Los valores individuales obtenidos se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Valores calculados de *Shift Factor* y ϵ_{t6} CALIBRADO para cada Tramo

Tramo Homogéneo	Shift Factor Calibración	ϵ_{t6} CALIBRADO CAC CA30	ϵ_{t6} CALIBRADO MAC F-10 AM3
S1	1.10	88.0	243.1
S4	2.05	76.2	219.1
S7	1.48	82.2	231.4
S8	0.94	91.3	249.6
S9	1.08	88.4	243.9
S11	1.05	89.0	245.0
S12	0.80	94.8	256.4
S17	0.80	94.8	256.4
S19	0.60	101.4	269.0
S21	0.93	91.5	250.0

En forma análoga a lo efectuado en la primera calibración, se adopta como ϵ_{t6} CALIBRADO a la media aritmética de todos los valores obtenidos, y a partir del mismo se determina un nuevo *Shift Factor* genérico.

$$SF_{CALIB} = \left(\frac{\epsilon_{t6 \text{ 4PBT}}}{\epsilon_{t6 \text{ CALIB}}} \right)^{Alfa_{\epsilon t}} \quad (4.6)$$

$$SF_{CAC \text{ CA30}} = \left(\frac{90 \text{ ustr}}{89,75 \text{ ustr}} \right)^{4,3} = 1,012$$

$$SF_{MAC \text{ F-10 AM3}} = \left(\frac{247 \text{ ustr}}{246,37 \text{ ustr}} \right)^{6,0} = 1,015$$

La igualdad de los SF obtenidos para los dos tipos de mezcla presentes en los tramos de calibración, resulta como consecuencia de haber mantenido la hipótesis de su constancia en el proceso de ajuste al comportamiento en servicio.

La diferencia que se observa en la 3° cifra significativa, no tiene ningún peso y se corresponde con el redondeo de los ϵ_6 obtenidos durante la calibración.

En el Capítulo 5 se aborda un análisis estadístico a los fines de comparar los SF alcanzados en cada etapa y definir el finalmente adoptado para el *software*.

4.4. Mejora del Modelo de Ahuellamiento

Otra de las fallas más importantes en los pavimentos flexibles, es la deformación permanente o ahuellamiento, la cual involucra a todas las capas componentes de la estructura vial y a los suelos de fundación o subrasante.

Si bien la calibración de los criterios de falla por ahuellamiento, no estaban incluidos inicialmente dentro de los objetivos específicos de esta tesis, debido a su influencia en el comportamiento global de las estructuras de pavimento, y por consiguiente en los modelos de deterioro que utiliza el BackViDe, al comparar en los diferentes tramos el comportamiento en servicio con la estimación del modelo, resultó necesario efectuar el ajuste de las constantes que definen estos criterios de falla, tanto de las mezclas asfálticas como de las capas de suelos y materiales no ligados.

El procedimiento genérico para estimar la deformación permanente, consiste en establecer, para cada material componente de la estructura del camino, una ecuación constitutiva que relaciona la deformación residual o plástica y el estado de tensiones aplicados, número de aplicaciones de la misma y las características intrínsecas del material, del tipo:

$$\epsilon_p = f(\sigma, N, Pi) \quad (4.7)$$

Donde: ϵ_p : *deformación específica permanente*

σ : *estado de tensiones impuesto*

N : *número de repeticiones de ese estado de tensiones*

Pi : *parámetros característicos del material.*

En particular, en el Método Mecanicista-Empírico BackViDe, el criterio de falla por ahuellamiento en el Modelo Incremental está adoptado en base a una ecuación general de manera que su formato sea común a todos los tipos de materiales y permita incorporar diferentes criterios, expresando el valor de la deformación plástica acumulada, en función del número de ciclos con la siguiente ecuación:

$$\log \epsilon_p = f_1 + f_2 \epsilon_e + f_3 \log \epsilon_e + f_4 \log N + f_5 \epsilon_e \log N + 0,05 f_6^{Temp} \log N \quad (4.8)$$

Donde: ε_p : deformación específica plástica acumulada (μstr)

ε_e : deformación específica elástica (μstr)

N : número de reiteraciones de ε_e

Temp: temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$f1, f2, f3, f4, f5, f6$: parámetros que caracterizan al material.

4.4.1. Deformación Permanente en Mezcla asfáltica

4.4.1.1. Ensayo de laboratorio Wheel Tracking Test (WTT)

Uno de los ensayos más difundidos para valorar la respuesta de las mezclas asfálticas a la deformación plástica es el ensayo de “Rueda Cargada” conocido como WTT por sus siglas en inglés [48], constituyendo una buena herramienta para establecer comportamientos de diferentes mezclas alternativas y caracterizar comparativamente su aptitud ante el ahuellamiento, valorando la misma en condiciones fijas de tensiones y críticas de temperatura.

En Argentina, el ensayo de rueda cargada (WTT) cobró paulatinamente mayor relevancia como modo de acotar las características de ahuellabilidad de las mezclas, siendo en los últimos años, incluido su control dentro de las especificaciones técnicas, y acotando sus valores requeridos en función del nivel de tránsito y ubicación dentro del paquete estructural como base o rodamiento [49].

El procedimiento general del ensayo consiste en medir la velocidad de deformación y la deformación vertical que se produce en un espécimen de mezcla asfáltica prismático, ante la acción de una carga dinámica aplicada mediante una rueda cargada. Los resultados que se obtienen de este ensayo, pueden expresarse como:

$$\varepsilon_p = A N^B \quad (4.9)$$

Equivalente a la ecuación de una recta en escala bilogarítmica, representando B su pendiente:

$$\log \varepsilon_p = \log A + B \log N \quad (4.10)$$

Donde: ε_p : deformación plástica específica acumulada

N : número de ciclos de carga

A y B : constantes del ensayo

En la Figura 4.8, se muestra el equipo de ensayo del tipo WTT desarrollado en el Laboratorio Vial del IMAE, que es con el cual se ensayaron las mezclas tomadas de referencia para la calibración.

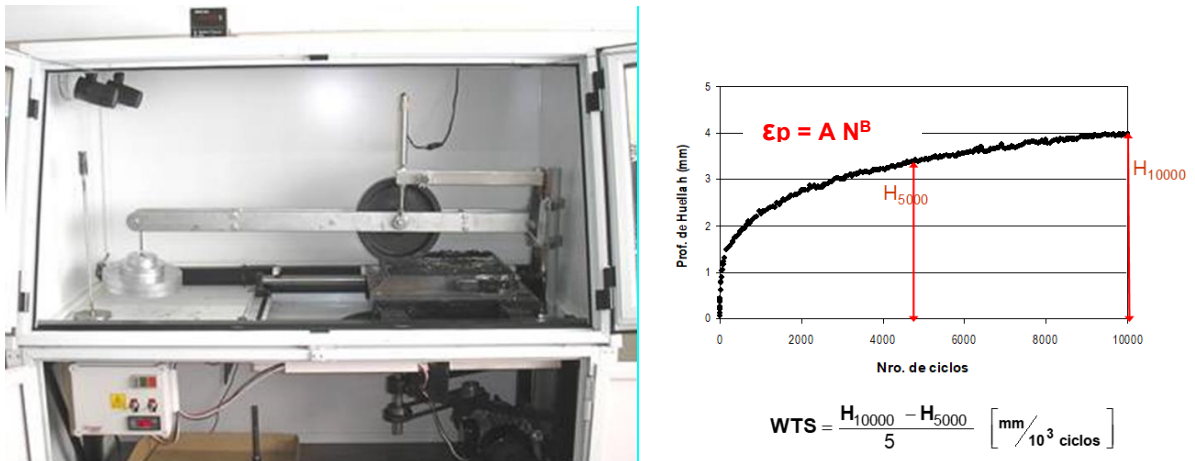


Figura 4.8. Vista del equipo de Rueda Cargada del IMAE y gráfica con parámetros típicos

Mezclas Asfálticas de referencia:

Se dispuso de resultados de 162 ensayos de laboratorio correspondientes a diferentes tipos de mezclas asfálticas ensayadas en el Laboratorio Vial del IMAE, las cuales difieren principalmente en la clase de cemento asfáltico que las componen.

La totalidad de los ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma BS EN 12697-22:2003- procedimiento B y a partir de probetas elaboradas con compactación mediante martillo vibratorio.

En la Figura 4.9, se presenta la tendencia promedio de evolución del ahuellamiento en el ensayo WTT de diferentes tipos de mezclas compactadas en caliente, en función del número de aplicaciones de la carga. En la Tabla 4.9, se muestran los parámetros representativos que surgen de los mismos. Si bien en el ensayo es común expresar número de ciclos, se prefiere plantear las gráficas en función del número de reiteraciones, siendo un ciclo dos reiteraciones de la carga, ida y vuelta.

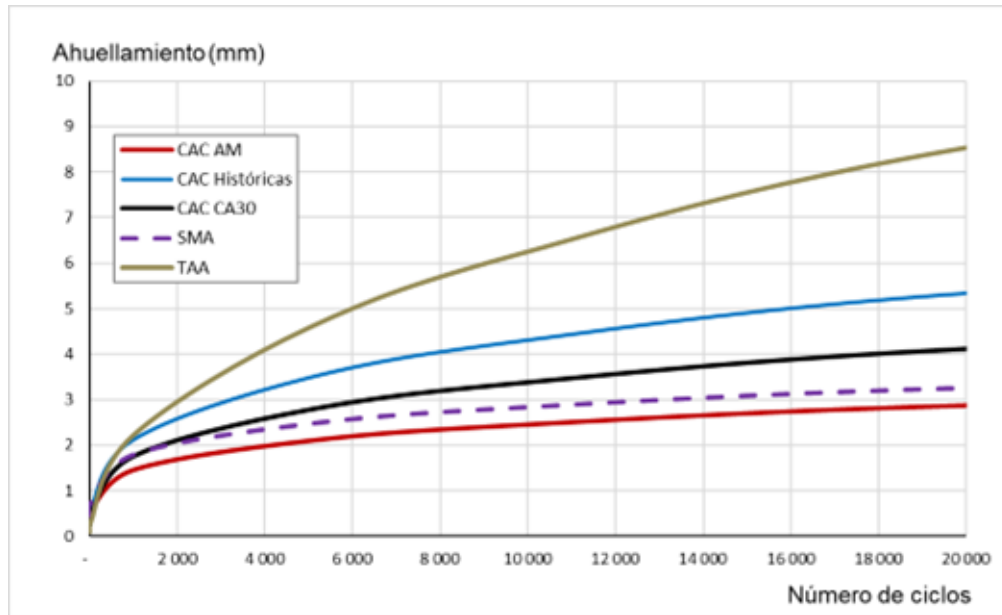


Figura 4.9. Comportamiento de diferentes mezclas asfálticas en el ensayo WTT

Tabla 4.9. Parámetros ensayo WTT para diferentes tipos de mezclas asfálticas

Mezcla	A	B
CAC Históricas	0,005	0,309
CAC CA30	0,005	0,283
CAC AM	0,006	0,228
TAA	0,002	0,449
SMA	0,009	0,200

4.4.1.2. Calibración de la ley de falla

Para el caso de las mezclas asfálticas, la ecuación genérica (4.8) adopta en la versión actual, nulos los coeficientes f_2 , f_4 y f_5 , resultando:

$$\log \varepsilon_p = f_1 + f_3 \log \varepsilon_e + 0,05 f_6^{Temp} \log N \quad (4.11)$$

Esta Ley de Falla por ahuellamiento es el resultado del ajuste de la anterior versión con ensayos de desempeño WTT, en los cuales se observó que la pendiente respecto al número de ciclos resulta una función de la temperatura de la mezcla.

Gracias a disponer de la tesis doctoral del Dr. Francisco Morea [50], en la cual se presentan ensayos WTT a distintas temperaturas de diferentes mezclas asfálticas, se pudo constatar que el factor que condiciona la variación respecto al número de reiteraciones (B, en

Ecuación (4.9)) resulta dependiente de la temperatura, adoptando la forma de la Ecuación (4.11).

En las gráficas de la Figura 4.10, se muestra, a modo de ejemplo, la variación del coeficiente B en función de la temperatura, con dos tipos de mezcla asfáltica (Densa y SMA), y con tres tipos de ligante asfáltico (Convencional, Multigrado y Modificado). En estas gráficas se indican los resultados de los ensayos y con líneas de trazo la ecuación propuesta (4.12), trazada a partir del punto de paso de la temperatura normal del ensayo WTT [51].

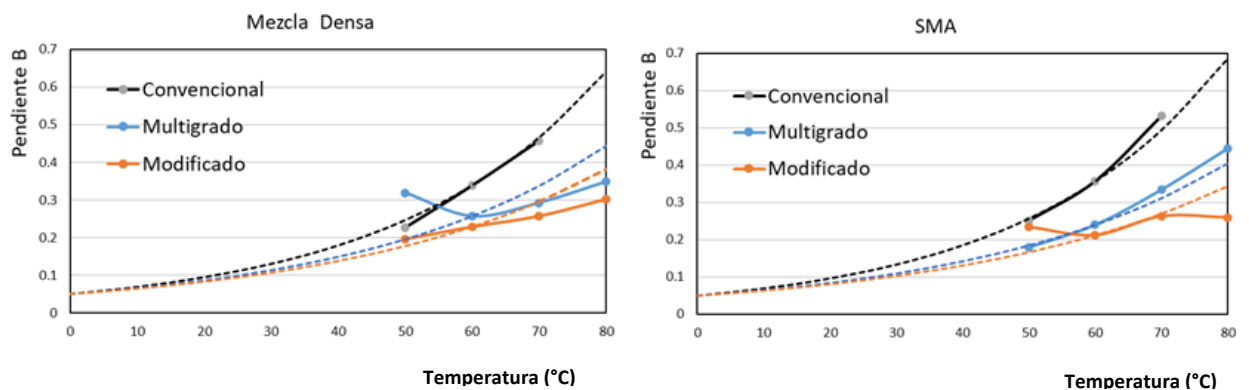


Figura 4.10. Variación del coeficiente B con la temperatura

$$B = 0,05 f6^{Temp} \quad (4.12)$$

Tal como puede apreciarse, esta expresión genérica permite aproximar el comportamiento de diferentes mezclas con la temperatura, a partir del dato del ensayo WTT a la temperatura normal. Por lo tanto, el $f6$ del criterio de falla por ahuellamiento puede calcularse a partir de la pendiente del ensayo de WTT a 60°C, resultando:

$$f6 = 10^{(\log B - \log 0.05)/60} \quad (4.13)$$

Finalmente, a partir de la calibración del modelo dentro del ajuste global se determinan $f1$ y $f3$, resultando que la ecuación general para determinar el ahuellamiento en las mezclas asfálticas queda expresada como:

$$\log \varepsilon_p = 0,500 + \log \varepsilon_e + 0,05 f6^{Temp} \log N \quad (4.14)$$

4.4.2. Deformación Permanente en Suelos

Como se indicara anteriormente, el criterio de falla por ahuellamiento en BackViDe responde a la ecuación genérica (4.8), siendo para el caso de los suelos, nulo el término dependiente de la temperatura, resultando por tanto:

$$\log \varepsilon_p = f1 + f2 \varepsilon_e + f3 \log \varepsilon_e + f4 \log N + f5 \varepsilon_e \log N \quad (4.15)$$

Para definir los distintos parámetros de esta ecuación, se analizó la posibilidad de vincular estas variables a las obtenidas mediante un ensayo triaxial con cargas repetidas para evaluar el comportamiento plástico de suelos y materiales granulares llevado adelante por la Dra. Silvia Angelone et al en el Laboratorio Vial del IMAE [52], en el cual se evaluaron tres suelos cohesivos y uno granular.

La técnica de ensayo empleada, consistió en la realización de un ensayo triaxial con cargas repetidas sobre probetas cilíndricas compactadas en forma vibratoria en laboratorio para las condiciones óptimas del ensayo de compactación de referencia. Todos los ensayos se ejecutaron con una frecuencia de sollicitación igual a 1 Hz (0,2 s de tiempo de carga y 0,8 s de tiempo de reposo entre cargas sucesivas) habiéndose aplicado 80.000 repeticiones de carga para cada uno de los estados adoptados.

A partir de los resultados obtenidos de más de 20.000 valores experimentales para cada uno de los suelos ensayados, se determinó un criterio de falla basado en el modelo matemático formulado por Larsen et al, el cual resulta:

$$\varepsilon_p = a \varepsilon_r^c N^b \quad (4.16)$$

Donde

ε_p : deformación axial específica permanente

ε_r : deformación axial específica resiliente

N: número de aplicaciones de carga

a, b, c: constantes experimentales.

La Ecuación (4.16) en expresión bilogarítmica resulta:

$$\log (\varepsilon_p \times 100) = \log a + c \log (\varepsilon_r \times 100) + b \log N \quad (4.17)$$

Aplicando conceptos matemáticos, se llega a la siguiente expresión:

$$\log \varepsilon_p = (-2 \log a + 2c) + c \log \varepsilon_r + b \log N \quad (4.18)$$

Efectuando una comparación entre las expresiones (4.15) y (4.17), se puede asumir:

$$f1 = (-2 \log a + 2c); f2 = f5 = 0; f3 = c; f4 = b$$

Donde a, b y c son los parámetros que surgen del ensayo triaxial dinámico.

En una primera instancia, se trabajó con los valores disponibles de los ensayos efectuados por Angelone et al, a partir de los cuales se alcanzaron las siguientes conclusiones preliminares:

f_1 = factor común de ajuste para deformaciones permanentes en suelos

$$f_3 = 1$$

$f_4 = b$ (pendiente de la curva de deformación, la cual resulta menor para suelos con mejor comportamiento)

Tal como se mencionara anteriormente, sólo se disponía de resultados de ensayos de tres suelos cohesivos y uno granular, por consiguiente la cantidad de datos al momento de elaborar esta tesis no resultaba del todo representativo para definir en forma confiable los parámetros para diferentes tipos de suelos.

En este contexto, el factor f_4 para los diferentes tipos de suelos y materiales no ligados incluidos como valores por defecto dentro de BackViDe, se obtuvieron contemplando los resultados disponibles de los ensayos antes mencionados y efectuando un ajuste a partir de tramos experimentales de los que se contaba con datos de seguimiento en servicio (tramos originalmente empleados en la calibración de BackViDe).

De este ajuste, surgen los parámetros indicados en la Tabla 4.10 y los cuales se incorporan al software en la hoja V_Defecto. Los valores de f_4 se mayoraron respecto a lo indicado en los ensayos de comportamiento disponibles, debido a que resultaba excesivo el efecto de atenuación de la tasa de deformación con el número de ciclos (endurecimiento).

Tabla 4.10. Valores f_4 por defecto para cada tipo de material

Material	f_4 (Pendiente de la curva de deformación)
Base Granular	0.40
Estab Tratado con Cemento	0.35
Sub Base Granular	0.44
Suelo Cemento	0.42
Suelo Cal	0.46
Suelo Seleccionado	0.48
Subrasante Mejorada	0.51
Subrasante pobre	0.55
Subrasante	0.53
Subrasante profunda	0.44

Material	f4 (Pendiente de la curva de deformación)
Mr (CBR 100)	0.37
Mr (CBR 80)	0.40
Mr (CBR 60)	0.42
Mr (CBR 40)	0.44
Mr (CBR 30)	0.46
Mr (CBR 20)	0.48
Mr (CBR 15)	0.51
Mr (CBR 13)	0.51
Mr (CBR 08)	0.53

Finalmente, al momento de efectuar la segunda calibración (punto 4.3), se procedió al ajuste del f1 a fines de obtener la mejor aproximación posible entre la prognosis y las deformaciones permanentes medidas en cada tramo homogéneo (el factor ajustado se ejemplifica resaltado en la Figura 4.5).

La Tabla 4.11, muestra los valores obtenidos para cada tramo de calibración.

Tabla 4.11. Valores f1 para cada Tramo de calibración

Tramo Homogéneo	f1^{CALIBRADO} Factor común de ajuste
S1	-1.961
S4	-1.990
S7	-1.700
S8	-2.150
S9	-1.780
S11	-2.090
S12	-2.150
S17	-1.960
S19	-1.920
S21	-2.000
Promedio	-1.970
Desvío estándar	0.146

Capítulo 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de los resultados obtenidos se efectúa bajo la consideración que los *Shift Factor* calculados representan un número de millones de reiteraciones en el ensayo 4PBT equivalente a la deformación específica correspondiente al inicio de fisuras en el modelo para un millón de reiteraciones, a las mismas condiciones de frecuencia y temperatura del ensayo.

Por lo tanto, en forma análoga a lo que plantea, entre otros la metodología AASHTO [55], se procede a aplicar el logaritmo de manera tal de aproximar la variable a una distribución gaussiana o normal.

En la Tabla 5.1, se presentan los valores de los *Shift Factor* normalizados, con la determinación de los parámetros estadísticos como son el promedio y la desviación estándar.

Tabla 5.1. Valores normalizados de *Shift Factor* ($\log N_{\epsilon_{16}}$) de cada Tramo de calibración

Tramo Homogéneo	<i>Shift Factor</i> Calibración	Normalización <i>Shift Factor</i> Calibración
S1	1.10	0.041
S4	2.05	0.312
S7	1.48	0.170
S8	0.94	-0.027
S9	1.08	0.033
S11	1.05	0.021
S12	0.80	-0.097
S17	0.91	-0.097
S19	0.60	-0.222
S21	0.93	-0.032
Promedio		0.010
Desvío estándar		0.148

Para analizar la confiabilidad alcanzada, se compara la desviación estándar obtenida con la que se determinó en la calibración original del submodelo de fisuración [5], siendo la misma 0,17.

Por otra parte, destacar que la metodología más empleada en nuestro país y más específicamente en los organismos viales, como es la Guía empírica AASHTO 1993 [39, 55], presenta una desviación estándar que varía desde 0,35 (para su experiencia de origen, en donde se mensuraron todos los materiales y vehículos que solicitaron las estructuras construidas) recomendando hasta 0,49 para aquellos tramos que presentan incertidumbres en cuanto a materiales y tránsito.

Surge, por tanto, que la desviación alcanzada en esta etapa, resulta reducida y satisfactoria.

Queda ahora por determinar cuál de los *Shift Factor* obtenidos para cada una de las etapas de calibración, será finalmente el adoptado.

Se recurre a efectuar una prueba de hipótesis, de manera tal de poder determinar si los SF son significativamente diferentes uno de otro, o bien se los puede considerar como parte de las variaciones propias de las muestras utilizadas.

Para esto, se procede a determinar el Intervalo de Confianza a partir de la media y desvío estándar muestral indicadas en la Tabla 5.1.

Debido a que el tamaño de la muestra es menor a 30, y además no se conoce con precisión el valor de la varianza poblacional, corresponde aplicar la distribución t de Student con n-1 grados de libertad [53].

Por consiguiente, el Intervalo de Confianza se determina a través de la siguiente expresión:

$$\left(\bar{x} - t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \times \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (5.1)$$

Donde:

\bar{x} : *media aritmética muestral*

s: *desviación estándar muestral*

n: *tamaño de la muestra*

$t_{n-1; \alpha}$: *valor de la distribución t para n-1 grados de libertad y un nivel de significancia*

α .

α : *nivel de significancia*

Como se comentara anteriormente, es necesario trabajar con una variable que se aproxime a una distribución normal. Es en este sentido, que el análisis se efectúa a partir de los valores del logaritmo de los SF.

Se plantea por tanto, como hipótesis nula, que ambos *Shift Factor* son iguales. En la Tabla 5.2., se muestran los resultados alcanzados para un nivel de significancia de 5%, 10% y 20%.

Tabla 5.2. Intervalos de Confianza de *Shift Factor* para distintos niveles de significancia

Parámetro	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.20$
Media muestral (\bar{x})	0.010 (SF = 1.024)	0.010 (SF = 1.024)	0.010 (SF = 1.024)
Desvío estándar muestral (s)	0.148	0.148	0.148
Grados de libertad (n-1)	9	9	9
Media (μ)	0.114 (SF = 1.3)	0.114 (SF = 1.3)	0.114 (SF = 1.3)
Valor crítico distribución t ($t_{n-1, \alpha/2}$)	2.262	1.833	1.383
Límite Inferior Intervalo (Li)	-0.096	-0.076	-0.054
Límite Superior Intervalo (Ls)	0.117	0.096	0.075
Condición	$\mu \leq Ls$	$\mu > Ls$	$\mu > Ls$

De la tabla anterior, surge que la probabilidad que el valor correspondiente al SF=1,3 se encuentre dentro del intervalo de confianza, es muy próximo a 5%, es decir muy bajo. Para el resto de los valores de nivel de significancia evaluados, se rechaza la hipótesis nula, es decir que ambos SF no son equivalentes en términos estadísticos.

Se concluye por tanto, que para una confiabilidad del 10% y asumiendo la desviación estándar de la muestra como la de la segunda calibración, el valor obtenido del *Shift Factor* es diferente respecto al inicialmente planteado.

Dada la mejor información disponible respecto a las mezclas asfálticas utilizadas, a las capas estructurales subyacentes, a la forma de medición de la deformada (siempre con FWD) y a la metodología de evaluación superficial de los tramos, se asume al *Shift Factor* obtenido en la segunda calibración, **SF = 1,02**, como una mejor aproximación a ser incluida en las nuevas versiones de BackViDe.

Capítulo 6. PARÁMETROS DE LOS CRITERIOS DE FALLAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN BACKVIDE

6.1. Criterios de Falla por fisuración

A partir del proceso de calibración llevado adelante y descripto en los puntos anteriores, se adoptó finalmente un *Shift Factor* que relaciona los resultados del ensayo a fatiga del tipo 4PBT con la ley de falla incluida en el Modelo en Condiciones Incrementales de BackViDe. Esto permite al momento de efectuar un diseño, la particularización de la respuesta a fatiga esperada de las mezclas asfálticas propuestas o existentes, a partir de datos de ensayos de desempeño, o bien de conocer características propias de las mismas.

A continuación, se describe el procedimiento incluido dentro de la nueva versión del *software* para la caracterización a fatiga de las mezclas asfálticas a valorar, en función de la información disponible.

6.1.1 Mezcla Asfáltica de la que se dispone Ensayo a fatiga del tipo 4PBT

Conociendo los resultados del ensayo de viga a flexotracción en 4 puntos, obtener de la ley de fatiga (Curva de Wöhler), los siguientes parámetros:

- $\epsilon_{t6\ 4PBT}$: valor de deformación específica a tracción para un millón de repeticiones
- $\text{Alfa}_{\epsilon t}$: pendiente de la recta que representa la ley de falla del ensayo, expresada en escala doble logarítmica

Es necesario contar, además, con la Curva Maestra de módulo dinámico de esa misma mezcla asfáltica.

En la Hoja V_Defecto, incluir en una de las filas vacías, la información correspondiente a la mezcla asfáltica a modelizar. En particular, la información correspondiente al ensayo 4PBT se introduce en columnas "BR y BS".

Aplicando el $SF = 1,02$ y en función de la Ecuación (4.4):

$$\epsilon_{t6\ Det} = \frac{\epsilon_{t6\ 4PBT}}{SF^{(1/\text{Alfa}_{\epsilon t})}}$$

en la fila "BU", se determinará el $\epsilon_{t6\ Det}$ a emplear en el diseño. Se recuerda uno de los criterios generales del programa: las celdas con fondo gris son autodefinidas en base a otros datos introducidos.

En la Figura 6.1. se ejemplifica lo expresado, aplicado a una mezcla asfáltica sustentable con incorporación de NFU.

	A	B	BR	BS	BT	BU
78	☑	Definición de materiales típicos				
79			Viga a Flexión			1.02
80						Sugerido
81		Tipos de Capas	ϵ_{t6} (μstr)	pendiente	Módulo0 (MPa)	para
82						ϵ_{t6} Det
129	46	CAC D19 NFU	159	5.70	6709	158.4
130	47					
131	48					
132	49					
133	50					
134	51					
135	52					
136	53					
137	54					
138	55					
139	56					
140	57					
141	58					
142	59					
143	60					
144	61					
145	62					
146	63					
147	64					
148	65					
149	66					

Figura 6.1. Hoja V_Defecto. Introducción resultados ensayo 4PBT

6.1.2 Mezcla Asfáltica de la que sólo se dispone Parámetros volumétricos y Módulo Dinámico

Para el caso de contar únicamente con información respecto al tipo y porcentaje de ligante asfáltico que compone una mezcla determinada, como también de su curva maestra de donde obtener el módulo dinámico a 20°C y 10 Hz, es factible determinar los parámetros del criterio de falla en función de una mezcla asfáltica tomada de referencia.

En este caso, a fin de tener en cuenta la susceptibilidad respecto al módulo y al porcentaje de asfalto, se aplican los factores de corrección expresados en las Ecuaciones (4.1) y (4.2).

Se destaca nuevamente que, la adopción del módulo E_{20-10} dentro del criterio de falla fue asumido, en lugar de un módulo fijo, permitiendo simplificar la determinación del valor de deformación específica ϵ_{t6} en función del resultado del ensayo a flexión 4PBT, independientemente de la susceptibilidad respecto del módulo (Alfa E). En este mismo sentido, se eliminó el término asociado al porcentaje de asfalto. Pero para la consideración de otras mezclas del mismo tipo de asfalto donde no se dispone del ensayo 4PBT se asumió, como aproximación, un valor de Alfa%Asf de 3,5.

En la Figura 6.2. se presenta la tabla incluida en el "Léame" que permite estimar los parámetros del criterio a fatiga de una mezcla asfáltica dada.

	Mezcla	$\epsilon_6^{\text{Semil}}$	Alfa%AS 3.50		AlfaMod 2.7		Alfa ϵ_t	F4PBT	1.02
			%Asf	Fac %Asf	E20-10	Fac E		ϵ_6	ϵ_6
Referencia	CAC D 19 AC 70-100	89.5	12.50		6151		4.30		90
A aproximada	CAC 50 60		12.10	0.892	3090	6.42		134	135
Referencia	CAC D 19 AM1	100.0	10.74		6000		5.00		100
A aproximada	CAC AM1		11.40	1.232	5965	1.02		105	105
Referencia	CAC D AM3	159.0	11.60		4400		5.70		160
A aproximada	CAC AM3 ASFASOL		11.20	0.884	3180	2.40		181	182
Referencia	CAC D HIMA	296.0	12.10		2500		7.60		297
A aproximada	CAC 19 HIMA		12.08	0.994	15490	0.01		155	155

Figura 6.2. Hoja Léame. Determinación parámetros criterio de fatiga

Se resalta en rojo y a modo de ejemplo, la caracterización a fatiga de un tipo de mezcla asfáltica elaborada con asfaltos modificados, tomando de referencia una CAC D19 AM3. Para la cual indicados los datos de porcentaje de asfalto en volumen (11.2) y módulo de 3180 MPa (valores resaltados en amarillo), la tabla auxiliar propone un valor de ϵ_6 de 181 y la adopción de la misma susceptibilidad que la de la mezcla de referencia.

6.1.3 Mezcla asfáltica sin Información de ensayo de caracterización

Cuando no se dispone de resultados de ensayos de caracterización y/o desempeño (4PBT, módulo dinámico, etc), se podrá adoptar el tipo de mezcla que se considere más representativa o adecuada de aquellas disponibles y tipificadas en la base de datos del software, en la Hoja "V_Defecto". Para esto, analizar tipo de cemento asfáltico, tamaño máximo nominal y composición volumétrica (porcentaje de asfalto, porcentaje de vacíos de aire, volumen de agregados y densidad aparente o Marshall).

Estas mezclas, tal como se indicara en el punto 4.2., se ajustaron asumiendo como referencia aquellas de las que se contaba con resultados de ensayos a fatiga, y en función del *Shift Factor* finalmente adoptado (capítulo 5); considerando además, la susceptibilidad al módulo dinámico y al porcentaje de asfalto que presenta cada una de las mismas.

La Figura 6.3 muestra las mezclas disponibles, con su descripción y caracterización, incluidas dentro de la Hoja V_Defecto del software:

Definición de maDescripción de los materiales - Parámetros Característicos

Tipos de Capas		Vol. Asf. [%]	Vol. aire [%]	Vol. Agr. [%]	Densidad (g/cm3)	Tmax [mm]	Tipo Ligante	Viga a Flexión			1.02 Sugerido para ϵ_{t6} Det
								ϵ_{t6} (μ str)	pendiente	Módulo0 (MPa)	
CAC D 19 AC 50-60 SF	Concreto asfáltico convencional denso	11.96	4.00	84.04	2.49	19.00	Pen 50-60	68	4.30	9926	67.7
CAC D 19 AC 70-100	Concreto asfáltico convencional	12.50	4.50	83.0	2.40	19.00	Pen 70-100	95	4.30	6151	94.6
CAC D 19 CA30	Concreto asfáltico convencional	11.40	4.30	84.30	2.38	19.00	CA30	90	4.30	5965	89.6
MAAC 9 AC 70-100	Mezcla tipo Arena Asfalto con	14.50	4.70	80.80	2.41	9.00	Pen 70-100	229	4.30	1926	227.9
CAC D 19 AC 150-200	Concreto asfáltico convencional	12.50	4.10	83.40	2.41	19.00	Pen 150-200	131	4.30	3705	130.4
CAC D 19+RAP SF	Concreto asfáltico en caliente con aporte de RAP 20%	11.30	3.60	85.10	2.54	19.00	Pen 50-60	66	4.70	10768	65.7
Asfáltica SAE	Suelo Arena Emulsión							126	4.30	1529	125.4
Asfáltica TAA	Tosca Arena Asfalto						Pen 70-100	204	4.30	1552	203.1
CAC D 19 AM3	Concreto asfáltico denso	10.80	5.90	83.30	2.47	19.00	AM 5% SBS	121	5.70	7928	120.6
SMA 19 AM3	Mezcla asfáltica tipo SMA	14.90	2.80	82.30	2.37	19.00	AM3	195	5.70	4406	194.3
SMA 12 AM3	Mezcla asfáltica tipo SMA	14.70	6.90	78.40	2.27	12.00	AM3	211	5.70	3640	210.3
SMA 19 AM3 SF	Concreto asfáltico tipo SMA	14.47	4.00	81.53	2.49	19.00	AM3	181	5.70	5444	180.4
CAC D 19 AM3 SF	Concreto asfáltico denso con	11.96	4.00	84.04	2.49	19.00	AM3	158	5.70	4987	157.5
CAD 20 AM3	Mezcla asfáltica Drenante	10.40	22.90	66.70	2.21	20.00	AM3	163	5.70	4008	162.4
CAC D 19 AC MULTIG.	Concreto asfáltico denso	11.40	4.40	84.20	2.37	19.00	Multigrado	230	5.00	5265	229.1
CAC HIMA 19	Mezcla asfáltica de Alto Módulo	12.80	3.10	84.10	2.42	19.00	AM2 / Pen 20-30	164	7.60	15490	163.6
CAC HIMA 19 AC MULTIG	Mezcla asfáltica de Alto	12.80	3.80	83.40	2.42	19.00	Multigrado	172	7.60	13659	171.6

Figura 6.3. Hoja V_Defecto. Definición de materiales. Mezclas asfálticas disponibles en BackViDe

6.2. Criterios de Falla por Ahuellamiento

Tal como se indicara en el punto 4.4, si bien no era el objetivo primordial de esta tesis, se procedió a definir el criterio de falla por ahuellamiento de las mezclas asfálticas a partir de un ensayo de desempeño muy difundido como es el *Wheel Tracking Test*.

De las Ecuaciones (4.13) y (4.14), surge que el parámetro a incluir dentro del criterio de falla por ahuellamiento es el B, es decir la pendiente de deformación que surge del ensayo. Pero habitualmente, en los informes que extienden los laboratorios que efectúan los WTT, no presentan este valor, sino que se informan directamente los parámetros exigidos en los Pliegos de Especificaciones Técnicas (siendo el más difundido el PETG DNV Edición 2017), como son [54]:

$$PRD = \frac{H_{10000}}{h} \quad (6.1)$$

$$WTS = \frac{(H_{10000} - H_{5000})}{5} \quad (6.2)$$

Donde:

PRD: Profundidad media de la huella, en porcentaje

WTS: Pendiente media de deformación expresada en mm/1000 ciclos de carga

H₅₀₀₀: profundidad de huella obtenida a los 5.000 ciclos (cada ciclo se corresponde con dos pasajes de la rueda de carga)

H_{10000} : profundidad de huella obtenida a los 10.000 ciclos (cada ciclo se corresponde con dos pasajes de la rueda de carga)

h : altura de la probeta ensayada

Por consiguiente, resulta necesario incluir dentro de BackViDe, una ecuación que permita calcular el coeficiente B a partir de contar con los valores de WTS y PRD.

Para esto, se tuvo en cuenta además que del ensayo resulta:

$$Ah = a \cdot N^B \quad (6.3)$$

Siendo:

Ah : profundidad de huella en el ciclo de carga N

a y B : constantes del ensayo

Expresando H_{10000} y H_{5000} a partir de la Ecuación (6.3), se tiene:

$$H_{5000} = a \cdot 10000^B \quad (6.4)$$

$$H_{10000} = a \cdot 20000^B \quad (6.5)$$

$$PRD = \frac{H_{10000}}{h} = \frac{a \cdot 20000^B}{h} \quad (6.6)$$

Finalmente, reemplazando estas expresiones en la Ecuación (6.2) y despejando B, se obtiene:

$$B = \frac{\log\left(1 - \frac{5 \cdot WTS}{h \cdot PRD}\right)}{\log(0.5)} \quad (6.7)$$

Al momento efectuar la redacción de esta tesis, se encuentra en desarrollo la inclusión de esta Ecuación como parte del "Léame" del *software*, como también en la Definición de materiales de los V_Defecto, en forma similar a lo efectuado con el ensayo 4PBT. De esta manera, se permitirá introducir directamente los valores del ensayo de desempeño a efectos de definir el criterio de falla por ahuellamiento de la mezcla específicamente ensayada.

6.3. Validación de BVD en los Valores por Defecto Adoptados

Actualmente en nuestro país, y más específicamente en los organismos viales, se sigue utilizando como método de diseño de pavimentos a la Guía de Diseño AASHTO en su versión de 1993 [39, 55]. Este método, resulta netamente empírico, es decir que se basa en una experiencia a escala real en la cual se caracterizaron las distintas variables intervinientes en la misma y su vinculación con el comportamiento observado. Este tipo de metodologías presentan entre otras desventajas, la dificultad de apartarse del dominio de la experiencia, circunstancia para la cual puede no resultar apto el modelo obtenido, por ejemplo para el empleo de nuevos materiales. Adicionalmente, al ser un método empírico, fue desarrollado bajo ciertas características de tránsito, clima y materiales, y por lo tanto debería también haberse calibrado a las condiciones particulares de nuestro país.

Sin embargo, la utilización de metodología superadoras, como son las empírico mecanicistas, presentan aún resistencia en el ámbito vial argentino, entre otros aspectos debido a la cantidad de información que requieren, como también a las incertidumbres que plantean respecto a la correcta calibración y a los resultados que las mismas arrojan.

Es por esto, que en este punto se presenta a modo de validación, la aplicación de la versión del programa BackViDe2024 08 (la cual surge de las calibraciones anteriormente presentadas en esta tesis), a un tramo de ruta en servicio de la que se cuenta con su historia constructiva y evolución de distintos parámetros de estado a lo largo de su vida en servicio.

En particular, el tramo en estudio corresponde a una ruta nacional de la zona central de nuestro país y con un importante volumen de tránsito (y que no fuera incluido como tramo de calibración).

Se contó con la historia constructiva de la misma, dentro de lo que se destaca que la estructura original data de los años '50, con sucesivas intervenciones con mezclas asfálticas. En el año 96/97 se efectuó una primera repavimentación mediante mezclas convencionales, y la más reciente del año 2014/2015 con una carpeta con asfalto modificado. De todas las mezclas asfálticas se dispuso de su composición granulométrica y del tipo de cemento asfáltico que la componían. Esto permitió una mejor modelización de las mismas, a partir de poder estimar las curvas maestras de módulo dinámico, las cuales se obtuvieron de la aplicación de la ecuación de Witczak adaptada [56] inserta en el "Léame" del programa.

Para caracterizar la condición estructural del pavimento existente, se recurrió a mediciones de deflexiones efectuadas mediante un deflectógrafo de impacto tipo FWD en el año 2018,

a resultados de ensayos con el Penetrómetro Dinámico de Cono y a información recabada de una serie de calicatas de la zona.

Los indicadores característicos del estado superficial, se obtuvieron a partir de distintas mediciones de ahuellamiento, grado de fisuración y rugosidad de la calzada, efectuadas entre el año 1997 y el año 2023.

La valoración de las solicitaciones debidas al tránsito, se efectuó a través del número de ejes equivalentes en efecto destructivo para una carga de referencia de 80KN. Para su determinación, se contó con información de TMDA y clasificación vehicular, para la serie de años en estudio, asumiendo los valores de agresividad por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997 [47].

El primer paso fue definir el modelo estructural del pavimento existente a través de la aplicación del módulo “Backmod” del software BackViDe, y a partir de la información recabada de la estructura. En la Figura 6.4, se muestra la estructura característica obtenida luego de realizar el retroajuste hasta lograr la convergencia del proceso. Se asume como representativa, observándose módulos acordes a los valores semillas y muy reducidos errores en el cuenco calculado respecto al medido, iguales o inferiores a 10 micrones.

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 49, Convergencia de módulos,**
Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)							Error promedio 4.3	
	0	200	300	600	900	1200	1500		
Medida	331	235	214	160	116	87	64		
Calculada	327	245	213	153	113	87	69		
Error	4	10	1	7	3	0	5		

Estructura	Tipo de Capa	(mm)	(MPa)
	CAC D 20 AM3 2015	50	1600
	CAC D CA30 Bases asfálticas	280	1146
	Suelo Seleccionado	230	160
	Subrasante	1000	116
	Subrasante profunda		108

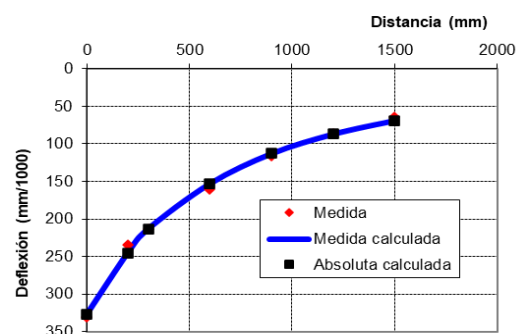


Figura 6.4. Resultado del retroajuste modular obtenido. Estructura característica

A continuación, se procedió a ejecutar el Modelo en Condiciones Incrementales DETERIORO para valorar el comportamiento de la estructura a lo largo de su vida en servicio, teniendo en cuenta además las intervenciones recibidas.

En este caso realizar el análisis de la estructura desde la obra previa, permite ajustar el daño de las capas preexistentes a 1997 de manera de llegar a 2014 con un modelo que represente lo evaluado in situ y aproximar un comportamiento más confiable de la obra realizada con mezcla asfáltica modificada.

Para el análisis, se asumió previo a la realización de la obra del 2015, la eliminación por fresado de 10 milímetros de las crestas, disminuyendo así el ahuellamiento reflejo por compactación de la nueva capa.

La Figura 6.5 muestra la estructura desde la pantalla de BackViDe, donde se aprecian las distintas etapas de obra. La Figura 6.6 permite visualizar las ecuaciones de módulo dinámico obtenidas para las mezclas asfálticas y la Figura 6.7 las leyes de fallas asumidas.

Estructura		Año inicial	1998	Mes Inicial	Enero	Años a Simular	30	Número de capas	7
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)	
1 CAC D 20 AM3 2014		50			0.35	Adherida	204	1700	
Fresado		10				Adherida	204		
1 CAC D CA30 Carpeta 1997		50			0.35	Adherida	1	1700	
1 CAC D CA30 Bases asfálticas		100			0.35	Adherida	1		
1 CAC D CA30 Bases asfálticas		130			0.35	Adherida	1		
3 Subrasante		230	155		0.40	Adherida	1		
3 Subrasante			113		0.40	Adherida	1		

Figura 6.5. Estructura del tramo a lo largo de los años

Variables asociadas al Módulo

CAPA	Criterios de Modeliz.	Variación con las tensiones				Variación con frecuencia y temperatura					
		tipo de ecuación	coef_A	coef_B	coef_C	K	Beta	Gamma	Emax	Emin	temp. refer.
CAC D 20 AM3 2014	Dato	1	600.0	0.50	0.00	10406	0.727	-1.100	15642	147	25.0
Fresado											
CAC D CA30 Carpeta	Dato	1	600.0	0.50	0.00	9091	0.246	-0.800	521832	1	25.0
CAC D CA30 Bases as	Dato	1	600.0	0.50	0.00	10119	0.427	-0.800	389286	1	25.0
CAC D CA30 Bases as	Dato	1	600.0	0.50	0.00	10119	0.427	-0.800	389286	1	25.0
Subrasante	Dato										
Subrasante	Dato										

Figura 6.6. Ecuaciones de Módulo de las mezclas asfálticas

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
CAC D 20 AM3 2014	1	189.34	5.70	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0185	0.000
Fresado	9															
CAC D CA30 Carpeta	1	78.04	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D CA30 Bases as	1	142.34	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.50	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D CA30 Bases as	1	142.34	4.30	2.70	30.00	0	1.15	2.60	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.350	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.040
Subrasante	3							0.00	1	-1.350	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.040

Figura 6.7. Criterios de Fallas de las capas estructurales

El análisis se realizó con los valores por defecto de los sub modelos y para una confiabilidad de 50%. Adicionalmente, a modo comparativo, se plantea el análisis considerando el *Shift Factor* original de 1,3.

El resultado obtenido de los diferentes indicadores de superficie, se presenta en la Figura 6.8 con líneas continuas, donde también se incluyen con marcas puntuales, los evaluados de estos parámetros y que permiten inferir la calidad de la prognosis efectuada por el modelo.

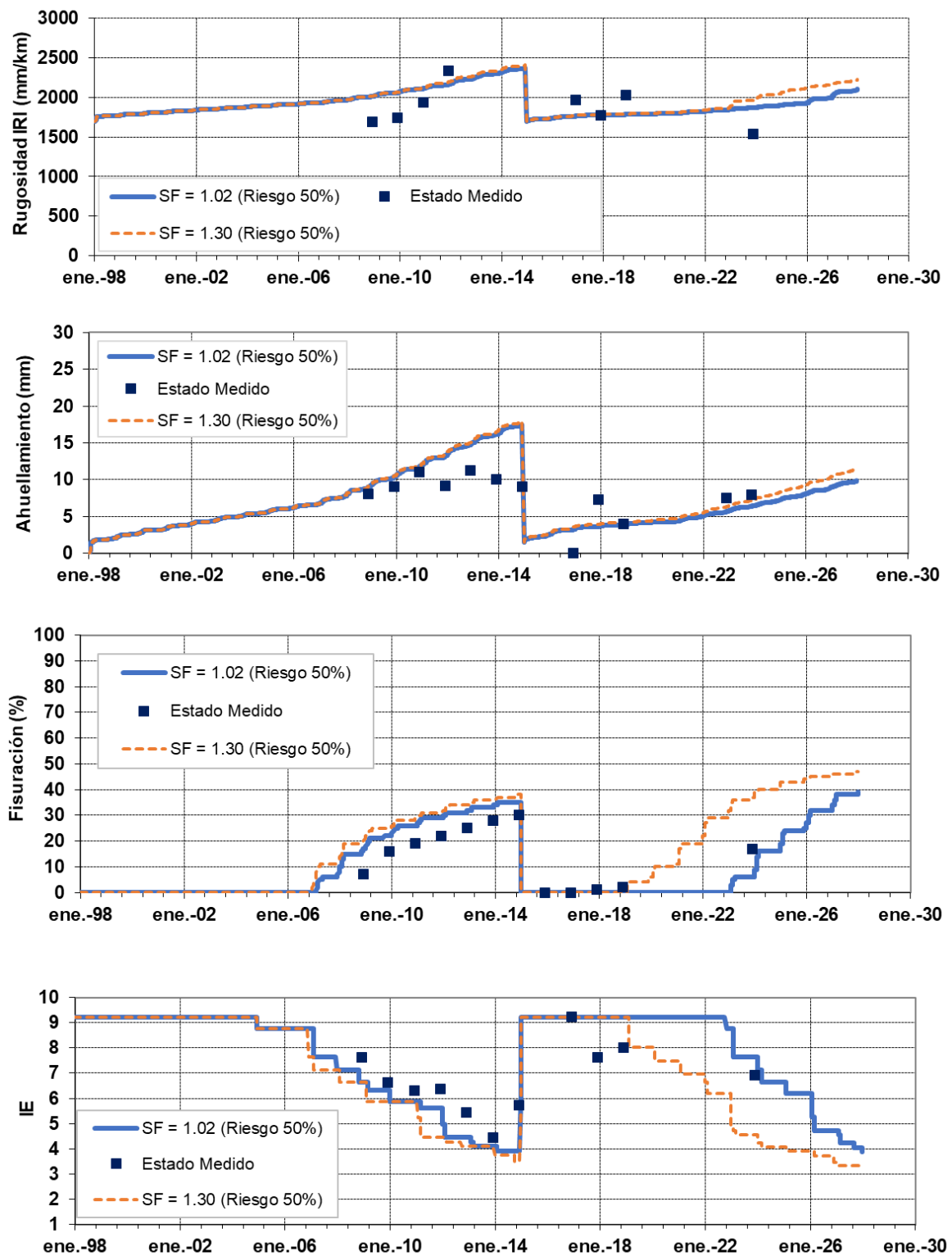


Figura 6.8. Comportamiento en servicio medido y estimado. Tramo de validación
Se observa un buen ajuste del comportamiento tanto de la obra de 1997, como de la evolución de los deterioros (ahuellamiento y fisuración) a partir de la obra de 2014. En este

sentido, la calzada continuaría presentando adecuadas condiciones al menos hasta el año 2027, coincidentemente con las evaluaciones de estado disponibles del año 2023.

En referencia al ahuellamiento, el análisis incremental pone de manifiesto el fenómeno de endurecimiento, que igualmente a lo acontecido en los ensayos de laboratorio, plantea una progresiva reducción de la tasa de crecimiento del mismo a sollicitaciones constantes. Por esta causa, el progreso del ahuellamiento se reduce en el segundo período. Viéndose afectado en ambos períodos por la fisuración de las mezclas asfálticas, lo que provoca mayores esfuerzos en las capas no ligadas. Los valores medidos en campo plantean la posibilidad de acciones puntuales para evitar superar los 12mm (valor máximo tolerado), acciones de las que no se encontró documentación.

En cuanto al análisis empleando el $SF = 1,3$ (líneas de puntos de color anaranjado), puede concluirse que presenta un ajuste menos certero, sobre todo y en forma lógica, respecto al comportamiento a fisuración. En este tramo tomado de ejemplo, no resulta tan significativo la variación de los otros deterioros (rugosidad y ahuellamiento). Por tanto, se ratifica el $SF = 1,02$ finalmente adoptado.

Los resultados obtenidos para este tramo, indican que el modelo aproxima muy acertadamente el comportamiento en servicio. Por tanto, avalan la capacidad de BackViDe y la calibración efectuada para este desempeño.

Capítulo 7. CONSIDERACIONES FINALES

7.1. Conclusiones de la Tesis

Se alcanzaron los objetivos planteados para esta tesis, desarrollándose un Criterio de Falla a fatiga dentro de un Método Empírico Mecanicista ajustado a condiciones locales, a partir de conocer los resultados de un ensayo de desempeño como es el de la viga a flexotracción en 4 puntos. Para esto, se definió un *Shift Factor* que relaciona las constantes que se obtienen del ensayo 4PBT, con los parámetros de la ecuación que representa la ley de falla dentro del modelo.

La desviación estándar obtenida resultó satisfactoria, debido a su bajo valor, incluso inferior al de la calibración original. Los resultados alcanzados podrían haber presentado aún menor incertidumbres, si se hubiese contado con una mayor cantidad de tramos homogéneos, con mayores diferencias entre tipos de materiales, tránsito, clima y evaluación de estado a lo largo de los años.

Adicionalmente, se procedió a la mejora del modelo de ahuellamiento. Para el caso de mezclas asfálticas, se vinculó el criterio de falla del método, al ensayo de caracterización a deformaciones plásticas permanentes más difundidos en la actualidad, como es el de rueda cargada (WTT), continuando con el criterio de caracterización en base a ensayos de comportamiento. En cuanto a los suelos, se ajustó el coeficiente que representa el endurecimiento, el cual plantea una progresiva reducción de la tasa de crecimiento del ahuellamiento a sollicitaciones constantes, situación que pudo apreciarse experimentalmente.

A través del estudio de un caso concreto como es un tramo de una importante ruta nacional en servicio, se validaron los criterios de fallas calibrados y la aptitud del BackViDe en su última versión, para efectuar la prognosis de la evolución de distintos parámetros de estado superficial. Se concluye por tanto, que es factible aplicar un Método Empírico Mecanicista en Condiciones Incrementales ajustado al tránsito y materiales habitualmente empleados en Argentina.

Se desarrollaron e incorporaron al software, planillas y ecuaciones que permiten definir el comportamiento a fatiga y al ahuellamiento, de cualquier tipo de mezcla asfáltica de la cual se cuente con los correspondientes ensayos de caracterización. En este sentido, se pudieron incorporar mezclas especiales elaboradas con ligantes modificados como ser Microaglomerados en caliente (MAC F-10) y *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Adicionalmente, esta aplicación permite caracterizar mezclas especiales o sustentables, actualmente en estudio en gran parte del mundo como son las mezclas asfálticas con incorporación de

neumáticos fuera de uso (NFU) y plásticos reciclados, o bien mezclas templadas. Respecto a estos tipos de mezclas (sustentables), y su modelización dentro de los métodos de diseño, se presentaron una serie de trabajos técnicos en distintos congresos [57, 58].

Poder caracterizar materiales nuevos o fuera del dominio de la experiencia, es una de las principales ventajas de la metodología empírico mecanicista calibrada en esta tesis, frente al método de diseño netamente empírico actualmente más difundido y empleado en nuestro país, como es el AASHTO 93.

Como objetivo complementario, se desarrollaron y documentaron nuevos tramos de calibración a partir de rutas en servicio. Los mismos, cuentan con información confiable y precisa respecto de la estructura construida, medición deflectométrica y seguimiento de la evolución de su estado superficial a través de los años. Estos nuevos tramos de calibración quedarán formando parte de la base de datos de la metodología BackViDe, de manera tal que puedan emplearse en un futuro a fin de abordar algunos de los aspectos no desarrollados en esta tesis.

7.2. Recomendaciones para estudios futuros

Se detallan a continuación, una serie de estudios futuros factibles de profundizar, a los fines de ir mejorando el modelo y de esa manera lograr que se aproxime lo más certeramente a la realidad.

Uno de estos trabajos, es poder determinar un *Shift Factor* para cada tipo de mezcla asfáltica o confirmar su unicidad. Para esto, se destaca la importancia de continuar con el estudio, incorporando mayor cantidad de ensayos de comportamiento, como también nuevos tramos de calibración. En este punto, se resalta la necesidad de documentar debidamente, tramos donde las mezclas asfálticas ejecutadas hayan sido elaboradas con asfaltos modificados o en un futuro con mezclas sustentables.

Otro de los puntos a explorar, es la de poder desarrollar leyes de falla por fisuración, a partir de otros tipos de ensayos que evalúen el comportamiento a fatiga, como los que actualmente están siendo estudiados debido a las simplificaciones en tiempos y metodología experimental, entre los que se encuentran el Ensayo de Viga Semi Circular (conocido como ensayo de Semi Probeta, siguiendo los lineamientos de la Norma AASHTO TP124) y el Ensayo de Tracción Indirecta estática (Indirect Tensile Test Cracking Test, Norma ASTM D8225-19) [11].

Como otra acción futura, se propone además, poder ajustar los submodelos de concentración de tensiones y propagación de fisuras en las capas asfálticas. Tema

abordado en parte, mediante la tesis de maestría en curso del Ing. Nicolás Vaz. "Caracterización estructural de los materiales estabilizados in situ con Cemento Portland"

También deberá evaluarse el envejecimiento, sobre todo en mezclas con asfaltos modificados. Actualmente, este coeficiente se considera igual a cero, es decir que, para mezclas con este tipo de cemento asfáltico, no se produce un incremento de la fisuración debida a la pérdida de sus propiedades viscoelásticas por la acción del clima. Uno de los puntos a profundizar es poder relacionar este coeficiente con resultados del Ensayo de Pérdida por Calentamiento en Película Delgada Rotativa (RTFOT), del Ensayo de Envejecimiento a Presión (PAV) y el clima del tramo.

En cuanto al Modelo en Condiciones Iniciales incluido en BackViDe, queda pendiente su calibración a partir de las nuevas mezclas asfálticas estudiadas y su vinculación con los resultados de los ensayos de desempeño. Tarea factible de ser abordada en un futuro cercano, a través de adscripciones y tesis de maestría.

Si bien la calibración efectuada en este trabajo a partir de ensayos de caracterización y tramos de rutas en servicio propios de nuestro país, resulta un paso importante en la utilización de Metodologías Empírico-Mecanicistas, se pone énfasis en la importancia de disponer información debidamente documentada a través de los años, tanto de los materiales que componen la estructura de pavimento como del comportamiento en servicio de las carreteras.

Otro aspecto que se considera relevante para la aplicación de estas metodologías en nuestro país, es plantear la imperiosa necesidad de actualizar la metodología de evaluación de fisuras de la Dirección Nacional de Vialidad, a fin de mejor cuantificar y representar el estado de las carreteras y su evolución en el tiempo.

Capítulo 8. PUBLICACIONES PROPIAS RELACIONADAS CON LA TESIS

- “Consideración de las Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados en los Métodos de Diseño Estructural”. Giovanon O., Pagola M. Raffaelli, J. (2020). XXXIX Reunión del Asfalto “Dr. Jorge O. Agnusdei” Encuentro Binacional Argentino-Paraguayo. Argentina.
- “Caracterización de Materiales con Ensayos de Desempeño en los Métodos de Diseño Mecanicista – Empíricos”. Giovanon, O. Raffaelli, J. (2022) XVIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito.
- “Caracterización de Materiales con Ensayos de Desempeño en los Métodos de Diseño Mecanicista - Empíricos”, Giovanon Oscar, Pagola Marta, Raffaelli, Juan Pablo. XXI Congreso Iberoamericano del Asfalto (Uruguay, noviembre 2022).
- “Necesidad de la Modernización de la Valoración del Índice de Estado de los Pavimentos en Argentina a partir de la Información Recolectada con Equipos de Alto Rendimiento”. Pagola M., Giovanon O., Raffaelli, J., Muzzulini, R. XXI Congreso Ibero latinoamericano del Asfalto (Uruguay, noviembre 2022).
- “Comparative study of mechanistic-empirical structural design methods applied to sustainable asphalt mixtures”. Cauhape Casaux Marina Lorena, Angelone Silvia Maria, Raffaelli Juan Pablo, Martínez Fernando Oscar, Zorzutti Vinti Luis Miguel and Reano Julieta. Publicado en: The Open Transportation Journal ISSN(print): 2667-1212 / ISSN(online): 1874-4478. SCOPUS CITESCORE 1.8. DOI: 10.2174/0126671212297728240418104448 y en ResearchGate https://www.researchgate.net/publication/380680380_Comparative_Study_of_Mechanistic-empirical_Structural_Design_Methods_Applied_to_Sustainable_Asphalt_Mixtures
- “Pavimentos Sostenibles: Evaluación Técnica y Ambiental de Mezclas Asfálticas empleando un Análisis de Ciclo de Vida”. Reano J, Raffaelli J P, Cauhape Casaux M, Martínez F, Angelone S. XL Reunión del asfalto. CABA (2024).
- “Comparación de Métodos de Diseño utilizados en nuestro país aplicados a un tramo de ruta en servicio”. Raffaelli, J., Cuadrado, M., Giovanon, O. XL Reunión del Asfalto (CABA, 2024).

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez, F., Angelone, S. y Cauhapé Casaux, M. “Caracterización avanzada de materiales”. Presentaciones curso de posgrado, FCEIA, UNR (2020).
- [2] Giovanon, O., Pagola, M. “Modelos obtenidos para el cálculo de Pavimentos”. XIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Costa Rica (2005).
- [3] NCHRP 1-37A 2004. Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC (2004).
- [4] Giovanon, O., Pagola, M. “Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en argentina” Publicado en el XVI Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Ciudad de Córdoba, Argentina Octubre 2012. ISBN 978-987-28682-1-5.
- [5] Giovanon, O. “Comportamiento en Servicio de Pavimentos Flexibles”. Tesis doctoral (2013).
- [6] Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Martínez, A, Alonso Mota, J. Cepeda Aldape, J. y Rodríguez Cambeiro, M. “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”. Premio Internacional a la Innovación en Carreteras (2005).
- [7] Martínez, F., Angelone, S. “Fatiga de las Mezclas Asfálticas mediante conceptos de la Mecánica de Fracturas” XI Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Perú (2001).
- [8] Monismith, C.L, Secor K.E., Blackmer W.. “Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists”. Vol. 30, pp. 188-222. (1961).
- [9] Pell, P.S. “Fatigue Characteristics of Bitumen and Bituminous Mixes, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements”. Ann Arbor, Michigan, USA, pp. 310-323. (1962).
- [10] Norma EN 12697-24: “Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue”.
- [11] Zapata Ferrero, I. “Comportamiento a Fatiga de Mezclas Asfálticas Ecológicas con altos porcentajes de Neumáticos Fuera de Uso”. Tesis Doctoral (2024).

- [12] Paredes Chérrez, L., Reyes Ortiz, O. y Camacho Tauta, J. "Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada." *Tecnura*,18(41), 103-119. Retrieved February 11, 2025, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2014000300009&lng=en&tlng=es. (2014).
- [13] Moreno Navarro, F. "Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas" Tesis Doctoral (2013), 91 – 95.
- [14] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Final Document. Appendix II-1: Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements. NCHRP. (2004).
- [15] Di Benedetto, H., de La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., Lundström, R. "Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and Rilem Group Contribution" (2003)
- [16] Flores Flores, M., Delgado Alamilla, H., Garnica Anguas, P. y García, E. "Determinación de la resistencia a la fatiga en mezclas asfálticas" (2013).
- [17] Campana, J. "Comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas. Ensayos, metodologías y aplicaciones". 10ª Jornada del Asfalto, Asociación Uruguaya de Caminos (2021)
- [18] Nguyen, M. L. "Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux". Tesis Doctoral, Laboratoire DGCB (Département Génie Civil et Bâtiment) CNRS – Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat,membre de l'Université de Lyon, 68-69 (2009)
- [19] Schwartz, C. and Carvalho, R. "Implementation of the NCHRP 1-37A. Design Guide. Final Report. Volume 2: Evaluation of Mechanistic-Empirical Design Procedure". Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Maryland. (2007)
- [20] Claussen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P., Udge, P. "Asphalt Pavement Design - The Shell Method," Proceedings of the 4th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 39-74. (1977).
- [21] Shook, J. F., Finn, F. N., Witczak, M. W., Monismith, C. L. "Thickness Design of Asphalt Pavements - The Asphalt Institute Method," Proceedings of the 5th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 17-44. (1982).

- [22] Yu, J. and Zou, G. "Asphalt Pavement Fatigue Cracking Prediction Model with Mode Factor" Technical Paper ISSN 1997-1400 Int. J. Pavement Res. Technol. 6(2):123-129
- [23] Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design. Autroads. (2017)
- [24] Asphalt Laboratory Fatigue Relationship: Stage 1 Utilisation of Existing Data. Technical Report AP-T372-23, AUSTRROADS (2023).
- [25] French design manual for pavement structures, LCPC/SETRA Ed. 1997, 250 p.
- [26] Alize-Lcpc software for the rational design of pavement structures, web site: <http://www.lcpc.fr/en/produits/alize/index.dml>.
- [27] Balay, J., Brosseaud, Y., Bara, B. and Castaneda. E. "Adaptation of the French pavement design to countries in South America. Congrès 8eme jornadas international des Asfalto, Oct 2012, France. 14p, 2012. <hal-00850937>.
- [28] Theyse, H., de Beer, M., Maina J. W. and Kannemeyer, L. "Interim Revision of The South African Mechanistic-Empirical Pavement Design Method for Flexible Pavements". 10th Conference On Asphalt Pavements for Southern Africa (2011).
- [29] Wahr D. C., Vivanco Morales, J., y Winkler Toirkens, R. "Evaluación del Método Sudafricano de diseño y del software de diseño mePADS en pavimentos V región". Universidad Técnica Federico Santa María, Chile (2011).
- [30] Galé, N. and Visse, A. "Un Modelo Constitutivo para la Caracterización de la Fatiga en Concretos Asfálticos". Revista Ingeniería de Construcción Volumen 18 N°1, 4-12 (2003).
- [31] Manual de Ajuda Programa MeDINA versao 1.1.9
- [32] Gonçalves Silva, J. E. "Método Nacional de Dimensionamento de Pavimentos - MEDINA, Avaliação da Duplicação DA AL-145". Monografia Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas-UFAL (2018).
- [33] Ullidtz, P., Harvey, J., Basheer, I., Jones, D., Wu, R., Lea, J., & Lu, Q. CalME, a Mechanistic–Empirical Program to Analyze and Design Flexible Pavement Rehabilitation. Transportation Research Record, 2153(1), 143-152. <https://doi.org/10.3141/2153-16> (Original work published 2010).
- [34] Hernández, N., Ossa, A. y Harvey, J. "Simulación del Agrietamiento por Fatiga en una Sección de Pavimento Utilizando CalME". XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Guadalajara (México) (2019)

- [35] TOMO I Guía mecánica empírica para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos, correspondiente al Volumen 4 Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica (GDP-2024) del Manual de Especificaciones.
- [36] LanammeUCR: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/>.
- [37] Loría Salazar, L. y Aguiar, J.P. “Desarrollo de modelos de fatiga para capas asfálticas”. LanammeUCR, Costa Rica (2006).
- [38] Elizondo Arrieta, F. y Jiménez Acuña, M. “Calibración de un Modelo para Valorar la Susceptibilidad al Agrietamiento por Fatiga de Mezclas Asfálticas en Costa Rica”. IAG109-01-2013.
- [39] “El Diseño Estructural de Pavimentos en la Argentina. Situación actual”. Revista Carreteras N° 253, p. 24 (2024).
- [40] <https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/download.php>.
- [41] Giovanon, O. “Léame Programa BackViDe”. Laboratorio Vial IMAE (2024)
- [42] Pfeiff, C. M., Kroger, I. y Ferrín, L. “Análisis Comparativo del Desempeño de Cementos Asfálticos Altamente Modificados” XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Guadalajara (México), pp. 1981-1993 (2019).
- [43] Giovanon O., Pagola, M. y Raffaelli, J. P. “Caracterización de Materiales con Ensayos de Desempeño en los Métodos de Diseño Mecanicista - Empíricos”. XXI Congreso Iberoamericano del Asfalto, Uruguay (2022).
- [44] “Metodología de Evaluación de Estado de los Pavimentos. Gerencia de Planeamiento, Investigación y Control. Subgerencia Planeamiento y Programación Vial. División Relevamiento”. Dirección Nacional de Vialidad (1981).
- [45] Giovanon, O. y Pagola, M. “Criterios de Falla para materiales viales”. XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires, Argentina. tomo III, 337-348. IX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Paraguay noviembre de 1997. tomo 2, 1075-1082. (1997).
- [46] Giovanon, O. y Pagola, M. “Aspectos Relevantes en los Criterios de Falla. MAIREPAV – International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control (2012).
- [47] Lilli, F. y Lockhart, J. “Ejes equivalentes para el diseño de pavimentos flexibles, segunda parte”. IX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Asunción, Paraguay (1997).

- [48] Angelone, S., Martinez, F., Cahuapé Casaux, M. “Análisis comparativo de procedimientos de laboratorio para evaluar el ahuellamiento de mezclas asfálticas”. XXXIV Reunión Anual del Asfalto, Argentina (2006).
- [49] Giovanon O., Pagola M. Raffaelli, J.P. “Consideración de las Mezclas Asfálticas con Asfaltos Modificados en los Métodos de Diseño Estructural”. XXXIX Reunión del Asfalto “Dr. Jorge O. Agnusdei” Encuentro Binacional Argentino-Paraguayo. Argentina (2020).
- [50] .Morea, F. “Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga”. Tesis doctoral Universidad Nacional La Plata, Argentina (2011).
- [51] Giovanon, O. Raffaelli, J.P. “Caracterización de Materiales con Ensayos de Desempeño en los Métodos de Diseño Mecanicista – Empíricos”. XVIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2022).
- [52] Angelone, S., Martinez, F. y Gallelli, D. “Criterios de Falla de Suelos Aplicados al Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles”. XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2001).
- [53] Walpole, R., Myers, R., Myers, S and Ye, K. “Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias”. Novena edición (2012).
- [54] Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para Concretos Asfálticos en Caliente y Semicaliente del tipo Densos. Edición 2017. Vialidad Nacional.
- [55] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures-1993. American Associate of State Highway and Transportation Officials de los Estados Unidos de América (1993).
- [56] Martinez, F. y Angelone, S. “Evaluación de diferentes modelos de predicción del módulo dinámico de mezclas asfálticas”. XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2009).
- [57] Reano J, Zorzutti L, Raffaelli J, Giovanon O, Cauhape C. M, Martínez F y Angelone S. “Estudio Comparativo del Diseño Estructural Mecanicista de Mezclas Asfálticas Sostenibles”. XXII CILA, Granada, España (2024).
- [58] Reano J, Raffaelli J P, Cauhape Casaux M, Martínez F, Angelone S. “Pavimentos Sostenibles: Evaluación Técnica y Ambiental de Mezclas Asfálticas empleando un Análisis de Ciclo de Vida”. XL Reunión del asfalto. CABA (2024).

ANEXO I

ENSAYOS 4PBT

1) INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Anexo es presentar en forma resumida la información que se dispuso de los distintos ensayos a fatiga en viga a flexión en 4 puntos, que se tomaron de base para el desarrollo de la tesis.

Se muestra además, en los casos que fue necesario, el procesamiento de dicha información, a fines de poder determinar los parámetros característicos de cada ensayo.

2) RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

2.1. CAC D20 CA30 - PL18

Figura A.I.1. Parámetros Volumétricos Mezcla Asfáltica CAC D20 CA30 PL18

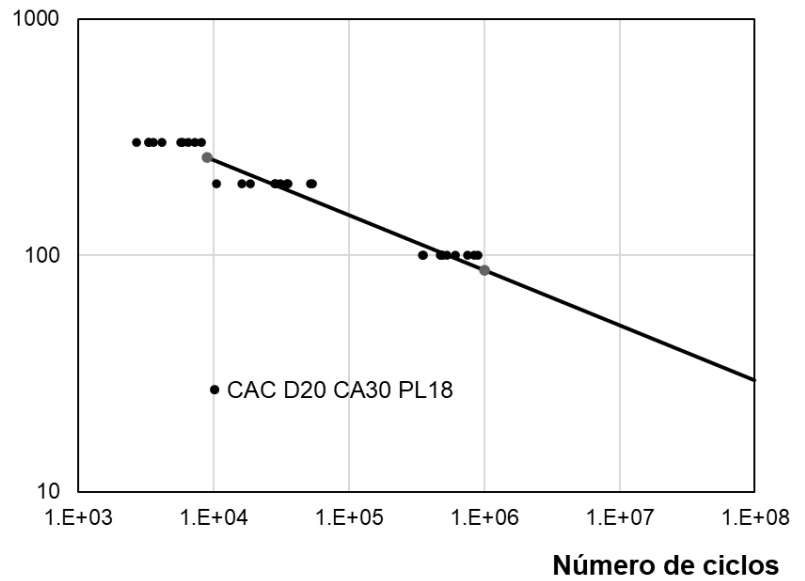
MUESTRA N°	1	227	228	229	231	233	234	235
FECHA:	17-feb	19-may	30-may	2-jun	31-may	28-jun	29-jun	6-jul
LOTE:	71	2036 B	2049	2053	2050	2093	2096	2105
Aspecto de la Mezcla [visual]	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Contenido de Ligante [%]	4.0	4.5	4.5	4.1	4.2	4.7	4.6	4.6
Tamiz 1 " [%]	100.0	100	100	100	100	100	100	100
Tamiz 3 / 4 " [%]	98.4	100.0	98.7	100.0	99.0	98.8	98.7	96.8
Tamiz 5/8" [%]	89.0	92.4	94.1	90.8	86.0	93.8	91.5	92.8
Tamiz 1 / 2 " [%]	76.8	80.5	81.2	78.7	74.3	83.9	79.7	80.7
Tamiz 3 / 8 " [%]	66.2	70.7	70.8	68.4	63.7	75.0	70.8	69.4
Tamiz 1/4" [%]	51.5	55.9	57.8	55.7	51.2	61.3	56.3	57.3
Tamiz N ° 4 [%]	46.0	47.9	49.4	46.1	43.9	53.0	49.1	50.1
Tamiz N ° 8 [%]	33.1	33.5	34.0	31.0	30.5	37.3	37.6	35.3
Tamiz N ° 30 [%]	20.1	17.3	16.9	16.4	15.8	19.7	20.2	18.1
Tamiz N ° 50 [%]	15.8	12.4	12.2	11.8	11.6	14.4	14.5	13.1
Tamiz N ° 100 [%]	9.7	8.5	8.5	8.1	8.2	10.0	10.0	9.1
Tamiz N ° 200 [%]	7.4	5.4	5.7	5.4	5.4	6.7	6.5	6.0
Densidad Marshall [g/cm ³]	2.465	2.442	2.423	2.404	2.432	2.448	2.476	2.456
R.T.I. [Mpa]	11.8	12	12	13	12	13	15	13
Fluencia [mm]	3.0	3.58	3.47	3.60	3.40	3.53	2.97	3.03
Vacíos de Aire [%]	3.1	4.1	4.1	5.7	4.1	3.5	3.6	3.7
Densidad Rice [g/cm ³]	2.544	2.546	2.526	2.550	2.537	2.537	2.567	2.557
VAM [%]	13.0	15.0	15.0	15.5	14.4	15.1	14.9	15.3
RBV [%]	76.0	73.0	72.9	63.2	71.4	76.7	75.9	75.6
Relación Est./Fluencia [kN/mm]	3.9	3.3	3.5	3.5	3.5	3.7	5.0	4.2
Cv/Cs Asfalto Total	1.11	0.84	0.86	0.89	0.88	0.94	0.94	0.88
Cv/Cs Asfalto Efectivo	1.13	0.92	0.89	0.94	0.91	1.03	1.10	1.00
Módulo 20°C - 5m - 124 RT [MPas]	5 633	5 790	6 181	5 561	5 252	5 338		5 404

MUESTRA N°	236	238	239	240	241	245
FECHA:	5-jul	18-jul	21-jul	22-jul	27-jul	17-oct
LOTE:	2103	2125	2134	2137	2141	2312
Aspecto de la Mezcla [visual]	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Contenido de Ligante [%]	4.5	4.6	4.6	4.5	4.8	4.6
Tamiz 1 " [%]	100	100	100	100	100	100
Tamiz 3 / 4 " [%]	97.8	100.0	99.6	99.4	100.0	96.3
Tamiz 5/8" [%]	90.0	87.8	93.7	95.1	92.6	90.4
Tamiz 1 / 2 " [%]	79.8	75.5	84.0	84.3	86.2	80.4
Tamiz 3 / 8 " [%]	70.2	66.3	74.5	75.7	75.5	71.3
Tamiz 1/4" [%]	58.9	54.6	61.3	62.3	61.1	55.0
Tamiz N ° 4 [%]	50.7	45.9	52.5	53.2	53.0	45.3
Tamiz N ° 8 [%]	34.6	31.3	36.8	36.8	37.1	32.6
Tamiz N ° 30 [%]	17.8	16.9	19.3	19.6	19.7	17.2
Tamiz N ° 50 [%]	12.8	12.4	13.8	14.1	14.1	12.9
Tamiz N ° 100 [%]	8.9	8.7	9.5	9.6	9.4	9.4
Tamiz N ° 200 [%]	5.8	5.8	6.4	6.4	6.5	6.8
Densidad Marshall [g/cm ³]	2.452	2.443	2.434	2.444	2.456	2.440
R.T.I. [Mpa]	13	12	13	13	13	11
Fluencia [mm]	3.53	3.25	3.21	3.25	3.47	3.77
Vacios de Aire [%]	3.6	3.8	4.4	4.1	2.9	4.1
Densidad Rice [g/cm ³]	2.547	2.539	2.546	2.547	2.529	2.543
VAM [%]	14.8	14.9	15.5	15.1	14.6	15.3
RBV [%]	75.4	74.8	71.6	73.1	80.2	73.5
Relación Est./Fluencia [kN/mm]	3.6	3.8	4.2	4.0	3.8	2.9
Cv/Cs Asfalto Total	0.88	0.87	0.93	0.93	0.91	0.96
Cv/Cs Asfalto Efectivo	0.97	0.94	1.02	1.03	0.97	1.05
Módulo 20°C - 5m - 124 RT [MPas]	5 072		5 933	6 252	6 015	4 823

Figura A.I.2. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D20 CA30 PL18

MEZCLA CAC D20 CA30 PL18	
N° de Ciclos (Ensayos 4PBT)	ϵ_{pst} (μs) Ensayos 4PBT
895 100	100
612 593	100
473 065	100
356 903	100
528 616	100
492 693	100
836 284	100
488 701	100
752 717	100
346 811	100
18 589	200
28 371	200
16 100	200
28 635	200
35 680	200
52 045	200
53 803	200
34 650	200
10 451	200
30 944	200
6 518	300
4 125	300
5 875	300
7 314	300
3 609	300
8 180	300
2 703	300
3 312	300
3 340	300
5 741	300

Deformación específica (microstrain)



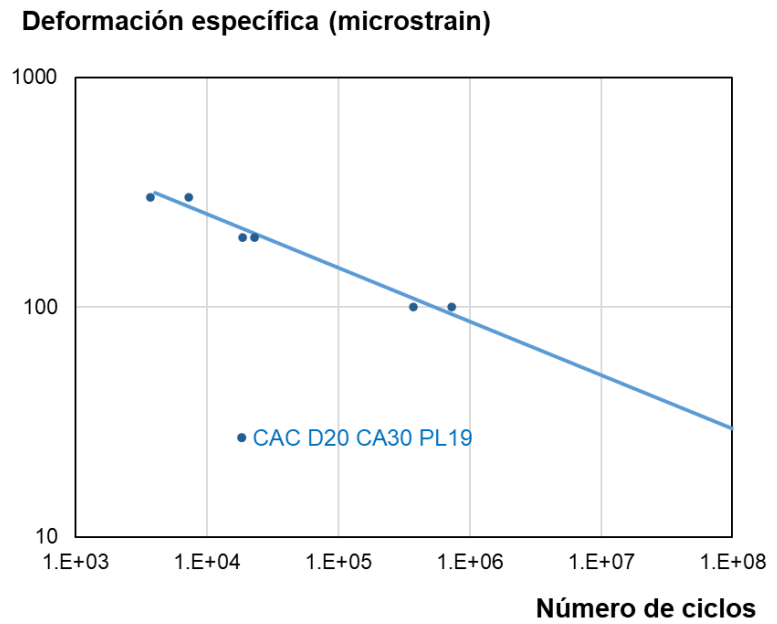
2.2. CAC D20 CA30 - PL19

Figura A.I.3. Parámetros Volumétricos Mezcla Asfáltica CAC D20 CA30 PL19

MUESTRA N°	106	107	109	112	131
FECHA:	19-may	19-may	4-ene	5-ene	18-ene
LOTE:	2036	2036 B	2437	2440	2463
Aspecto de la Mezcla [visual]	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Contenido de Ligante [%]	4.5	4.5	4.8	4.6	4.3
Tamiz 1 "	100.0	100.0	100	100	100
Tamiz 3 / 4 "	100.0	100.0	99.2	98.5	100.0
Tamiz 5/8"	92.7	92.4	94.5	91.5	93.3
Tamiz 1 / 2 "	81.7	80.5	83.3	76.6	80.9
Tamiz 3 / 8 "	72.3	70.7	73.8	66.4	71.9
Tamiz 1/4"	57.8	55.9	58.7	52.2	57.1
Tamiz N ° 4	48.8	47.9	51.8	45.3	50.1
Tamiz N ° 8	33.8	33.5	36.4	32.3	35.3
Tamiz N ° 30	17.4	17.3	19.1	17.2	19.2
Tamiz N ° 50	12.5	12.4	13.3	12.2	14.2
Tamiz N ° 100	8.7	8.5	9.1	8.1	10.2
Tamiz N ° 200	5.7	5.4	6.2	5.5	6.9
Densidad Marshall [g/cm ³]	2.422	2.442	2.454	2.459	2.469
R.T.I. [Mpa]	10.8	11.8	13	14	14
Fluencia [mm]	3.55	3.58	3.90	3.87	3.63
Vacíos de Aire [%]	4.8	4.1	3.4	3.6	3.7
Densidad Rice [g/cm ³]	2.546	2.546	2.540	2.551	2.564
VAM [%]	15.8	15.0	15.1	15.0	14.3
RBV [%]	69.5	73.0	77.5	76.1	74.2
Relación Est./Fluencia [kN/mm]	3.1	3.3	3.3	3.7	3.8
Cv/Cs Asfalto Total	0.865	0.843	0.883	0.826	1.018
Cv/Cs Asfalto Efectivo	0.955	0.917	0.969	0.927	1.139
Módulo 20°C - 5m - 124 RT [MPas]		5 790	5 509	6 762	7 192

Figura A.I.4. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D20 CA30 PL19

MEZCLA CAC D20 CA30 PL19	
N° de Ciclos (Ensayos 4PBT)	ϵ_{pst} (μs) Ensayos 4PBT
374 000	100
730 467	100
23 015	200
18 775	200
3 698	300
7 293	300



2.3. CAC D20 AM1

Figura A.I.5. Propiedades Volumétricas Mezcla Asfáltica CAC D20 AM1

MUESTRA N°		#1
Tipo de Ligante		AM1
Agregado 6 / 20	[%]	48,75%
Agregado 0 / 6	[%]	43,02%
Cal	[%]	0,96%
Filler	[%]	2,87%
Contenido de Ligante	[%]	4,4%
Densidad Marshall	[g/cm ³]	2.442
Vacíos de Aire	[%]	4,31%
VAM	[%]	15.1
RBV	[%]	71%
Relación Est./Fluencia	[kN/mm]	3.9

A continuación, se presenta la salida del ensayo 4PBT. Debido a la cantidad de ciclos, sólo se muestran los más representativos.

Figura A.I.6. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D20 AM1 – Probeta 1

Cooper Research Technology Ltd - www.cooper.co.uk
 Date:31/05/2019
 CRT Beam Flex Version 3.1.0
 Test Standard:EI 12697-24

 Specimen Reference: Probeta 1
 Total Length: 395,50
 Width: 65,60
 Height: 49,03
 Mass: 3019,500000

 Control Method: Constant Strain
 Frequency:10,00
 Target Amplitude:90,00 (micro strain)
 Temperatu(-): 20,00
 Test End Value (% initial): 50

 Operator: Labasf
 Comments:
 Probeta 1, a 10z con 90 ue/e

Cycle	% Initial Stiffness	Stiffness (MPa)	Micro Strain	Stress (kPa)	Load (N)	Deformation (mm)	Dissipated Energy (MJ/m ³)			Cumulative Dissipated Energy (MJ/m ³)	Phase Angle (°)		
1	100	3886.5601	0.786231	3.055734	1.342181	0.000432	NaN	0	NaN	Inf	Inf	-0.000309	0.1
100	100	10246.425	88.619469	908.03265	401.17084	0.048646	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.008753	10
1000	97.254166	9981.9854	89.742645	895.80981	395.73145	0.049263	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.008981	100
10000	92.483261	9407.3564	90.809685	854.27911	377.29413	0.049849	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.020965	1000
100000	84.575821	8671.4619	90.135765	781.60889	345.08179	0.049479	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.047393	10000
1000000	75.522247	7719.7949	90.023453	694.96259	306.65302	0.049417	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.111815	100000
2000000	71.218948	7292.085	89.79882	654.82062	288.85147	0.049294	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.138942	200000
2553500	69.268181	7086.5073	90.135765	638.74774	281.71671	0.049479	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.148205	255350
2554000	69.207985	7094.4355	90.079605	639.06397	281.858	0.049448	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.147903	255400

Nota: El número de ciclos correspondiente al 50% del módulo inicial se obtuvo a partir de la Ecuación de Weibull

Figura A.I.7. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D20 AM1 – Probeta 4

Cooper Research Technology Ltd - www.cooper.co.uk
 Date:10/06/2019
 CRT Beam Flex Version 3.1.0
 Test Standard:EN 12697-24

 Specimen Reference: Probeta 4
 Total Length: 397,60
 Width: 62,67
 Height: 48,90
 Mass: 2956,200000

 Control Method: Constant Strain
 Frequency: 30,00
 Target Amplitude: 90,00 (micro strain)
 Temperat (-): 20,00
 Test End Value (% initial): 50

 Operator: Labasf
 Comments:
 Probeta 4, 30Hz a 90 ue/e

Cycle	% Initial Stiffness	Stiffness (MPa)	Micro Strain	Stress (kPa)	Load (N)	Deformatio n (mm)	Dissipated Energy (MJ/m³)			Cumulative Dissipated Energy (MJ/m³)	Phase Angle (°)		
1	100	2499.2041	0.840157	2.099723	0.988976	0.000462	NaN	0	NaN	Inf	Inf	-0.001667	0.033333
100	100	13123.4951	53.37796	700.50543	286.308411	0.029379	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.015288	3.333333
1000	92.713997	12248.582	89.616722	1097.6779	447.652679	0.049325	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.00618	33.333332
10000	90.808838	11956.3301	89.840767	1074.1658	437.833557	0.049448	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.004391	333.33334
100000	83.073616	10965.499	90.176826	988.83392	401.80661	0.049633	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.009671	3333.3333
1000000	78.877548	10401.8438	89.672729	932.76172	378.212463	0.049355	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.010667	33333.332
2000000	76.201523	10069.5752	90.512894	911.42639	369.099762	0.049818	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.013209	66666.664
3000000	73.724007	9718.94238	90.120819	875.87903	354.194489	0.049602	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.010072	100000
4000000	70.793571	9346.47656	89.672729	838.12408	338.37088	0.049355	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.006595	133333.33
5000000	66.889107	8859.58203	89.896782	796.44794	320.78125	0.049479	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.006217	166666.67
5327000	65.608612	8656.66992	90.120819	780.14624	313.999695	0.049602	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.005513	177566.67
6000000	62.898678	8307.24609	89.896782	746.79462	299.87149	0.049479	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.004651	200000
7000000	58.456612	7704.00684	90.008797	693.42841	277.407623	0.04954	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	0.0023	233333.33
8000000	51.272293	6758.98486	90.064812	608.7467	241.804504	0.049571	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.002331	266666.66
8083500	50.126659	6610.59912	90.176826	596.12286	236.506409	0.049633	NaN	NaN	NaN	Inf	Inf	-0.002123	269450

2.4. CAC D12 AM3

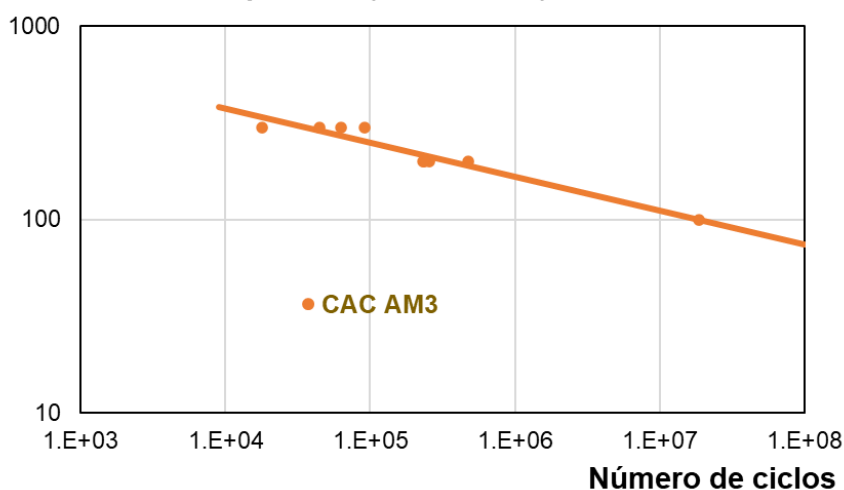
Figura A.I.8. Propiedades Volumétricas Mezcla Asfáltica CAC D12 AM3

MUESTRA N°	#1
Tipo de Ligante	AM3
Contenido de Ligante [%]	4,8
Densidad Marshall [g/cm ³]	2,419
Vacíos de Aire [%]	4,5
VAM [%]	16,1
RBV [%]	72,3

Figura A.I.9. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D12 AM3

Probeta	Módulo Inicial (MPa)	Micro-strain	Ciclos completados	Extrapolación de ciclos hasta 50% del módulo inicial	Ciclos hasta 50% módulo inicial	Promedio
2	3868	300	9,17E+04	N/A	9.17E+04	5,43E+04
5	5201	300	6,25E+04	N/A	6.25E+04	
8	4541	300	4,50E+04	N/A	4.50E+04	
15	3925	300	1,78E+04	N/A	1.78E+04	
3	5341	200	4,79E+05	N/A	4.79E+05	3,01E+05
6	3270	200	2,34E+05	N/A	2.34E+05	
9	4219	200	2,54E+05	N/A	2.54E+05	
12	4415	200	2,36E+05	N/A	2.36E+05	
4	4903	100	7,10E+05	1,87E+07	1.87E+07	1,87E+07

Deformación específica (microstrain)



2.5. MAC F-10 AM3

Figura A.I.10. Propiedades Volumétricas Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3

MUESTRA N°		140 F10
Tipo de Ligante		AM3
Agregado 6 / 12	[%]	69.6
Agregado 0 / 3	[%]	17.1
Cal	[%]	1.0
Filler	[%]	7.6
Contenido de Ligante	[%]	4.8
Densidad Marshall	[g/cm ³]	2.366
Vacios de Aire	[%]	5.7
VAM	[%]	17.0
RBV	[%]	66.1

Se presenta la salida del ensayo 4PBT. Debido a la cantidad de ciclos, sólo se muestran los más representativos.

Figura A.I.11. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3 – Probeta I 200micro

140 F-10 CI 200micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	2 896	26.6	0.077	-3.24	0.001714	100.00
100	2 422	195.7	0.474	-138.16	0.043015	100.00
1 000	2 268	201.6	0.457	-144.28	0.044142	93.67
10 000	2 164	201.9	0.437	-142.70	0.043843	89.35
100 000	1 907	199.3	0.380	-126.45	0.050808	78.74
1 000 000	1 585	199.9	0.317	-106.32	0.054322	65.44
2 000 000	1 486	199.2	0.296	-98.15	0.052176	61.37
3 000 000	1 364	197.4	0.269	-89.10	0.052757	56.32
3 869 700	1 290	200.0	0.258	-96.86	0.052543	53.25
3 869 800	1 142	201.1	0.230	-77.98	0.055566	47.14

Figura A.I.12. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3 – Probeta II
300micro

140 F-10 C II 300micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DWdis (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix
1	3 502	15.8	0.055	-0.96	0.034106	100.00
100	2 655	293.2	0.778	-368.04	0.064061	100.00
1 000	2 388	300.8	0.718	-374.05	0.05789	89.94
10 000	2 098	301.7	0.633	-341.94	0.060208	79.02
100 000	1 626	297.3	0.483	-266.91	0.061482	61.23
200 000	1 401	301.9	0.423	-240.43	0.063041	52.76
226 900	1 330	301.3	0.401	-228.59	0.060621	50.09

Figura A.I.13. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3 – Probeta III
300micro

140 F-10 C III 300micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DWdis (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix
1	3 354	10.2	0.034	-0.38	0.050408	100.00
100	2 560	306.1	0.784	-371.41	0.062195	100.00
1 000	2 291	298.2	0.683	-333.51	0.062765	89.48
10 000	2 024	301.5	0.610	-313.22	0.061812	79.06
100 000	1 622	299.3	0.485	-255.91	0.060811	63.35
200 000	1 497	295.3	0.442	-230.19	0.062155	58.46
300 000	1 388	299.8	0.416	-218.69	0.061384	54.23
400 000	1 317	299.4	0.394	-207.62	0.060548	51.45
462 100	1 279	298.5	0.382	-201.20	0.057635	49.97

Figura A.I.14. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3 – Probeta IV
400micro

140 F-10 C IV 400micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

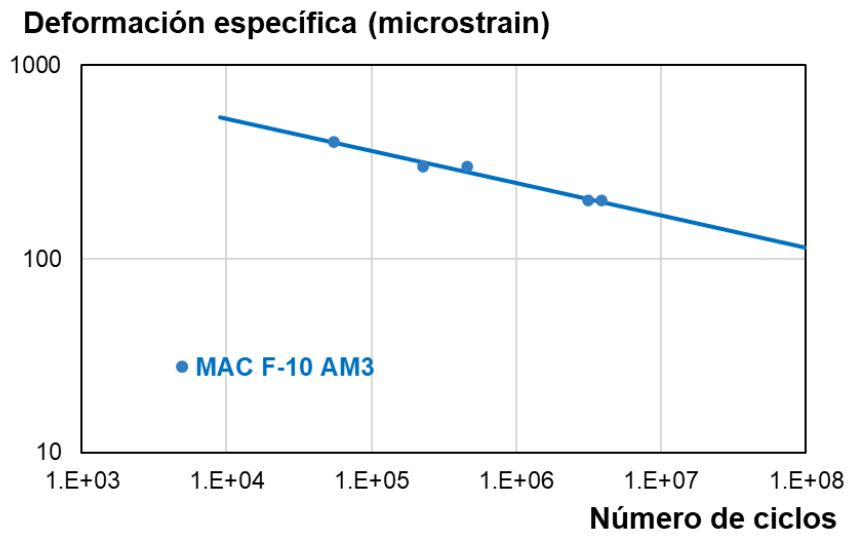
Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	3 306	24.2	0.080	-2.95	0.011721	100.00
100	2 355	426.4	1.004	-783.70	0.053874	100.00
1 000	2 040	400.9	0.818	-633.44	0.068522	86.64
10 000	1 668	399.3	0.666	-551.15	0.067241	70.83
50 000	1 216	396.9	0.483	-413.61	0.066264	51.65
55 400	1 176	399.4	0.470	-401.95	0.066335	49.95

Figura A.I.15. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3 – Probeta V
200micro

140 F-10 C V 200micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	3 364	21.5	0.072	-1.66	0.044087	100.00
100	2 725	199.9	0.545	-158.36	0.069859	100.00
1 000	2 556	198.5	0.507	-155.09	0.065902	93.79
10 000	2 395	199.2	0.477	-152.04	0.062409	87.88
100 000	2 061	200.8	0.414	-138.69	0.067493	75.64
1 000 000	1 860	200.3	0.372	-143.92	0.068245	68.24
2 000 000	1 721	200.8	0.346	-133.16	0.066187	63.14
3 000 000	1 447	201.1	0.291	-105.92	0.068575	53.09
3 152 400	1 362	198.4	0.270	-98.18	0.066229	50.00

Figura A.I.16. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica MAC F-10 AM3



2.6. SMA 10 AM3

Figura A.I.17. Propiedades Volumétricas Mezcla Asfáltica SMA-10 AM3

MUESTRA N°		149 SMA
Tipo de Ligante		AM3
Agregado 6 / 12	[%]	68.8
Agregado 0 / 3	[%]	15.6
Cal	[%]	0.9
Filler	[%]	8.5
Fibra celulosa	[%]	0.47
Contenido de Ligante	[%]	5.75
Densidad Marshall	[g/cm ³]	2.361
Vacios de Aire	[%]	4.5
VAM	[%]	18.1
RBV	[%]	75.0

Se presenta la salida del ensayo 4PBT. Debido a la cantidad de ciclos, sólo se muestran los más representativos.

Figura A.I.18. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta II 400micro

149 II SMA 400micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	1 621	22.5	0.037	-1.24	0.05147	100.00
100	1 174	396.8	0.466	-369.66	0.064031	100.00
1 000	1 116	396.1	0.442	-364.73	0.060892	95.10
10 000	1 041	390.7	0.407	-331.81	0.060166	88.67
100 000	854	405.0	0.346	-292.78	0.061676	72.76
200 000	764	400.8	0.306	-271.80	0.0611	65.10
300 000	722	403.0	0.291	-257.67	0.060738	61.51
400 000	671	404.5	0.271	-233.89	0.061781	57.14
500 000	645	393.2	0.253	-217.85	0.064837	54.92
600 000	614	400.2	0.246	-214.76	0.057579	52.32
651 500	591	398.4	0.235	-208.13	0.061605	50.36

Figura A.I.19. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta III 300micro

149 III SMA 300micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	2 805	7.1	0.020	-0.17	0.065103	100.00
100	1 814	290.2	0.526	-291.88	0.0656	100.00
1 000	1 701	300.5	0.511	-291.04	0.067438	93.76
10 000	1 620	297.1	0.481	-279.21	0.065578	89.33
100 000	1 296	301.4	0.391	-230.25	0.061514	71.47
200 000	1 207	300.3	0.362	-208.95	0.061404	66.55
300 000	1 167	298.8	0.349	-196.42	0.062587	64.32
400 000	1 147	297.0	0.341	-228.78	0.063514	63.25
500 000	1 135	295.4	0.335	-220.62	0.062708	62.56
600 000	1 075	299.4	0.322	-210.76	0.059321	59.28
700 000	1 010	303.2	0.306	-197.44	0.056357	55.67
800 000	926	305.9	0.283	-181.57	0.059366	51.07
817 900	907	296.4	0.269	-166.40	0.06001	50.00

Figura A.I.20. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta IV 400micro

149 IV SMA 400micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	2 182	14.6	0.032	-0.70	0.049386	100.00
100	1 513	402.2	0.608	-499.19	0.06186	100.00
1 000	1 380	404.0	0.557	-470.16	0.062153	91.21
10 000	1 225	407.3	0.499	-436.26	0.062146	81.00
100 000	1 021	396.2	0.405	-372.44	0.065004	67.52
200 000	955	412.9	0.395	-360.34	0.064046	63.16
300 000	896	391.6	0.351	-304.11	0.066571	59.24
400 000	849	403.1	0.342	-304.74	0.058501	56.15
500 000	796	401.1	0.319	-282.14	0.060508	52.63
584 900	756	401.2	0.303	-269.72	0.061298	50.01

Figura A.I.21. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta V 400micro

149 V SMA 400micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	2 420	11.4	0.028	-0.39	0.065533	100.00
100	1 529	403.8	0.617	-462.52	0.077316	100.00
1 000	1 387	398.2	0.552	-429.38	0.071251	90.70
10 000	1 179	398.5	0.470	-387.10	0.07267	77.12
100 000	936	397.4	0.372	-309.38	0.067777	61.19
200 000	946	398.9	0.377	-344.86	0.065205	61.88
300 000	855	408.2	0.349	-326.67	0.057844	55.94
400 000	815	398.6	0.325	-293.10	0.058752	53.32
487 500	763	400.6	0.306	-276.90	0.0613	49.92

Figura A.I.22. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta VII 500micro

149 VII SMA 500micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

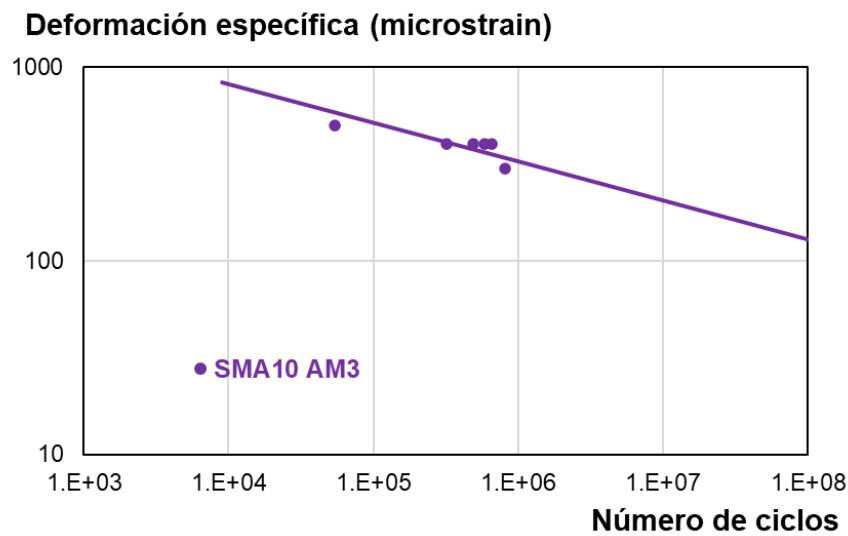
Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix} (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DW _{dis} (kJ/m ³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, S _{mix}
1	2 331	23.4	0.055	-1.78	0.041646	100.00
100	1 555	494.2	0.768	-781.11	0.065371	100.00
1 000	1 389	496.9	0.690	-737.73	0.059476	89.30
10 000	1 091	508.3	0.554	-629.55	0.059486	70.15
20 000	995	506.7	0.504	-592.89	0.056243	63.96
30 000	902	484.2	0.437	-486.58	0.056248	58.01
40 000	835	505.0	0.422	-500.23	0.05759	53.69
50 000	788	508.4	0.401	-477.21	0.060348	50.70
53 800	776	497.4	0.386	-450.02	0.058553	49.91

Figura A.I.23. Salida Ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3 – Probeta VIII
400micro

149 VIII SMA 400micro
EN-12697-24-2012 (SA4PT)

Cycle	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Strain Amplitude, e (um/m)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Stress Amplitude, s (MPa)	EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Dissipated Energy per Cycle, DWdis (kJ/m³)	Load (kN)	Failure % EN Fatigue/EN-12697-24-2012 (SA4PT)/Modulus, Smix
1	2 274	52.8	0.120	-12.02	-0.006143	100.00
100	1 697	387.2	0.657	-507.38	0.056716	100.00
1 000	1 552	399.9	0.621	-512.00	0.052918	91.47
10 000	1 304	396.3	0.517	-437.91	0.062538	76.83
100 000	1 014	396.2	0.402	-364.06	0.063379	59.73
200 000	948	395.5	0.375	-338.02	0.05946	55.84
300 000	896	403.5	0.362	-331.26	0.062257	52.81
323 000	869	405.1	0.352	-325.57	0.0668	51.22

Figura A.I.24. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica SMA 10 AM3



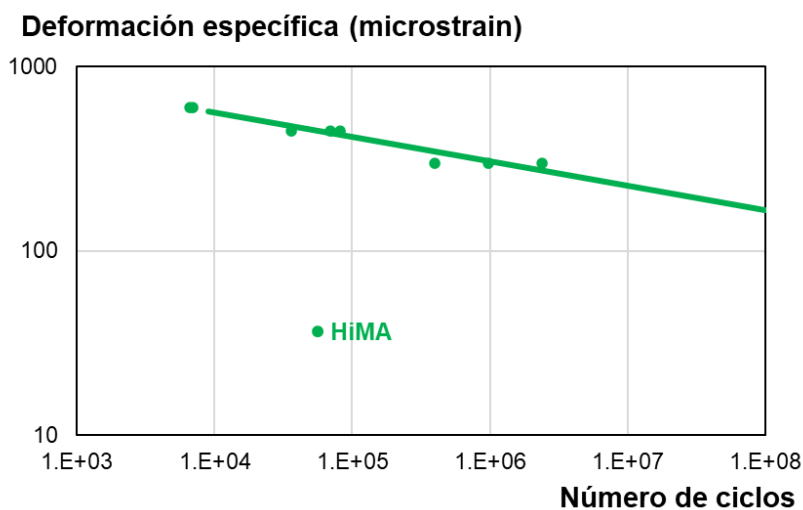
2.7. CAC D12 HIMA

Figura A.I.25. Propiedades Volumétricas Mezcla Asfáltica CAC D12 HIMA

MUESTRA N°	#1
Tipo de Ligante	HiMA
Contenido de Ligante [%]	5,0
Densidad Marshall [g/cm ³]	2,418
Vacíos de Aire [%]	4,7
VAM [%]	16,7
RBV [%]	71,8

Figura A.I.26. Resultados ensayo 4PBT Mezcla Asfáltica CAC D12 HIMA

Probeta	Módulo Inicial (MPa)	Micro-strain	Ciclos completados	Extrapolación de ciclos hasta 50% del módulo inicial	Ciclos hasta 50% módulo inicial	Promedio
4	2163	600	7,00E+03	N/A	7.00E+03	6,83E+03
9	2136	600	6,65E+03	N/A	6.65E+03	
5	3721	450	3,63E+04	N/A	3.63E+04	6,43E+05
6	1726	450	2,00E+04	8,23E+04	8.23E+04	
8	2012	450	6,99E+04	N/A	6.99E+04	1,25E+06
2	3600	300	6,30E+05	2,38E+06	2.38E+06	
10	1921	300	3,59E+05	4,00E+05	4.00E+05	1,25E+06
11	2592	300	9,75E+05	N/A	9.75E+05	



ANEXO II

TRAMOS DE CALIBRACIÓN

TRAMO DE CALIBRACIÓN S1

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	20	Tipo A-1-a (0) DN = 3,1 mm/golpe
Sub base Suelo Seleccionado	Abril 2007	20	Tipo A-1-b (0) DN = 3,9 mm/golpe
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A4 (8) DN = 8,6 mm/golpe CBR = 29%

Longitud del Tramo: 17,80 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLic (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
610.000	596	478	408	199	98	67	52	43	39	15	25	4080	553	145
610.204	391	304	256	141	78	51	39	31	27	16	25	4080	363	107
610.606	402	326	283	173	104	73	54	45	37	16	25	4080	372	89
610.811	421	335	275	133	92	72	59	49	40	16	25	4080	390	115
610.991	251	213	188	131	95	70	57	46	38	16	25	4080	233	45
611.227	293	234	201	129	91	66	54	43	38	16	25	4080	272	71
611.434	323	253	216	134	92	65	51	41	33	16	25	4080	299	83
611.608	279	231	205	136	97	66	50	39	34	16	25	4080	259	54
611.827	275	220	190	116	72	45	30	22	18	16	25	4080	255	65
611.839	343	272	235	147	100	67	52	43	34	16	25	4080	318	83
612.008	295	253	223	119	81	57	45	38	31	16	25	4080	273	50
612.416	531	414	322	133	75	59	48	45	36	15	25	4080	492	170
612.603	394	315	270	104	61	51	43	36	32	15	25	4080	365	96
612.802	253	210	184	114	76	52	44	33	29	16	25	4080	235	51
613.014	289	214	181	107	71	51	42	37	31	16	25	4080	268	87
613.197	419	350	301	177	109	69	52	41	36	16	25	4080	389	87
613.43	446	347	296	129	65	50	41	36	29	15	25	4080	414	118
613.802	287	226	190	116	81	60	49	42	34	16	25	4080	266	76
614.002	289	238	207	131	92	68	53	44	37	16	25	4080	268	61
614.201	257	215	190	128	95	71	57	47	41	16	25	4080	238	48

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
614.401	242	199	175	113	81	59	47	41	34	16	25	4080	225	50
614.603	224	182	158	102	73	55	46	38	36	16	25	4080	207	49
614.808	287	234	200	113	71	50	42	34	30	16	25	4080	266	65
615.199	210	169	147	96	71	54	44	36	32	16	25	4080	195	48
615.405	433	334	283	158	100	70	55	46	40	15	25	4080	401	119
615.602	339	270	234	141	94	68	54	49	41	16	25	4080	314	80
615.813	234	191	166	104	73	54	44	38	32	15	25	4080	217	51
616.057	294	226	193	113	76	54	45	38	34	16	25	4080	273	80
616.219	323	251	213	111	78	58	49	43	35	16	25	4080	299	86
616.402	419	243	212	135	93	66	52	41	34	16	25	4080	388	177
616.600	681	220	182	106	72	54	46	38	33	16	25	4080	631	449
616.802	273	214	178	106	73	54	43	37	33	15	25	4080	253	75
617.026	244	190	161	94	66	50	41	36	31	16	25	4080	226	66
617.216	252	193	162	96	66	49	41	35	29	16	25	4080	234	72
617.388	375	258	212	105	59	41	33	29	23	15	25	4080	347	136
617.615	411	310	265	124	81	59	52	40	35	15	25	4080	381	115
617.822	329	275	243	151	98	54	43	36	28	16	25	4080	305	62

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	681	478	408	199	109	73	59	49	41	16	25	4080	631	449
Percentil 80	417	314	269	140	95	68	53	43	37	16	25	4080	387	115
Mediana	295	238	207	124	81	58	47	39	34	16	25	4080	273	80
Mínimo	210	169	147	94	59	41	30	22	18	15	25	4080	195	45

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.4	1.164	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Agosto 2018	7.7	2.080	2144	3.30%	62	0.10%	2206	3.40%	5	0.008%
Febrero 2023	11.8	2.493	5305	8.16%	6561	10.09%	11866	18.25%	99	0.152%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.505	0.916
2008	6750	1.551	0.944
2009	7100	1.515	0.929
2010	8350	1.771	1.060
2011	9200	1.951	1.168
2012	8900	1.775	1.018
2013	8950	1.785	1.024
2014	9550	1.905	1.093
2015	10500	2.346	1.387
2016	10200	2.279	1.347
2017	11100	2.480	1.466
2018	11000	2.458	1.453
2019	10600	2.369	1.400
2020	7000	1.564	0.925
2021	10800	2.413	1.426
2022	13500	3.027	1.694

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S4

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Junio 2005	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Junio 2005	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Junio 2005	22	Tipo A-1-a (0) DN = 2,3 mm/golpe
Sub base Suelo Seleccionado	Junio 2005	18	Tipo A4 (0) DN = 3,6 mm/golpe
Subrasante	Junio 2005	--	Tipo A4 (8) DN = 6,9 mm/golpe CBR = 22%

Longitud del Tramo: 13,98 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	(μm)	1500	1800	2100					
624.418	416	319	259	137	85	57	46	39	33	16	26	4080	376	117
624.601	201	166	144	94	65	47	38	32	23	16	26	4080	182	38
624.807	223	176	150	91	63	49	39	29	25	16	26	4080	202	51
625.006	214	172	149	96	69	50	42	34	30	16	26	4080	194	45
625.206	236	194	169	106	76	56	46	37	34	16	26	4080	213	44
625.404	225	183	156	97	70	49	41	33	28	16	26	4080	204	48
625.61	229	189	167	107	76	55	45	37	31	16	26	4080	207	40
625.813	266	217	189	117	82	57	44	37	30	16	26	4080	240	51
626.008	230	183	156	95	66	47	38	30	27	16	26	4080	208	51
626.192	264	216	184	113	77	54	42	35	29	15	26	4080	238	55
626.408	265	210	178	105	69	47	37	32	25	16	26	4080	239	62
626.621	189	151	128	80	57	43	35	30	27	16	26	4080	171	43
626.825	284	211	174	92	64	48	38	30	26	16	26	4080	257	84
627.026	220	178	152	92	63	46	37	31	27	15	26	4080	199	46
627.227	357	275	230	129	80	52	41	36	28	15	26	4080	323	92
627.410	224	182	157	96	66	46	36	30	26	16	26	4080	203	46
627.603	223	187	164	103	71	49	38	31	27	16	26	4080	202	37
627.800	379	315	268	148	91	60	47	38	34	16	26	4080	343	75
628.034	374	289	244	144	94	62	48	39	33	15	26	4080	338	95
628.207	336	257	222	138	94	65	51	40	34	16	26	4080	304	81

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	(μm)	1500	1800	2100					
628.407	298	236	202	120	77	52	40	35	30	16	26	4080	269	67
628.639	252	193	160	92	61	43	34	28	25	15	26	4080	227	67
628.82	209	170	151	103	76	54	39	27	24	16	26	4080	189	38
629.013	216	161	134	79	55	39	32	27	23	16	26	4080	195	61
629.213	248	199	172	107	75	53	40	33	29	16	26	4080	224	52
629.399	194	157	137	88	64	47	38	32	27	16	26	4080	176	39
629.618	176	139	120	75	54	41	35	30	23	16	26	4080	159	39
629.818	197	159	136	83	56	40	33	28	27	16	26	4080	178	42
630.035	205	164	142	86	57	35	30	27	25	16	26	4080	186	44
630.211	295	227	190	103	62	44	37	31	29	16	26	4080	267	76
630.423	220	181	155	94	67	49	44	33	30	16	26	4080	199	44
630.622	230	187	163	102	72	53	44	37	31	16	26	4080	208	45
630.832	171	136	117	75	56	42	38	32	28	16	26	4080	155	38
631.010	277	219	184	104	65	44	35	30	30	16	26	4080	250	67
631.193	202	158	138	87	61	44	36	29	25	16	26	4080	183	45
631.396	202	163	142	88	62	46	36	30	27	16	26	4080	183	41
631.616	192	153	133	84	61	44	35	29	28	16	26	4080	173	40
631.835	212	173	151	98	70	51	41	34	29	16	26	4080	191	40
631.975	168	132	113	73	55	42	34	29	25	16	26	4080	152	39
632.211	241	193	164	98	66	47	39	31	30	16	26	4080	218	54
632.422	170	134	116	74	55	43	36	30	28	16	26	4080	153	38
632.623	224	173	148	88	62	45	37	36	28	16	26	4080	203	55
632.799	164	127	108	66	47	34	29	25	17	16	26	4080	148	40
633.025	214	166	142	88	62	48	37	32	30	16	26	4080	193	51
633.200	191	150	129	82	61	48	39	32	30	16	26	4080	172	43
633.398	200	163	142	95	70	51	41	35	30	16	26	4080	181	39
633.600	181	147	129	89	68	53	44	37	33	16	26	4080	164	35
633.794	204	170	150	99	73	53	42	35	29	16	26	4080	184	35
633.997	268	210	178	107	76	58	47	41	33	16	26	4080	243	64
634.200	166	128	112	73	56	44	37	31	30	16	26	4080	150	38
634.396	224	177	150	92	65	47	38	34	28	16	26	4080	202	53
634.607	200	162	136	75	48	35	29	26	22	16	26	4080	181	45
634.808	210	163	136	78	53	40	33	29	27	16	26	4080	190	54
634.997	192	151	128	77	54	42	33	28	26	16	26	4080	173	45
635.191	211	174	153	101	73	55	42	37	31	16	26	4080	191	38
635.410	254	205	173	101	66	47	36	31	26	16	26	4080	230	57
635.600	200	156	134	82	58	43	34	30	25	16	26	4080	181	47
635.808	225	185	161	104	75	56	44	36	29	16	26	4080	204	43
636.018	362	278	232	129	82	57	45	38	32	16	26	4080	327	95
636.203	226	187	162	105	76	58	48	39	35	16	26	4080	205	42
636.397	236	200	176	118	86	62	50	39	34	16	26	4080	213	37
636.607	259	211	178	104	71	52	42	35	33	16	26	4080	234	56
636.813	235	193	170	110	84	64	53	44	37	15	26	4080	212	42

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	(μm)	1500	1800	2100					
637.008	234	187	161	100	70	54	45	36	32	15	26	4080	212	51
637.198	217	169	143	89	64	49	39	34	31	16	26	4080	196	53
637.423	203	161	135	72	51	39	32	28	26	16	26	4080	184	49
637.626	378	306	261	126	76	58	50	42	32	15	26	4080	342	81
637.817	295	243	205	124	86	65	52	42	35	16	26	4080	266	61
638.002	234	183	152	91	65	47	38	31	25	16	26	4080	212	59
638.200	251	193	158	92	67	52	43	36	32	16	26	4080	227	69
638.401	240	195	168	97	59	38	32	26	23	16	26	4080	217	49

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	(μm)	1500	1800	2100					
Máximo	416	319	268	148	94	65	53	44	37	16	26	4080	376	117
Percentil 80	265	211	178	107	76	55	44	37	32	16	26	4080	239	62
Mediana	224	182	155	96	66	48	39	32	29	16	26	4080	203	47
Mínimo	164	127	108	66	47	34	29	25	17	15	26	4080	148	35

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.6	1.323	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Agosto 2018	6.1	1.630	812	1.59%	5	0.010%	817	1.60%	4	0.008%
Febrero 2023	8.9	1.671	592	1.16%	297	0.58%	889	1.74%	54	0.106%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2006	6500	1.501	0.968
2007	6700	1.547	0.998
2008	6900	1.593	1.028
2009	7300	1.685	1.087
2010	8400	1.601	0.940
2011	9800	1.868	1.097
2012	9450	1.801	1.057
2013	10500	2.308	1.377
2014	10200	2.242	1.337
2015	11500	2.462	1.483
2016	11200	2.397	1.444
2017	11800	2.526	1.521
2018	11700	2.504	1.508
2019	11200	2.397	1.444
2020	7400	1.584	0.954
2021	11300	2.419	1.457
2022	14000	2.456	1.361

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S7

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Junio 2005	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Junio 2005	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Junio 2005	25	Tipo A-1-a (0) DN = 2,3 mm/golpe
Sub base Suelo Seleccionado	Junio 2005	14	Tipo A-2-4 (0) DN = 5,8 mm/golpe
Subrasante	Junio 2005	--	Tipo A4 (7) DN = 9,5 mm/golpe

Longitud del Tramo: 3,30 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
643.810	360	283	234	126	79	55	42	36	34	15	31	4080	297	62
644.026	730	261	221	122	72	43	29	29	25	16	31	4080	600	380
644.215	348	264	218	116	73	51	39	33	29	15	31	4080	286	68
644.632	393	291	239	124	76	50	40	35	30	15	31	4080	323	83
644.842	329	246	200	101	58	40	31	27	24	16	31	4080	270	70
645.010	364	275	226	120	75	51	40	36	28	15	31	4080	300	73
645.208	344	257	213	111	67	45	35	28	27	15	31	4080	283	70
645.410	361	273	222	118	77	56	46	38	34	15	31	4080	297	75
645.611	373	281	228	122	79	55	44	37	32	15	31	4080	307	79
645.811	413	280	220	98	63	46	39	35	29	15	31	4080	340	120
646.217	416	324	269	134	71	43	36	30	28	16	31	4080	342	74
646.407	326	248	207	118	81	58	47	39	34	16	31	4080	268	61
646.606	422	306	247	126	79	56	44	39	35	15	31	4080	348	100
646.814	348	267	222	121	76	52	42	33	29	16	31	4080	286	64

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	730	324	269	134	81	58	47	39	35	16	31	4080	600	380
Percentil 80	414	286	236	125	79	56	44	37	34	16	31	4080	341	90
Mediana	363	274	222	120	75	51	40	35	29	15	31	4080	298	73
Mínimo	326	246	200	98	58	40	29	27	24	15	31	4080	268	61

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	7.5	1.0	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Agosto 2018	10.0	1.2	297	2.47%	6	0.05%	303	2.52%	0	0.000%
Febrero 2023	15.1	1.2	337	2.80%	414	3.44%	751	6.24%	45	0.374%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2006	5850	1.130	0.720
2007	7150	1.302	0.777
2008	7350	1.339	0.799
2009	7750	1.412	0.842
2010	8900	1.621	0.967
2011	11200	2.040	1.217
2012	10800	1.967	1.174
2013	11500	2.207	1.276
2014	11200	2.149	1.243
2015	12500	2.030	1.155
2016	12200	1.981	1.127
2017	13000	2.111	1.201
2018	12800	2.079	1.183
2019	12100	2.092	1.278
2020	8000	1.383	0.845
2021	12100	2.092	1.278
2022	15000	2.719	1.524

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S8

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Junio 2005	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Junio 2005	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Junio 2005	20	Tipo A-1-b (0) DN = 2,5 mm/golpe
Sub base Suelo Seleccionado	Junio 2005	20	Tipo A-1-b (0) DN = 4,9 mm/golpe
Subrasante	Junio 2005	--	Tipo A-1-b (0) DN = 7,4 mm/golpe

Longitud del Tramo: 7,40 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
646.814	348	267	222	121	76	52	42	33	29	16	31	4080	286	64
647.023	277	221	187	111	77	55	45	37	34	16	31	4080	228	40
647.204	339	263	223	121	68	45	37	29	29	15	31	4080	279	56
647.416	301	243	204	111	65	41	34	29	27	15	31	4080	248	44
647.624	520	383	311	145	80	46	34	34	29	15	31	4080	428	117
647.814	474	364	307	163	90	51	41	35	32	15	31	4080	390	83
647.998	370	291	238	112	55	39	33	29	27	15	31	4080	304	66
648.213	375	300	259	152	99	68	52	41	39	16	31	4080	309	49
648.394	353	266	220	112	65	43	36	31	27	15	31	4080	290	70
648.597	311	248	204	106	65	45	36	30	27	15	31	4080	256	51
648.792	366	278	223	108	69	51	43	36	32	16	31	4080	301	79
649.031	180	142	121	76	59	48	39	36	30	16	31	4080	148	27
649.213	246	195	164	96	68	51	42	38	32	16	31	4080	202	38
649.403	364	275	220	99	49	32	26	26	23	15	31	4080	299	80
649.615	397	282	232	90	48	36	30	26	23	15	31	4080	327	95
649.841	350	266	219	112	65	43	35	30	27	15	31	4080	288	69
650.032	470	362	301	157	87	53	42	37	32	15	31	4080	387	85
650.216	393	308	252	125	70	45	32	31	26	15	31	4080	323	71
650.406	285	219	181	97	63	43	35	30	25	15	31	4080	234	53
650.599	411	324	266	131	76	53	42	35	30	16	31	4080	338	72

Progresiva	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
650.811	345	268	225	119	68	42	32	27	25	15	31	4080	284	59
651.005	356	277	231	124	75	50	40	33	29	15	31	4080	293	62
651.401	326	254	212	111	64	41	32	26	24	15	31	4080	268	56
651.593	335	271	228	121	68	41	29	26	24	15	31	4080	276	48
651.802	439	336	274	142	88	61	48	39	33	15	31	4080	361	88
652.004	575	410	322	144	79	52	42	39	31	15	31	4080	473	151
652.198	385	293	236	104	65	44	36	31	29	16	31	4080	317	81
652.397	379	287	233	111	63	40	31	26	22	15	31	4080	312	79
652.6	428	335	251	112	56	35	28	23	21	15	31	4080	352	101
652.817	454	354	294	143	75	48	34	28	25	15	31	4080	374	80
652.996	418	328	276	153	96	63	46	37	30	15	31	4080	344	68
653.2	348	280	235	132	83	57	45	37	30	16	31	4080	286	51
653.398	261	211	182	107	69	46	34	30	23	15	31	4080	215	33
653.61	349	281	235	125	75	49	38	32	27	16	31	4080	287	52
653.807	186	142	113	57	38	28	25	21	19	16	31	4080	153	40
654.188	268	204	171	97	65	47	41	33	29	16	31	4080	221	49

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	575	410	322	163	99	68	52	41	39	16	31	4080	473	151
Percentil 80	418	328	266	142	79	52	42	37	31	16	31	4080	344	81
Mediana	354	278	230	112	68	46	36	31	28	15	31	4080	292	65
Mínimo	180	142	113	57	38	28	25	21	19	15	31	4080	148	27

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	4.6	1.016	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Agosto 2018	6.0	1.090	620	2.29%	6	0.02%	626	2.32%	15	0.056%
Febrero 2023	8.7	1.198	1136	4.21%	1728	6.40%	2864	10.60%	18	0.067%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2006	5850	1.130	0.720
2007	7150	1.302	0.777
2008	7350	1.339	0.799
2009	7750	1.412	0.842
2010	8900	1.621	0.967
2011	11200	2.040	1.217
2012	10800	1.967	1.174
2013	11500	2.207	1.276
2014	11200	2.149	1.243
2015	12500	2.030	1.155
2016	12200	1.981	1.127
2017	13000	2.111	1.201
2018	12800	2.079	1.183
2019	12100	2.092	1.278
2020	8000	1.383	0.845
2021	12100	2.092	1.278
2022	15000	2.719	1.524

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S9

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Junio 2005	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Junio 2005	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Junio 2005	20	Tipo A-1-b (0) DN = 2,5 mm/golpe
Sub base Suelo Seleccionado	Junio 2005	20	Tipo A-1-b (0) DN = 4,9 mm/golpe
Subrasante	Junio 2005	--	Tipo A-1-b (0) DN = 7,4 mm/golpe

Longitud del Tramo: 5,80 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
654.380	402	308	254	128	75	50	44	32	26	16	31	4080	331	76
654.607	374	278	224	109	64	43	33	27	25	15	31	4080	308	83
654.802	376	289	240	127	77	53	41	34	29	15	31	4080	310	69
655.006	343	265	215	108	66	46	40	31	26	16	31	4080	282	67
655.189	476	372	300	134	70	38	27	21	19	15	31	4080	392	92
655.403	370	290	243	119	62	35	25	20	16	15	31	4080	304	62
655.595	488	385	326	166	88	47	39	31	26	15	31	4080	402	76
655.823	325	233	188	102	71	53	42	35	30	16	31	4080	268	80
656.032	255	195	164	88	55	38	31	24	25	15	31	4080	210	47
656.201	369	275	223	110	67	47	38	32	30	16	31	4080	303	80
656.397	246	171	137	65	40	29	25	20	18	16	37	4080	180	42
656.603	416	325	269	127	63	36	28	21	20	15	37	4080	303	34
656.795	504	378	310	146	74	41	32	26	24	16	37	4080	367	57
657.208	1359	254	205	92	49	31	25	22	20	16	37	4080	990	785
657.391	351	273	231	125	72	44	36	26	24	15	37	4080	256	25
657.609	399	324	273	145	85	52	39	35	27	15	37	4080	291	18
657.796	302	235	198	106	63	39	29	25	22	16	37	4080	220	22
658.010	369	292	238	112	63	40	35	29	26	16	37	4080	269	31
658.232	346	258	210	99	58	39	32	27	24	15	37	4080	252	42
658.399	367	284	235	114	62	41	33	28	25	16	37	4080	267	32

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
658.612	311	243	207	109	57	30	20	19	15	16	37	4080	227	20
658.807	361	279	234	113	56	29	20	17	15	16	37	4080	263	29
659.016	547	253	208	99	49	27	21	17	16	15	37	4080	398	190
659.219	358	279	234	121	63	32	22	23	16	15	37	4080	261	27
659.391	295	232	200	110	63	38	26	20	17	15	37	4080	215	15
659.603	378	289	242	128	72	41	27	23	20	16	37	4080	276	34
659.819	301	236	201	103	56	33	24	18	16	15	37	4080	219	18
660.153	452	308	247	112	60	36	25	20	17	16	38	4080	322	75

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [µm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	1359	385	326	166	88	53	44	35	30	16	38	4080	990	785
Percentil 80	437	308	251	127	72	47	39	31	26	16	37	4080	327	79
Mediana	369	278	232	112	63	39	30	24	23	15	37	4080	279	45
Mínimo	246	171	137	65	40	27	20	17	15	15	31	4080	180	15

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento	Rugosidad	Fisuras Lineales		Fisuras en Malla		Fisuras Totales		Baches	
	[mm]	IRI[m/km]	(m)	(%)	(m2)	(%)	(m2)	(%)	(m2)	(%)
Noviembre 2010	5.7	0.879	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Agosto 2018	8.6	1.100	935	4.42%	16	0.07%	951	4.49%	0	0.000%
Febrero 2023	14.3	1.218	914	4.32%	756	3.57%	1670	7.89%	225	1.063%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N_{80KN} [x10⁶] DNV (1)	N_{80KN} [x10⁶] LILLI (2)
2006	5850	1.130	0.720
2007	7150	1.302	0.777
2008	7350	1.339	0.799
2009	7750	1.412	0.842
2010	8900	1.621	0.967
2011	11200	2.040	1.217
2012	10800	1.967	1.174
2013	11500	2.207	1.276
2014	11200	2.149	1.243
2015	12500	2.030	1.155
2016	12200	1.981	1.127
2017	13000	2.111	1.201
2018	12800	2.079	1.183
2019	12100	2.092	1.278
2020	8000	1.383	0.845
2021	12100	2.092	1.278
2022	15000	2.719	1.524

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S11

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	19	CBR = 48%
Sub base Suelo Arena	Abril 2007	19	CBR = 8%
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A-4 (0) DN = 8,5 mm/golpe

Longitud del Tramo: 12,00 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
592.7	245	198	176	104	66	44	37	32	-	16	32	4080	197	21
592.9	377	280	236	121	72	50	40	34	-	16	33	4080	300	64
593.1	214	170	150	88	59	42	33	29	-	16	33	4080	170	20
593.4	509	327	243	99	61	46	38	30	-	16	35	4080	385	142
593.5	377	272	224	116	71	48	39	33	-	16	34	4080	295	71
593.9	316	250	219	120	74	52	45	38	-	16	34	4080	243	25
594.1	277	220	194	115	76	53	43	36	-	16	33	4080	218	23
594.3	262	202	176	101	67	46	39	33	-	16	34	4080	205	28
594.5	283	211	182	103	65	45	34	28	-	16	34	4080	220	38
594.7	427	334	290	153	90	60	46	39	-	16	35	4080	324	34
594.9	436	325	279	153	101	69	56	44	-	16	35	4080	333	53
595.1	422	326	286	162	100	66	54	42	-	16	35	4080	324	37
595.3	310	253	220	127	82	57	45	36	-	16	35	4080	238	18
595.5	349	281	249	141	90	61	50	40	-	16	34	4080	271	22
595.7	320	254	225	128	82	54	42	34	-	16	35	4080	244	20
595.9	368	292	256	131	76	49	41	33	-	16	34	4080	285	29
596.1	307	252	225	134	86	57	43	34	-	16	35	4080	232	7
596.3	426	315	271	146	90	59	46	39	-	16	36	4080	319	48
596.5	337	269	238	135	81	52	37	32	-	16	36	4080	253	15
596.7	365	297	264	150	93	62	46	39	-	16	36	4080	272	8

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLlc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
596.9	261	204	178	102	67	47	38	31	-	16	36	4080	194	15
597.1	326	230	196	102	59	37	29	25	-	16	36	4080	244	48
597.3	353	253	218	122	77	51	40	34	-	16	36	4080	266	48
597.5	365	301	268	129	72	45	35	29	-	16	35	4080	279	11
597.7	405	316	267	137	80	51	38	31	-	16	36	4080	301	33
597.9	265	212	184	101	57	38	27	24	-	16	36	4080	197	13
598.1	235	182	156	86	51	32	25	20	-	16	37	4080	173	17
598.3	257	185	156	80	49	33	26	20	-	16	36	4080	189	34
598.5	266	203	173	92	53	32	24	19	-	16	36	4080	198	25
598.7	339	239	194	93	51	32	24	20	-	16	36	4080	254	60
598.9	391	300	252	129	72	46	35	32	-	16	36	4080	293	41
599.1	272	219	194	112	70	45	35	28	-	16	37	4080	200	6
599.3	326	265	239	153	106	75	60	48	-	16	37	4080	240	2
599.5	441	326	281	160	104	72	56	45	-	16	37	4080	321	40
599.7	346	272	238	139	93	66	53	44	-	16	37	4080	252	14
600.1	373	287	247	125	76	50	40	34	-	16	37	4080	270	23
600.3	424	315	272	144	92	64	52	43	-	16	38	4080	301	29
600.5	294	239	211	121	77	54	43	37	-	16	38	4080	211	0
600.7	321	259	226	129	78	52	40	35	-	16	38	4080	228	2
600.9	402	312	269	138	81	55	46	38	-	16	39	4080	280	11
601.1	281	217	190	107	65	44	35	30	-	16	38	4080	199	9
601.3	435	320	274	140	84	57	47	39	-	16	39	4080	300	27
601.5	430	309	259	130	73	49	40	32	-	16	38	4080	306	47
601.7	393	320	279	152	91	62	49	41	-	16	39	4080	272	--
601.9	307	249	223	136	91	61	48	39	-	16	38	4080	217	--
602.1	405	292	253	140	87	60	47	39	-	16	39	4080	280	27
602.3	286	230	206	129	89	61	50	40	-	16	39	4080	201	--
602.5	327	266	238	140	89	59	47	39	-	16	39	4080	231	--
602.7	387	307	272	158	98	63	45	39	-	16	39	4080	271	--
602.9	311	259	232	142	91	61	48	38	-	16	39	4080	216	--
603.1	300	227	192	94	51	30	21	20	-	16	39	4080	211	19
603.3	418	305	263	149	98	68	54	43	-	16	39	4080	295	32
603.5	379	300	264	153	94	61	47	35	-	16	39	4080	263	--
603.7	488	371	320	176	106	71	56	45	-	16	40	4080	335	14
603.9	403	333	301	187	123	82	60	48	-	16	39	4080	279	--
604.1	412	317	281	166	106	72	56	45	-	16	40	4080	283	2
604.3	347	285	257	156	104	71	54	44	-	16	40	4080	237	--
604.5	542	377	319	164	102	70	58	42	-	16	40	4080	372	53
604.7	299	241	215	126	80	53	43	36	-	16	40	4080	203	--

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	542	377	320	187	123	82	60	48	-	16	40	4080	385	142
Percentil 80	414	315	271	152	93	63	51	41	-	16	39	4080	300	39
Mediana	347	272	238	130	81	54	43	36	-	16	36	4080	254	20
Mínimo	214	170	150	80	49	30	21	19	-	16	32	4080	170	--

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.7	1.454	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Enero 2012	S/D	S/D	2013	4.60%	46	0.11%	2059	4.70%	2	0.005%
Agosto 2018	6.8	1.590	2791	6.37%	61	0.14%	2852	6.51%	4	0.009%
Febrero 2023	9.1	1.793	5667	12.94%	1256	2.87%	6923	15.81%	40	0.091%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.624	0.997
2008	6750	1.673	1.028
2009	7100	1.760	1.081
2010	8350	2.070	1.271
2011	9200	1.792	1.021
2012	8900	1.733	0.988
2013	8950	1.743	0.993
2014	9550	1.806	1.047
2015	10100	2.303	1.365
2016	9900	2.258	1.338
2017	10700	2.286	1.318
2018	10600	2.265	1.306
2019	10200	2.179	1.257
2020	6650	0.991	0.551
2021	10400	2.222	1.281
2022	13200	2.778	1.568

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S12

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	20	CBR = 49%
Sub base Suelo Arena	Abril 2007	20	CBR = 9%
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A-4 (0) DN = 6,8 mm/golpe

Longitud del Tramo: 2,00 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
604.9	334	262	231	134	79	52	41	34	-	16	40	4080	229	--
605.1	352	291	260	157	99	65	48	38	-	16	40	4080	240	--
605.3	298	232	205	119	80	58	47	40	-	16	41	4080	199	--
605.5	347	279	247	148	97	67	50	44	-	16	40	4080	239	--
605.7	320	255	228	135	88	59	47	37	-	16	40	4080	216	--
605.9	350	282	253	152	100	65	49	40	-	16	40	4080	236	--
606.1	403	323	287	162	102	66	51	42	-	16	40	4080	274	--
606.3	512	401	340	192	119	79	59	49	-	16	40	4080	346	--
606.7	566	417	354	168	90	60	49	40	-	16	40	4080	382	--

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [µm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	566	417	354	192	119	79	59	49	-	16	41	4080	382	28
Percentil 80	446	354	308	165	101	67	50	43	-	16	40	4080	303	1
Mediana	350	282	253	152	97	65	49	40	-	16	40	4080	239	--
Mínimo	298	232	205	119	79	52	41	34	-	16	40	4080	199	--

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m2) (%)		Fisuras Totales (m2) (%)		Baches (m2) (%)	
Noviembre 2010	6.0	1.135	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Enero 2012	S/D	S/D	203	2.77%	7	0.10%	210	2.87%	10	0.137%
Agosto 2018	6.3	1.460	672	9.21%	6	0.09%	679	9.30%	2	0.027%
Febrero 2023	9.2	1.867	818	11.21%	406	5.56%	1224	16.77%	0	0.000%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.505	0.916
2008	6750	1.551	0.944
2009	7100	1.515	0.929
2010	8350	1.771	1.060
2011	9200	1.951	1.168
2012	8900	1.775	1.018
2013	8950	1.785	1.024
2014	9550	1.905	1.093
2015	10500	2.346	1.387
2016	10200	2.279	1.347
2017	11100	2.480	1.466
2018	11000	2.458	1.453
2019	10600	2.369	1.400
2020	7000	1.564	0.925
2021	10800	2.413	1.426
2022	13500	3.027	1.694

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S17

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	20	CBR = 46%
Sub base Suelo Cal	Abril 2007	30	--
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A-4 (0) DN = 10,0 mm/golpe

Longitud del Tramo: 3,20 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
585.4	508	418	370	216	130	79	58	47	0	16	34	4080	391	21
585.6	322	252	222	128	81	56	46	37	0	16	34	4080	251	29
585.8	411	330	288	156	92	60	45	39	0	16	34	4080	319	31
585.9	705	443	318	117	76	57	50	43	0	16	33	4080	558	240
586	654	497	418	226	154	96	80	61	0	16	34	4080	508	90
586.2	578	418	339	165	100	69	49	43	0	16	34	4080	447	107
586.4	367	285	247	148	95	60	50	40	0	16	34	4080	284	36
586.6	567	440	385	150	95	67	51	43	0	16	34	4080	442	57
586.8	357	279	246	146	94	63	47	36	0	16	34	4080	279	33
587.2	312	255	227	138	87	60	48	38	0	16	34	4080	243	15
587.4	636	512	451	252	152	90	59	50	0	16	34	4080	494	43
587.6	760	576	488	237	122	74	57	50	0	16	35	4080	580	92
587.8	595	495	447	272	163	95	66	54	0	16	35	4080	456	10
588	370	313	290	169	109	73	55	45	0	16	34	4080	285	-
588.2	596	362	261	104	75	59	53	45	0	16	33	4080	473	213

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLic (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	760	576	488	272	163	96	80	61	0	16	35	4080	580	240
Percentil 80	639	495	424	228	134	82	58	50	0	16	34	4080	496	95
Mediana	567	418	318	156	95	67	51	43	0	16	34	4080	442	36
Mínimo	312	252	222	104	75	56	45	36	0	16	33	4080	243	-

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.7	1.223	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Enero 2012	S/D	S/D	878	7.52%	87	0.74%	965	8.26%	0	0.000%
Agosto 2018	13.0	3.640	2328	19.93%	126	1.08%	2454	21.01%	4	0.034%
Febrero 2023	15.5	3.550	2184	18.70%	2154	18.44%	4338	37.14%	412	3.53%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.624	0.997
2008	6750	1.673	1.028
2009	7100	1.760	1.081
2010	8350	2.070	1.271
2011	9200	1.792	1.021
2012	8900	1.733	0.988
2013	8950	1.743	0.993
2014	9550	1.806	1.047
2015	10100	2.303	1.365
2016	9900	2.258	1.338
2017	10700	2.286	1.318
2018	10600	2.265	1.306
2019	10200	2.179	1.257
2020	6650	0.991	0.551
2021	10400	2.222	1.281
2022	13200	2.778	1.568

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S19

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	20	CBR = 46%
Sub base Suelo Cal	Abril 2007	30	CBR = 8%
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A-4 (0) DN = 8,7 mm/golpe

Longitud del Tramo: 3,20 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
589	457	344	302	173	107	70	52	44	-	16	32	4080	366	64
589.2	358	301	273	169	101	64	48	41	-	16	33	4080	286	13
589.4	332	262	230	133	82	51	35	26	-	16	32	4080	266	36
589.6	349	279	244	137	79	46	33	29	-	16	32	4080	280	36
589.8	335	263	233	137	82	52	35	29	-	16	32	4080	270	37
590	395	322	288	151	96	64	50	39	-	16	32	4080	319	31
590.2	659	516	423	209	120	77	59	47	-	16	32	4080	535	112
590.4	402	336	301	180	109	69	50	37	-	16	32	4080	326	25
590.6	389	308	273	159	98	62	46	35	-	16	32	4080	316	43
590.8	484	417	380	246	158	95	64	47	-	16	32	4080	391	11
591	617	517	437	267	167	98	64	41	-	16	32	4080	503	65
591.2	563	449	396	217	122	70	49	37	-	16	33	4080	449	53
591.4	406	336	300	186	119	77	56	45	-	16	32	4080	331	30
591.6	401	322	277	142	86	58	47	37	-	16	32	4080	328	50
591.8	347	264	225	121	76	52	41	35	-	16	32	4080	283	59
592	380	314	278	153	93	61	49	41	-	16	31	4080	311	33
592.2	568	457	365	196	112	74	55	45	-	16	31	4080	466	100

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	659	517	437	267	167	98	64	47	-	16	33	4080	535	112
Percentil 80	547	443	377	207	119	76	56	45	-	16	32	4080	437	63
Mediana	401	322	288	169	101	64	49	39	-	16	32	4080	326	37
Mínimo	332	262	225	121	76	46	33	26	-	16	31	4080	266	11

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.8	1.260	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Enero 2012	S/D	S/D	915	7.83%	0	0.00%	915	7.83%	0	0.000%
Agosto 2018	9.7	2.260	1042	8.92%	19	0.16%	1061	9.08%	2	0.017%
Febrero 2023	15.2	3.410	2184	18.69%	1420	12.16%	3604	30.85%	0	0.000%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.624	0.997
2008	6750	1.673	1.028
2009	7100	1.760	1.081
2010	8350	2.070	1.271
2011	9200	1.792	1.021
2012	8900	1.733	0.988
2013	8950	1.743	0.993
2014	9550	1.806	1.047
2015	10100	2.303	1.365
2016	9900	2.258	1.338
2017	10700	2.286	1.318
2018	10600	2.265	1.306
2019	10200	2.179	1.257
2020	6650	0.991	0.551
2021	10400	2.222	1.281
2022	13200	2.778	1.568

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

TRAMO DE CALIBRACIÓN S21

1) Antecedentes Constructivos:

CAPA	FECHA HABILITACIÓN	ESPESOR [cm]	CARACTERÍSTICAS
Carpeta C°A°M°	Abril 2007	3	Mezcla tipo MAC F-10 con AM3
Bases C°A°C	Abril 2007	14	Mezcla tipo CAC D19 con CA30
Base Estabilizado Granular	Abril 2007	20	CBR = 29%
Sub base Suelo Cal	Abril 2007	30	CBR = 9,9%
Subrasante	Abril 2007	--	Tipo A-4 (0) DN = 8,1 mm/golpe CBR = 8,6%

Longitud del Tramo: 2,90 Km

2) Auscultación Deflectométrica:

Fecha medición: Febrero 2023

Progresiva	Deflexión [mm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. (°C)	Carga (Kg)	Doc (µm)	BLIc (µm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
593	546	439	381	213	124	72	48	37	-	16	32	4080	442	61
593.2	346	270	234	125	78	55	45	36	-	16	31	4080	285	51
593.4	382	291	248	140	89	59	46	33	-	16	31	4080	314	66
593.6	368	287	247	138	83	51	39	34	-	16	31	4080	304	57
593.8	392	313	277	165	103	69	54	45	-	16	31	4080	324	47
594	367	293	260	156	99	63	48	40	-	16	31	4080	305	45
594.2	305	242	213	134	93	67	54	43	-	16	31	4080	253	39
594.4	422	306	265	143	89	61	48	39	-	16	30	4080	353	88
594.6	263	209	183	112	77	56	44	38	-	16	30	4080	220	36
594.8	305	245	215	125	84	56	47	40	-	16	30	4080	255	40
595	334	264	231	139	94	66	51	43	-	16	30	4080	280	48
595.2	172	117	95	48	33	24	17	12	-	16	30	4080	146	51
595.4	459	336	279	141	85	59	48	38	-	16	30	4080	383	104
595.6	295	234	203	126	84	60	49	37	-	16	30	4080	247	45
595.8	293	222	193	115	76	51	39	33	-	16	30	4080	246	53

Valores Característicos:

Parámetro	Deflexión [μm] (distancia en mm)									Frec. (Hz)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Carga (Kg)	Doc (μm)	BLIc (μm)
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100					
Máximo	546	439	381	213	124	72	54	45	-	16	32	4080	442	104
Percentil 80	398	308	267	146	95	66	49	41	-	16	31	4080	329	62
Mediana	346	270	234	138	85	59	48	38	-	16	30	4080	285	51
Mínimo	172	117	95	48	33	24	17	12	-	16	30	4080	146	36

3) Evaluación de parámetros de estado superficial

Fecha Medición	Parámetro (Percentil 80)									
	Ahuellamiento [mm]	Rugosidad IRI[m/km]	Fisuras Lineales (m) (%)		Fisuras en Malla (m ²) (%)		Fisuras Totales (m ²) (%)		Baches (m ²) (%)	
Noviembre 2010	5.9	1.153	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
Enero 2012	S/D	S/D	234	2.21%	22	0.21%	256	2.41%	2	0.019%
Agosto 2018	6.9	1.750	623	5.88%	12	0.12%	635	6.00%	3	0.028%
Febrero 2023	9.1	1.780	1002	9.47%	360	3.40%	1362	12.87%	0	0.000%

4) Solicitaciones

Zona Climática: Pilar (Córdoba)

Tránsito:

AÑO	TMDA	N _{80KN} [x10 ⁶] DNV (1)	N _{80KN} [x10 ⁶] LILLI (2)
2007	6550	1.624	0.997
2008	6750	1.673	1.028
2009	7100	1.760	1.081
2010	8350	2.070	1.271
2011	9200	1.792	1.021
2012	8900	1.733	0.988
2013	8950	1.743	0.993
2014	9550	1.806	1.047
2015	10100	2.303	1.365
2016	9900	2.258	1.338
2017	10700	2.286	1.318
2018	10600	2.265	1.306
2019	10200	2.179	1.257
2020	6650	0.991	0.551
2021	10400	2.222	1.281
2022	13200	2.778	1.568

(1) N obtenido utilizando los coeficientes de efecto destructivo por vehículos sugeridos por la Dirección Nacional de Vialidad

(2) N calculado a partir de los coeficientes de efecto destructivo globales por vehículo de la publicación de los Ing. Lilli y Lockhart del año 1997

ANEXO III

SALIDA BACKVIDE – AJUSTE DE MODELOS

TRAMO DE CALIBRACIÓN S1

1) Resultados del Retroajuste Modular:

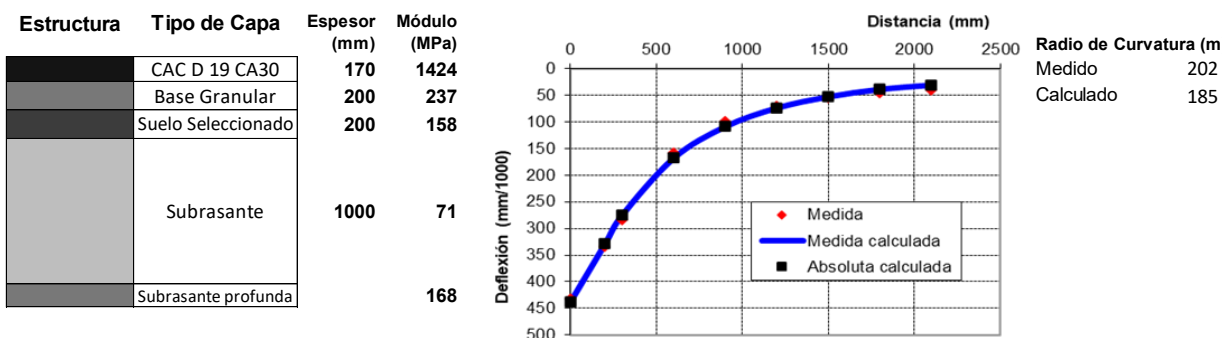
Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 32, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Deformada (mm/1000) Error promedio 6.4

Distancia(mm)	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100				
Medida	433	334	283	158	100	70	55	46	40				
Calculada	437	329	275	168	109	74	53	39	31				
Error	4	5	8	10	9	4	2	7	9				



2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

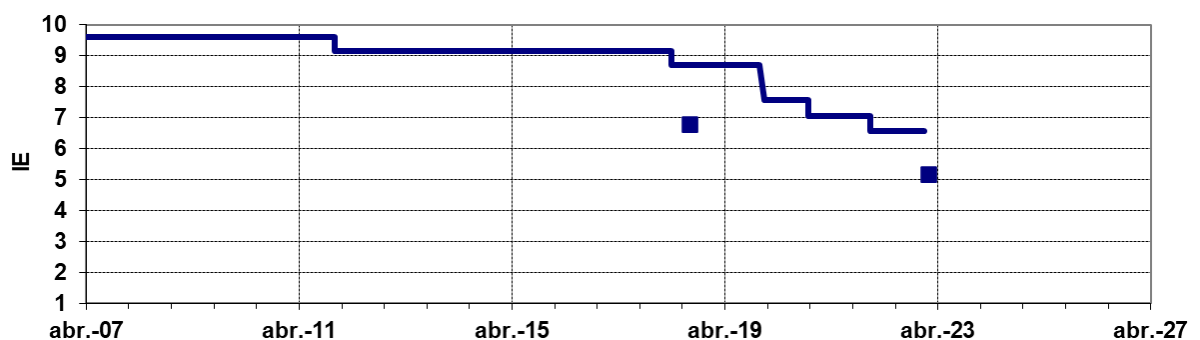
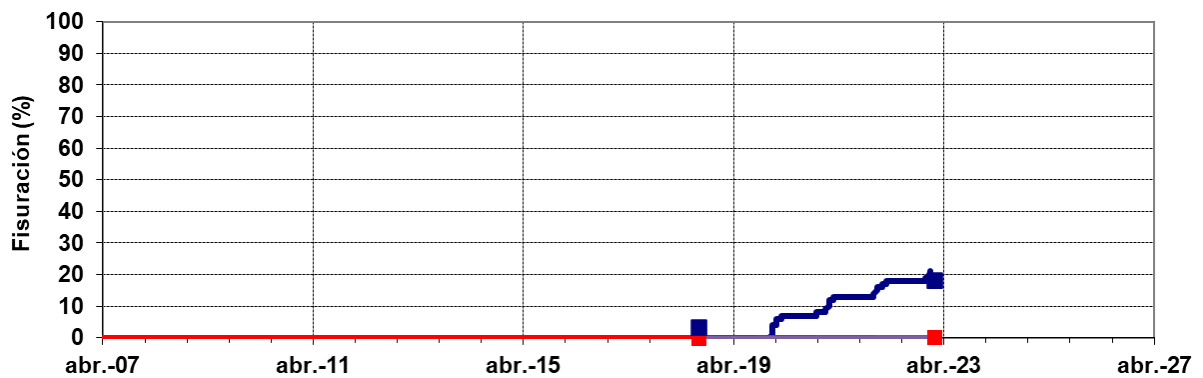
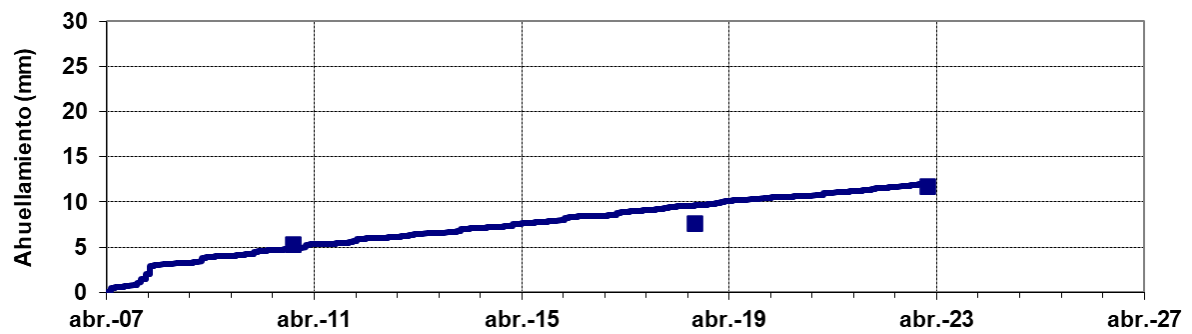
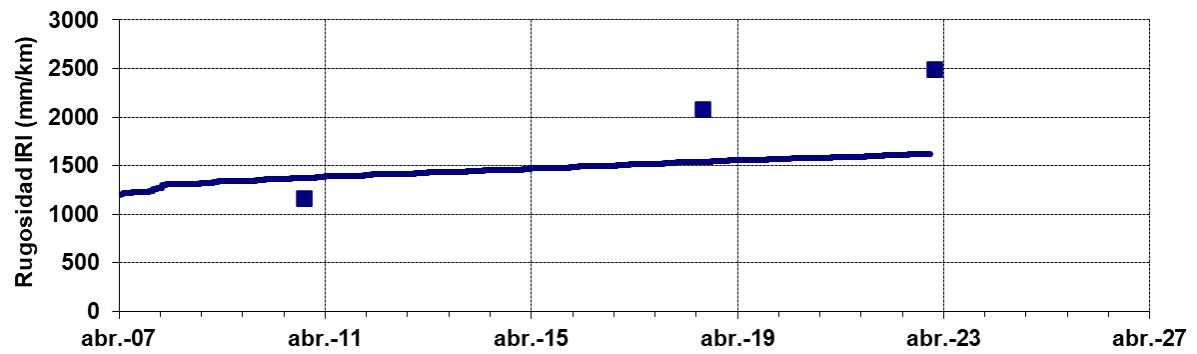
Estructura	Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	16	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3 (Morea)		30			0.35	Adherida	1	1200
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	237		0.40	Adherida	1	
3 Sub Base Granular		200	158		0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			71		0.40	Adherida	1	

Desarrollado por Laboratorio Vial IMAE - Oscar H. Giovanon

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3	1	243.11	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.03	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.03	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.961	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Sub Base Granular	3							0.00	1	-1.961	0.00	1.000	0.440	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.961	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S4

1) Resultados del Retroajuste Modular:

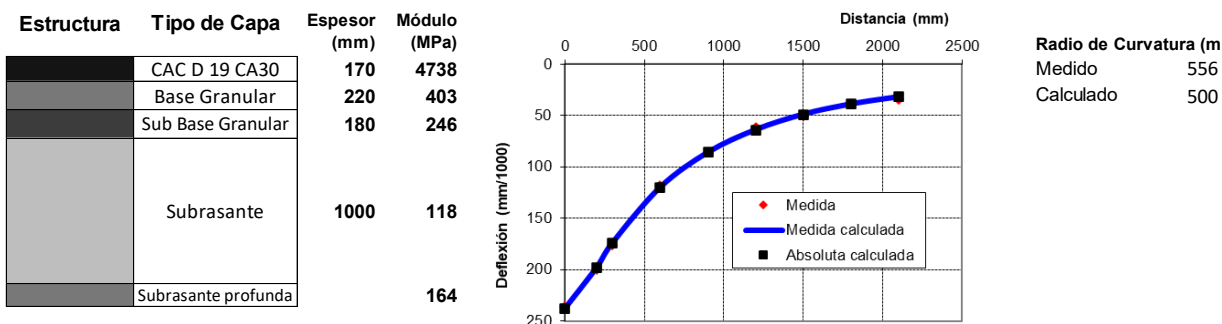
Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 22, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Deformada (mm/1000) Error promedio 1.4

Distancia(mm)	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100
Medida	236	200	176	118	86	62	50	39	34
Calculada	238	198	174	120	86	64	49	39	32
Error	2	2	2	2	0	2	1	0	2



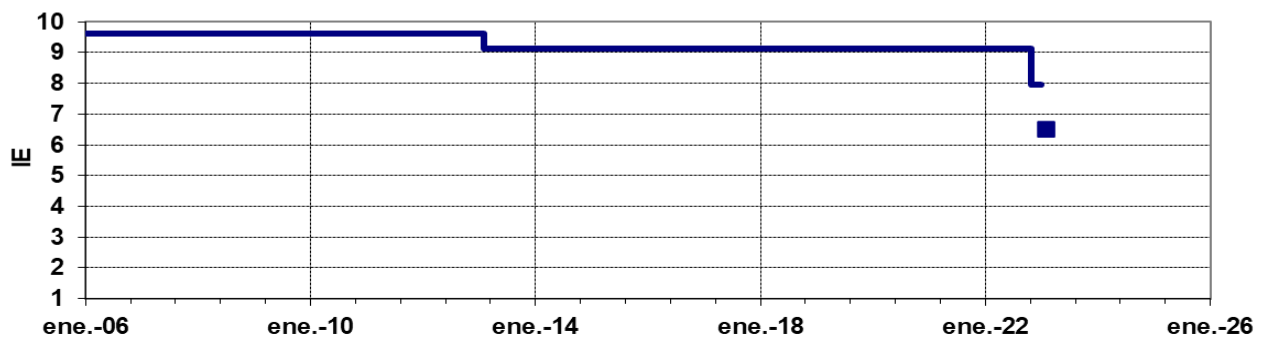
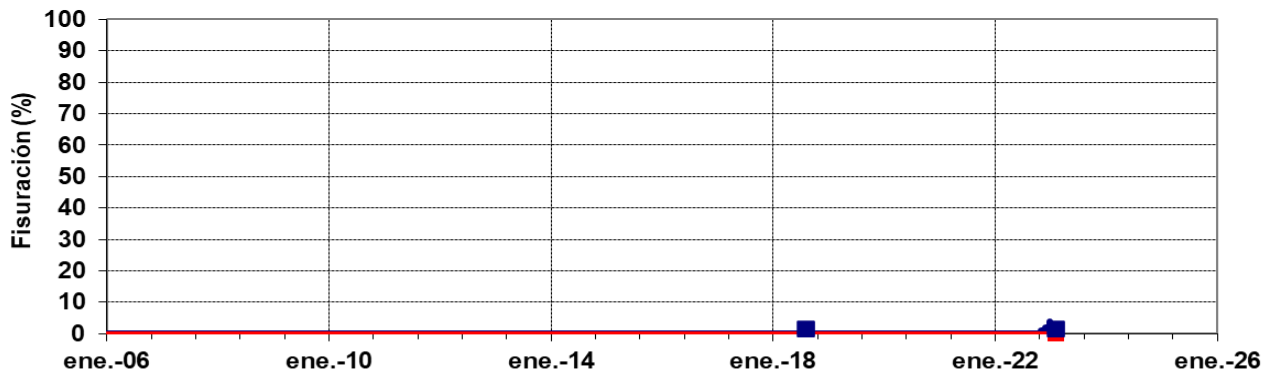
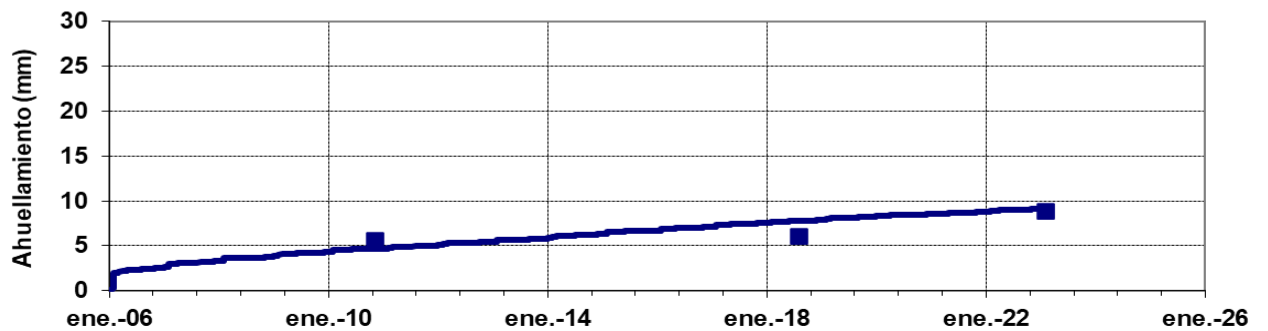
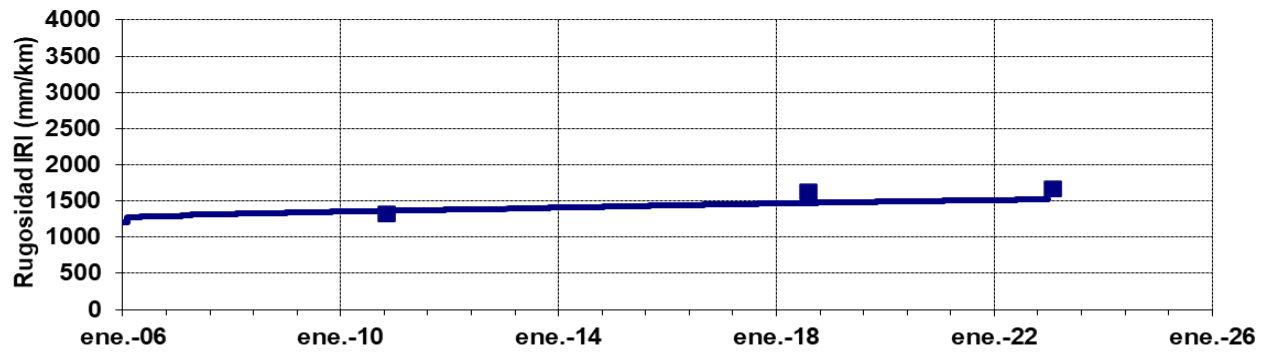
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2006	Mes Inicial	Enero	Años a Simular	17	Número de capas	5
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1200
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		220	403	1.63	0.40	Adherida	1	
3 Sub Base Granular		180	246	2.09	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			118		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		219.15	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	76.16	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	76.16	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.990	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Sub Base Granular	3							0.00	1	-1.990	0.00	1.000	0.440	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.990	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S7

1) Resultados del Retroajuste Modular:

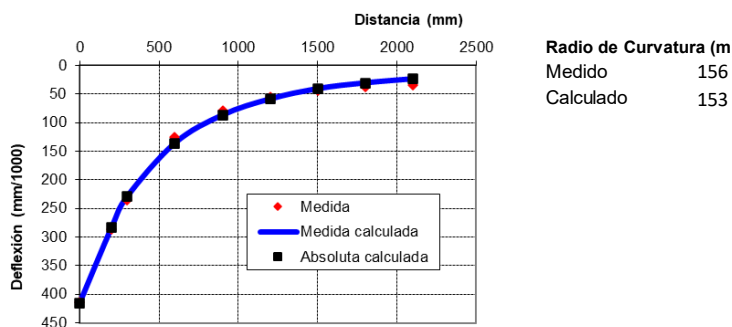
Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 48, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)										Error promedio 5.7		
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100				
Medida	414	286	236	125	79	56	44	37	34				
Calculada	415	284	229	136	87	59	41	31	24				
Error	1	2	7	11	8	3	3	6	10				

Estructura	Tipo de Capa	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
	CAC D 19 CA30	170	936
	Base Granular	250	310
	Sub Base Granular	140	168
	Subrasante	1000	87
	Subrasante profunda		212



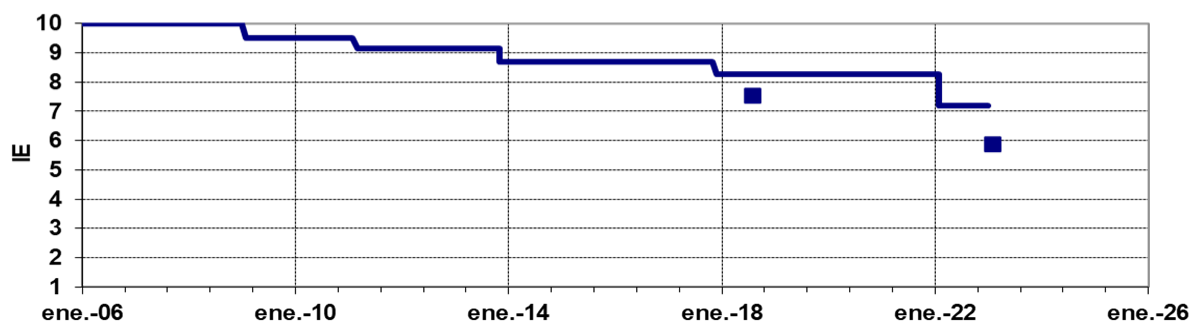
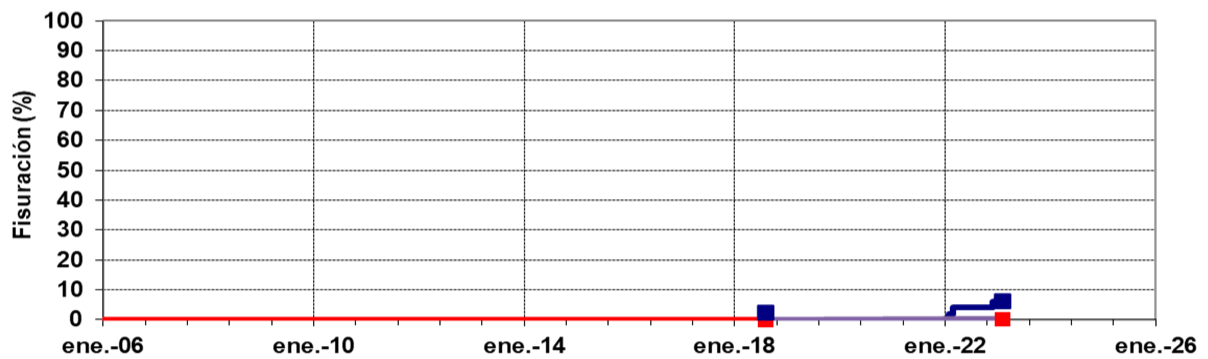
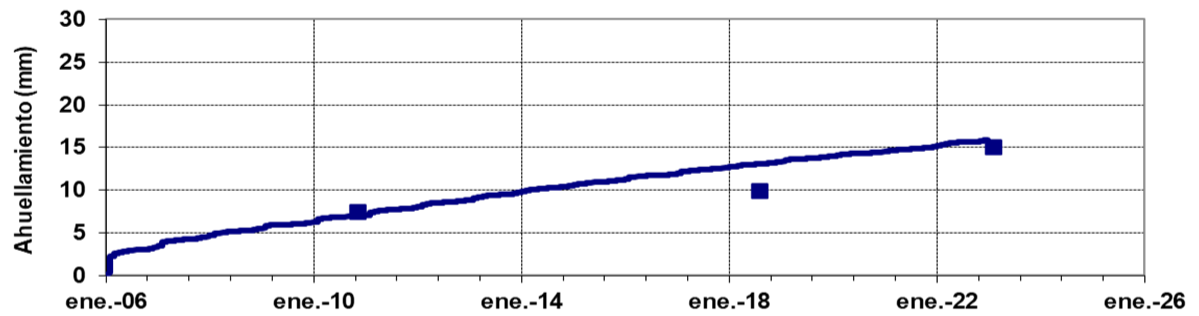
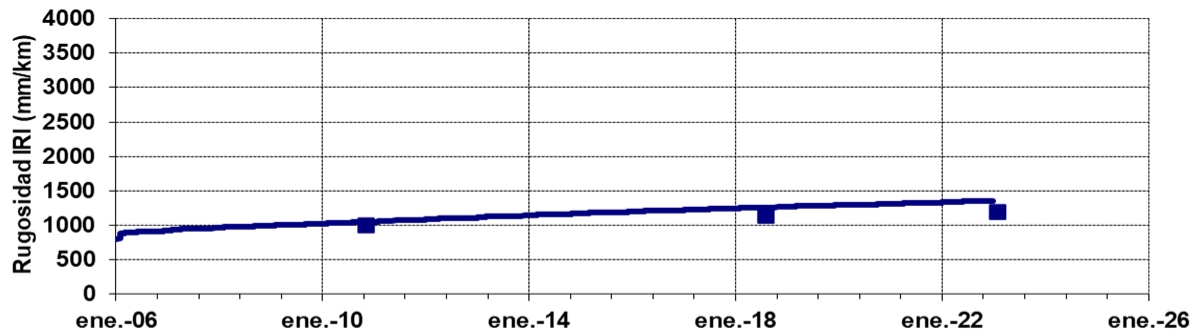
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2006	Mes Inicial	Enero	Años a Simular	17	Número de capas	5
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	800
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		250	310	1.85	0.40	Adherida	1	
3 Sub Base Granular		140	168	1.91	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			87		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Análisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		231.38	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	82.16	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	82.16	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.700	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Sub Base Granular	3							0.00	1	-1.700	0.00	1.000	0.440	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.700	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S8

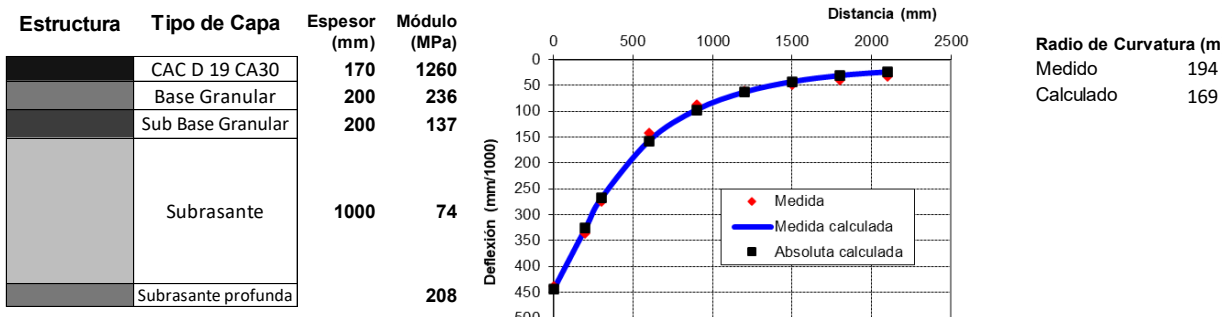
1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 41, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)									Error promedio 7.7		
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100			
Medida	439	336	274	142	88	61	48	39	33			
Calculada	444	326	268	157	97	63	43	31	24			
Error	5	10	6	15	9	2	5	8	9			



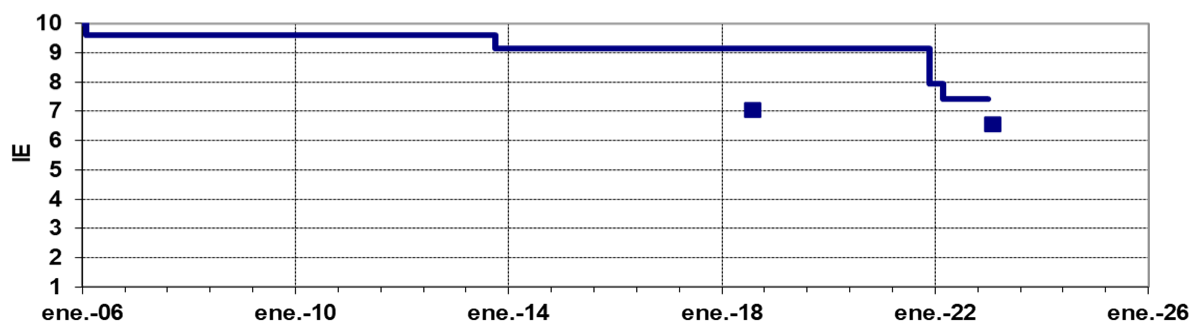
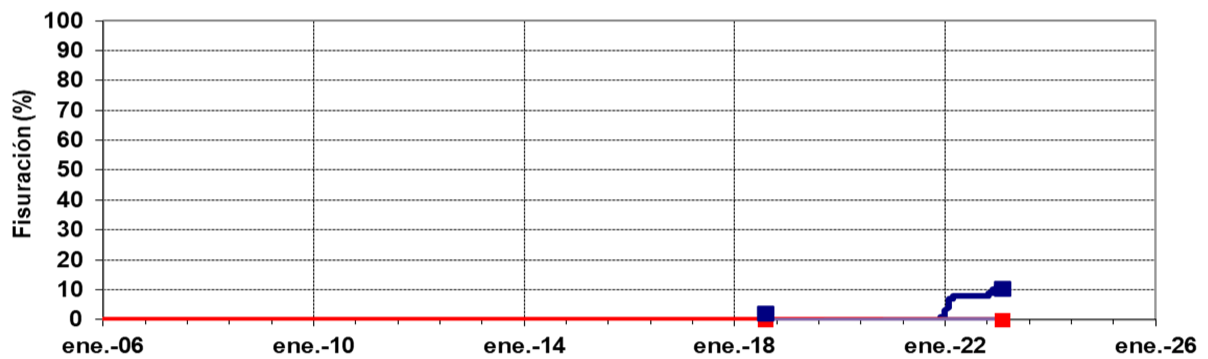
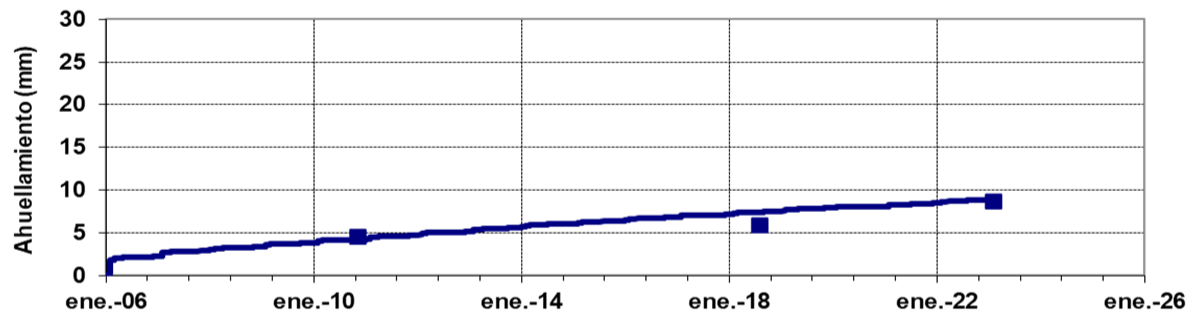
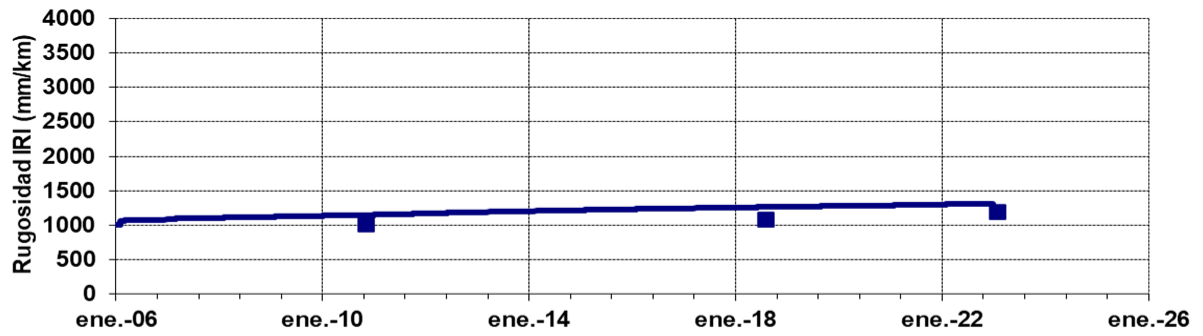
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2006	Mes Inicial	Enero	Años a Simular	17	Número de capas	5
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1000
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	236	1.73	0.40	Adherida	1	
3 Sub Base Granular		200	137	1.84	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			74		0.40	Adherida	1	

VARIABLES ASOCIADAS A LAS FALLAS

CAPA	Tipo de Análisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellamiento	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		249.56	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	91.30	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	91.30	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Sub Base Granular	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.440	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S9

1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

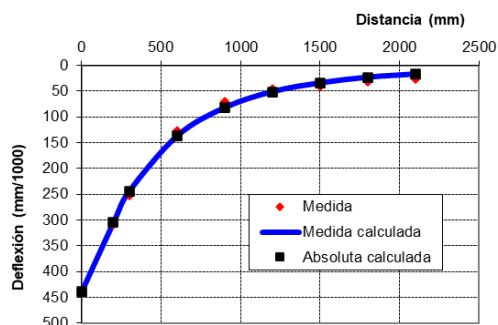
Recuperando resultados **Número de iteraciones 26, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Deformada (mm/1000) Error promedio 6.4

Distancia(mm)	0	200	300	600	900	1200	1500	1800	2100
Medida	437	308	251	127	72	47	39	31	26
Calculada	439	305	244	137	82	51	34	23	17
Error	2	3	7	10	10	4	5	8	9

Estructura	Tipo de Capa	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
	CAC D 19 CA30	170	995
	Base Granular	200	258
	Sub Base Granular	200	149
	Subrasante	1000	81
	Subrasante profunda		276



Radio de Curvatura (m)
Medido 155
Calculado 149

2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

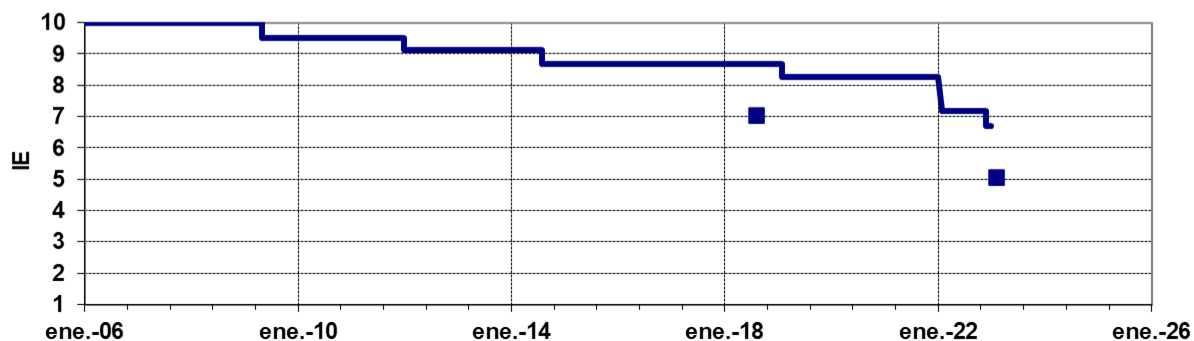
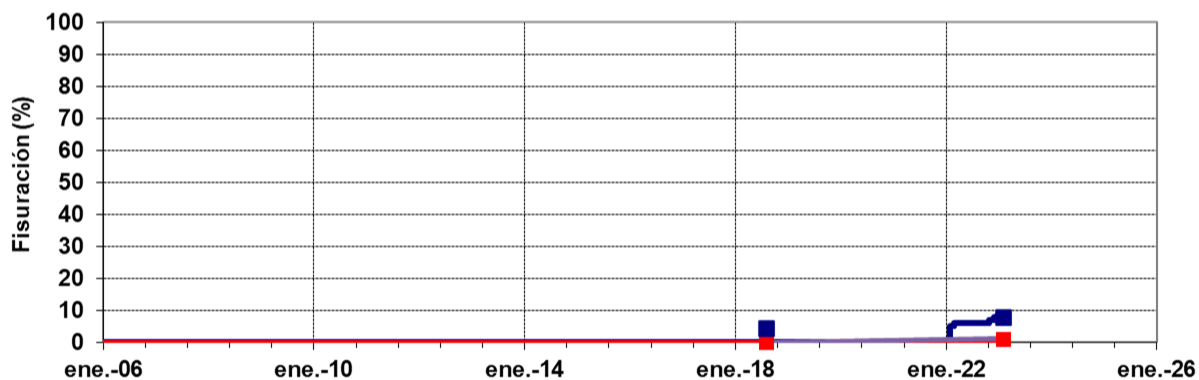
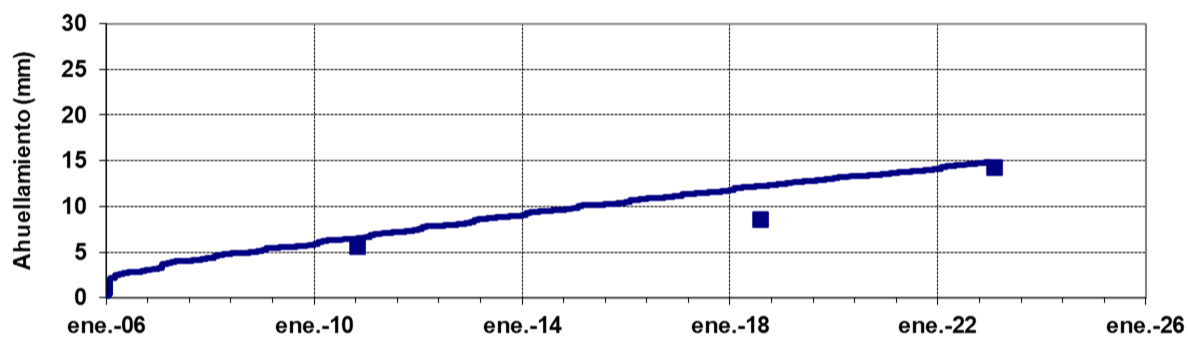
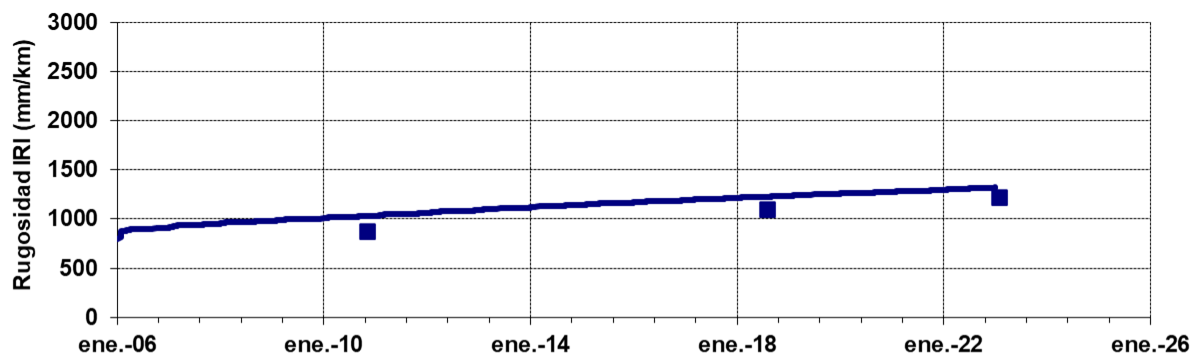
Estructura	Año inicial	Mes Inicial	Años a Simular	Número de capas
	2006	Enero	17	5

Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	800
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	258	1.73	0.40	Adherida	1	
3 Sub Base Granular		200	149	1.84	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			81		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		243.85	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.40	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.40	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.780	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Sub Base Granular	3							0.00	1	-1.780	0.00	1.000	0.440	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.780	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S11

1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados

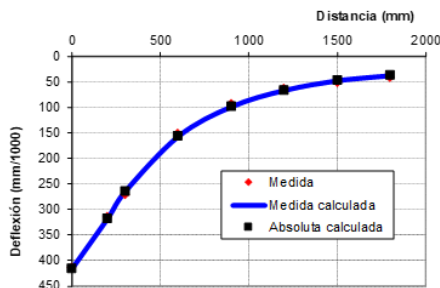
Número de iteraciones 28, Convergencia de módulos,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA FWD

Deformada (mm/1000)		Error promedio 3.8								Error promedio caso anterior 3.40				
Distancia(mm)	0	200	300	600	900	1200	1500	1800						
Medida	414	315	271	152	93	63	51	41						
Calculada	415	317	264	156	98	66	47	37						
Error	1	2	7	4	5	3	4	4						

Estructura	Tipo de Capa	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
	CAC D 19 CA30	170	1664
	Base Granular	190	227
	Suelo Seleccionado	190	108
	Subrasante	1000	94
	Subrasante profunda		167



Radio de Curvatura (m)
Medido 202
Calculado 204

2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

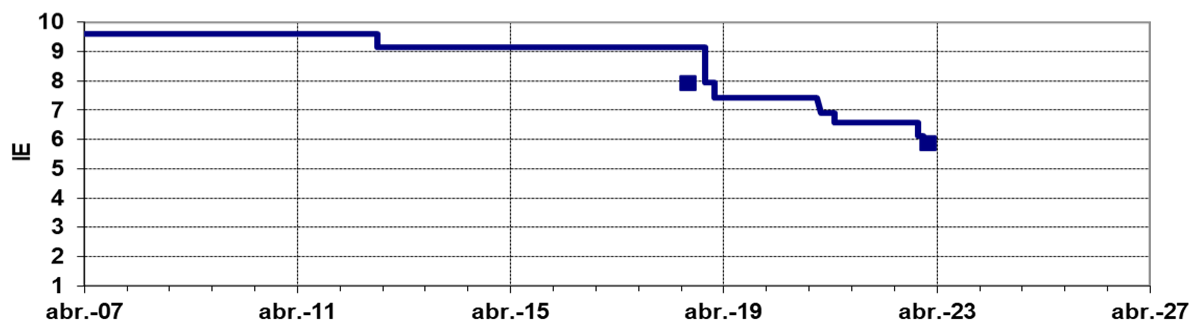
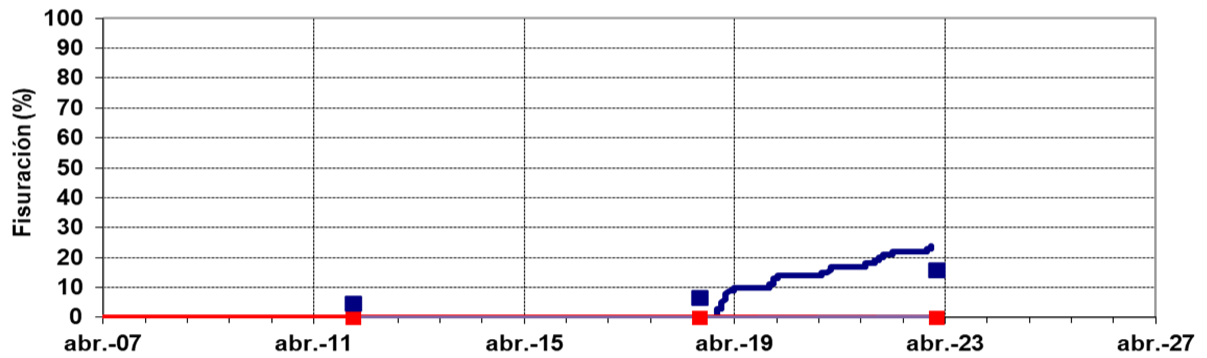
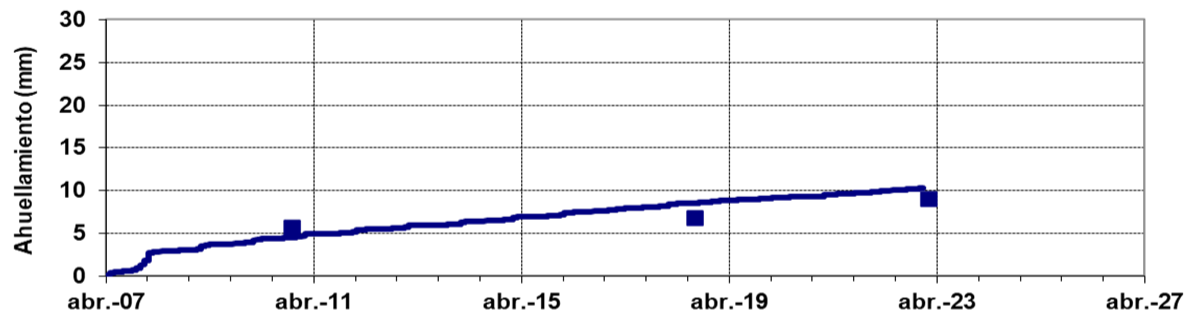
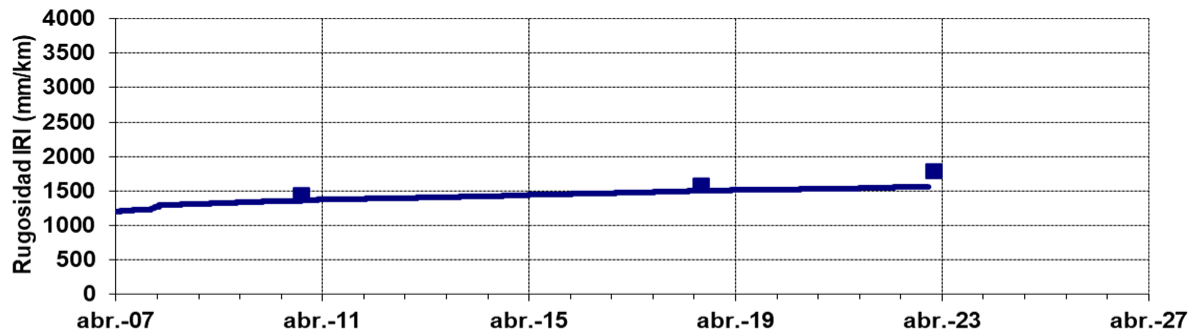
Estructura	Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	17	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1200
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		190	227	2.10	0.40	Adherida	1	
3 Suelo Seleccionado		190	108	1.12	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			94		0.40	Adherida	1	

Desarrollado por Laboratorio Vial MAE - Cs car H. Giovanon

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. fl	Eps elast e	Log Eps B	Log N #	Eps LogN I5		temp I6
MAC F-10 AM3	1	245.00	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.98	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	88.98	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Seleccionado	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.480	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-2.090	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



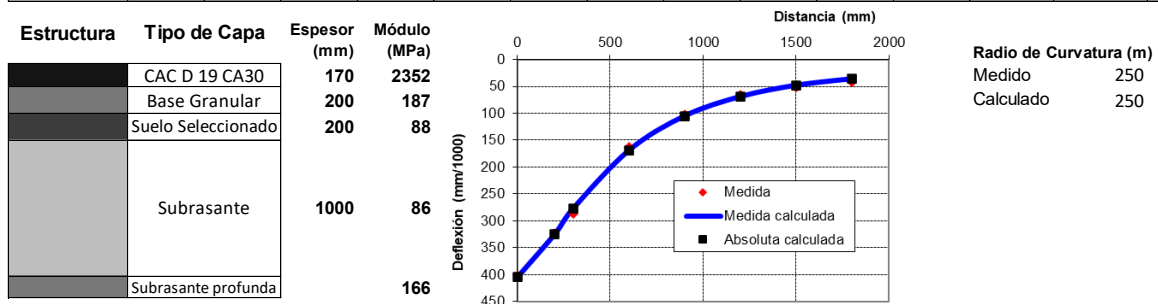
TRAMO DE CALIBRACIÓN S12

1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados Número de iteraciones 58, Convergencia de módulos,
Tipo de medición de la deformada ABSOLUTA FWD

Deformada (mm/1000)		Error promedio 4.3											
Distancia(mm)	0	200	300	600	900	1200	1500	1800					
Medida	403	323	287	162	102	66	51	42					
Calculada	405	325	277	169	105	69	49	37					
Error	2	2	10	7	3	3	2	5					



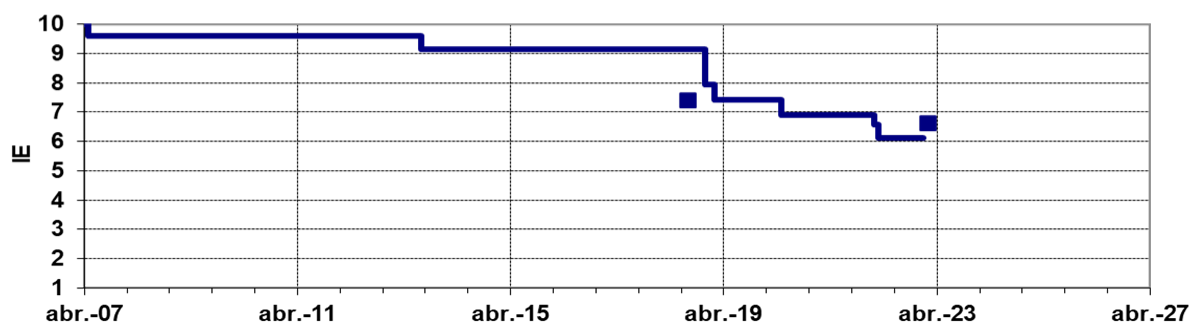
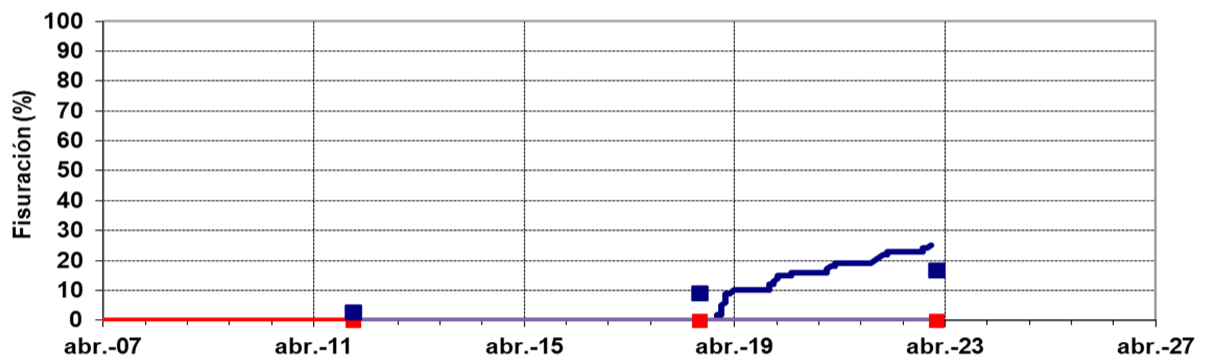
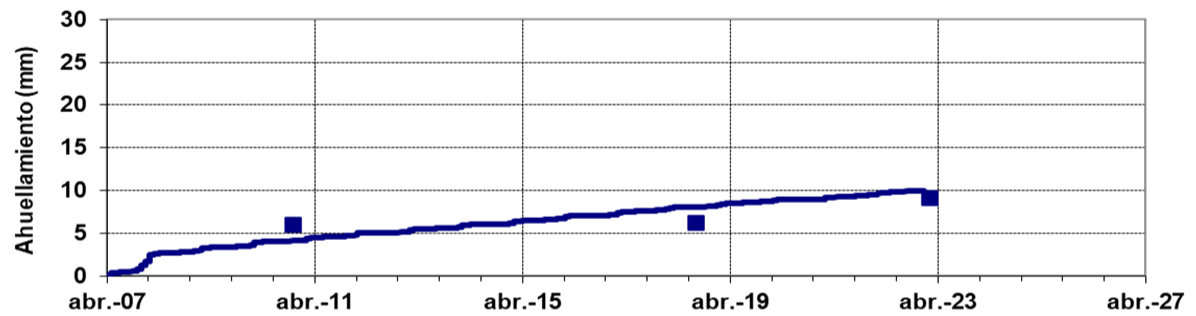
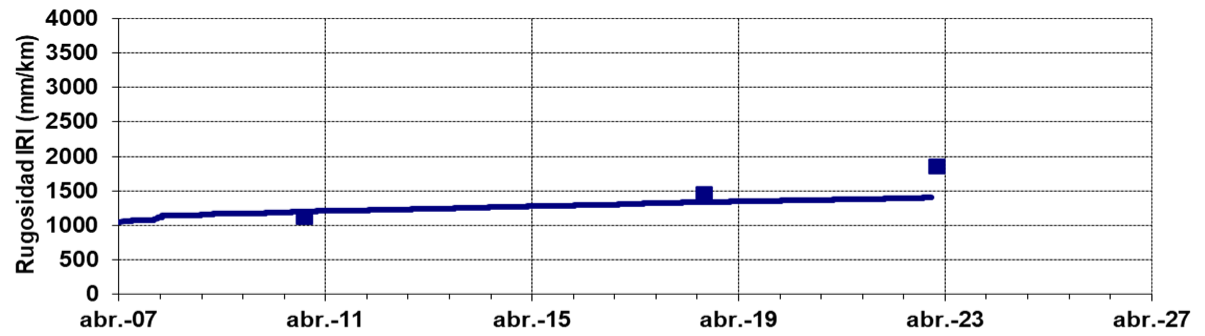
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año Inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	16	Número de capas	5
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1050
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	187	1.85	0.40	Adherida	1	
3 Suelo Seleccionado		200	88	1.91	0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			86		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		256.36	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	94.79	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	94.79	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Seleccionado	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.480	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-2.150	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S17

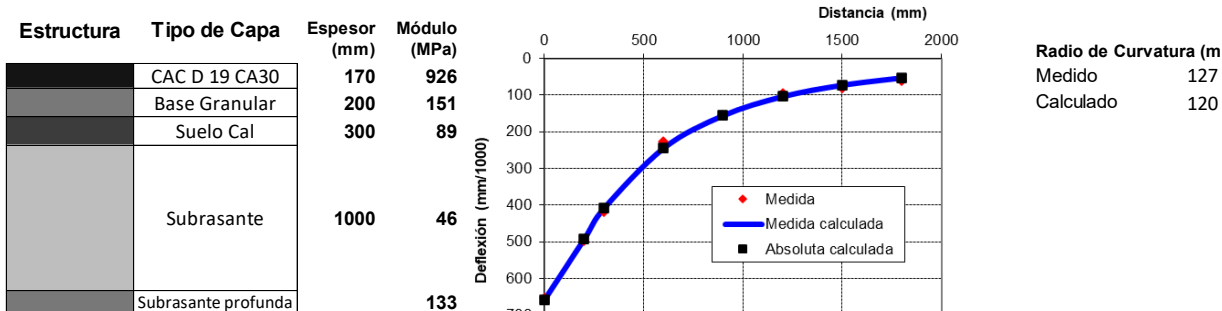
1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 25, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)								Error promedio 7.8			
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
Medida	654	497	418	226	154	96	80	61				
Calculada	658	492	408	244	155	103	72	52				
Error	4	5	10	18	1	7	8	9				



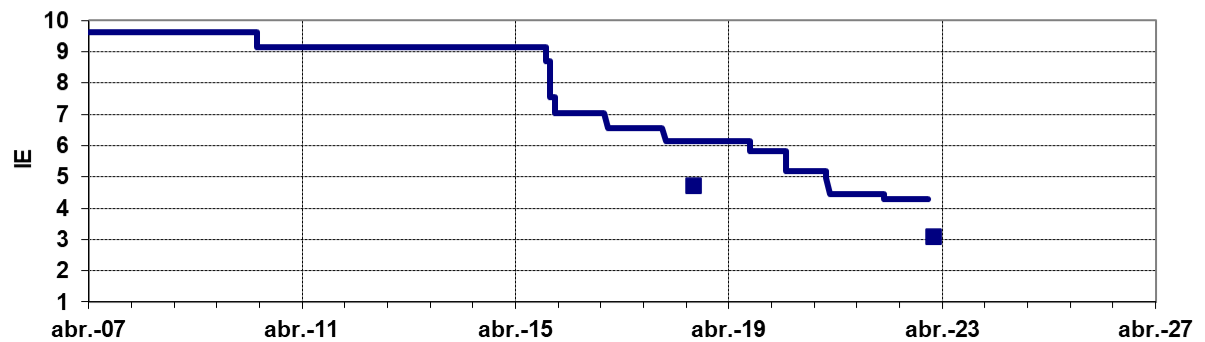
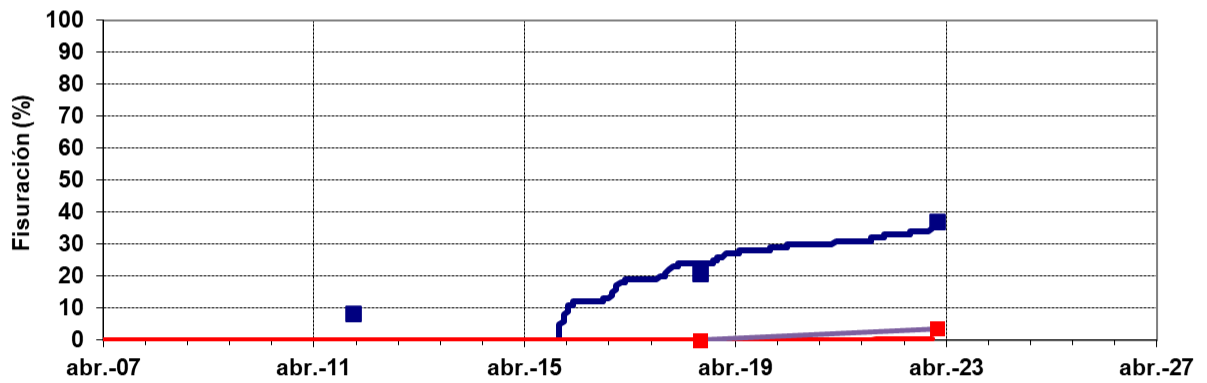
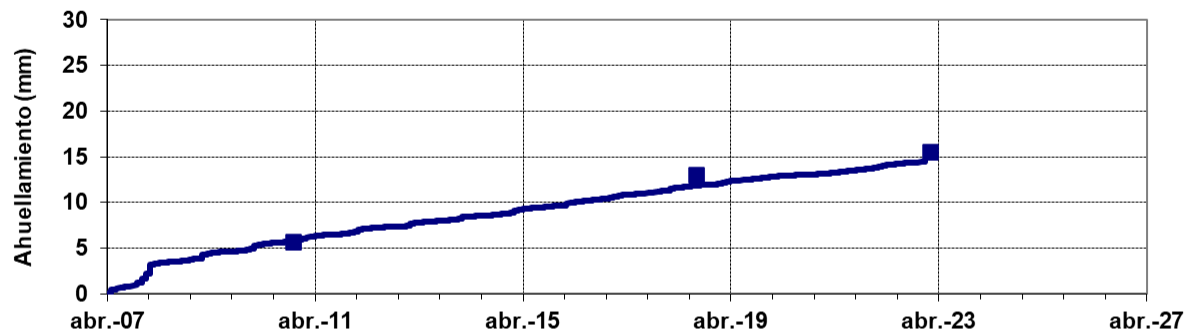
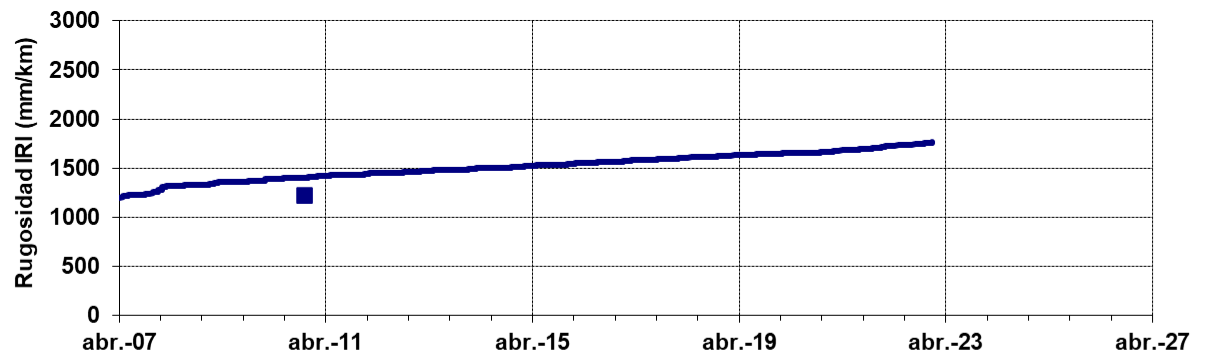
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	16	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1200
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	151		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	89		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	89		0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			46		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		256.36	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	94.79	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	94.79	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.960	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-1.960	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-1.960	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.960	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S19

1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados

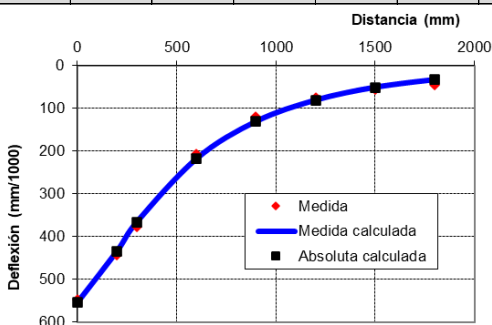
Número de iteraciones 45, Convergencia de módulos,

Tipo de medición de la deformada

ABSOLUTA FWD

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)								Error promedio 9.1			
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
Medida	547	443	377	207	119	76	56	45				
Calculada	555	434	366	218	131	81	51	33				
Error	8	9	11	11	12	5	5	12				

Estructura	Tipo de Capa	Espesor (mm)	Módulo (MPa)
	CAC D 19 CA30	170	1470
	Base Granular	200	150
	Suelo Cal	300	83
	Subrasante	1000	46
	Subrasante profunda		228



Radio de Curvatura (m)
Medido 192
Calculado 165

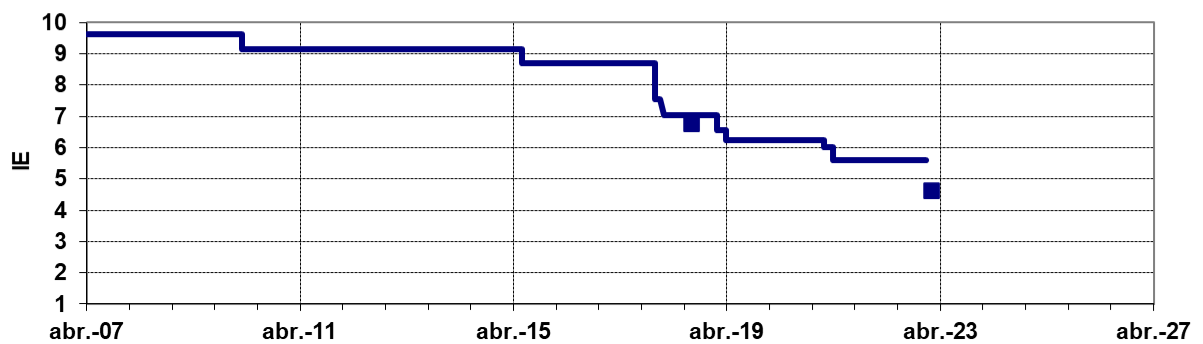
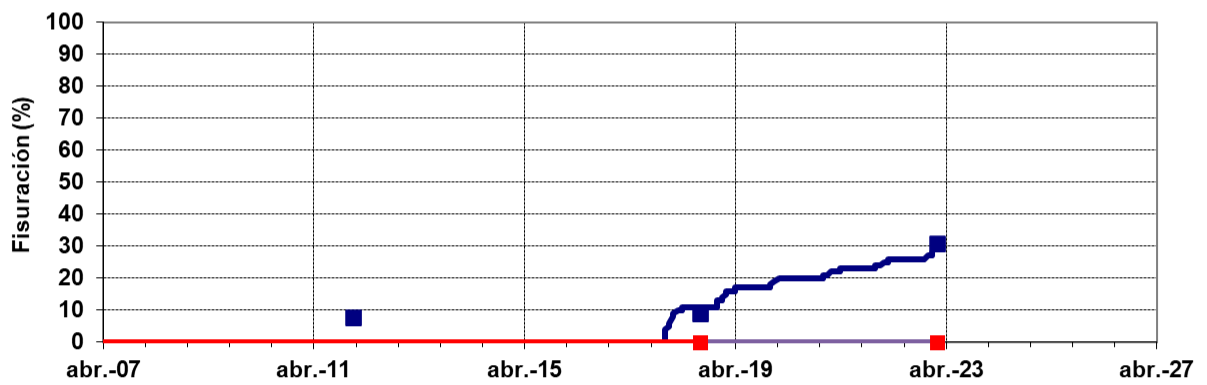
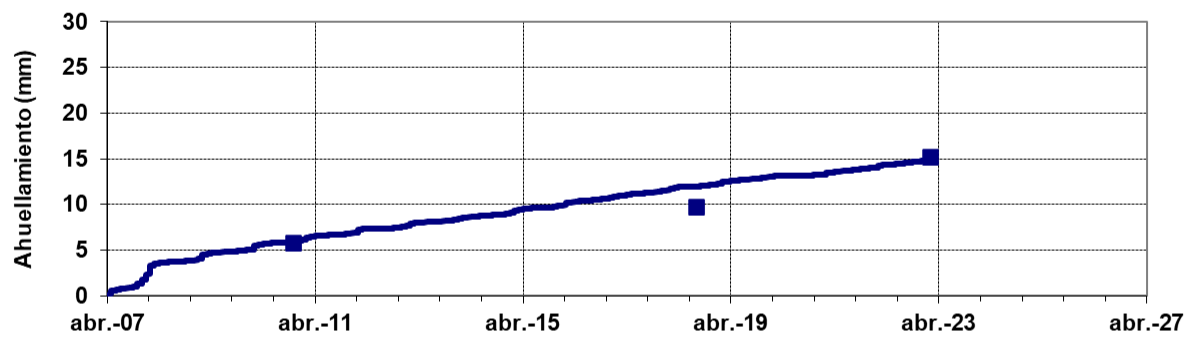
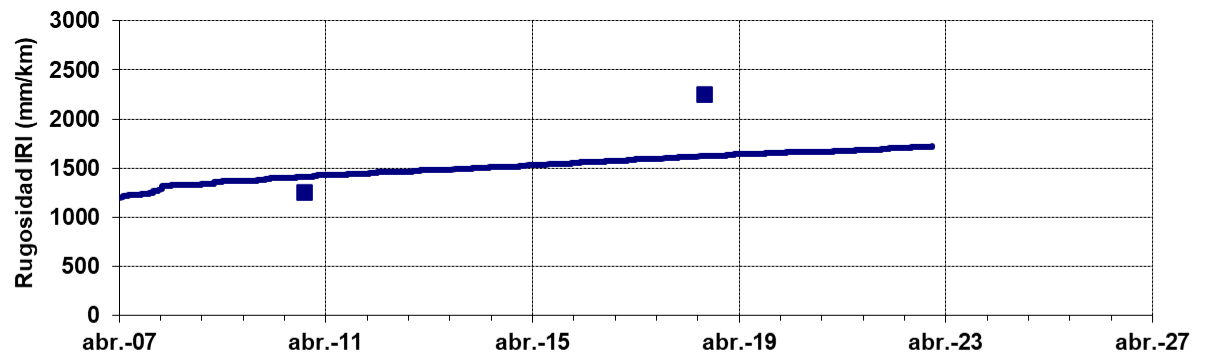
2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	16	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1200
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	150		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	83		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	83		0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			46		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		268.95	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	101.35	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	101.35	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-1.920	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-1.920	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-1.920	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-1.920	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo



TRAMO DE CALIBRACIÓN S21

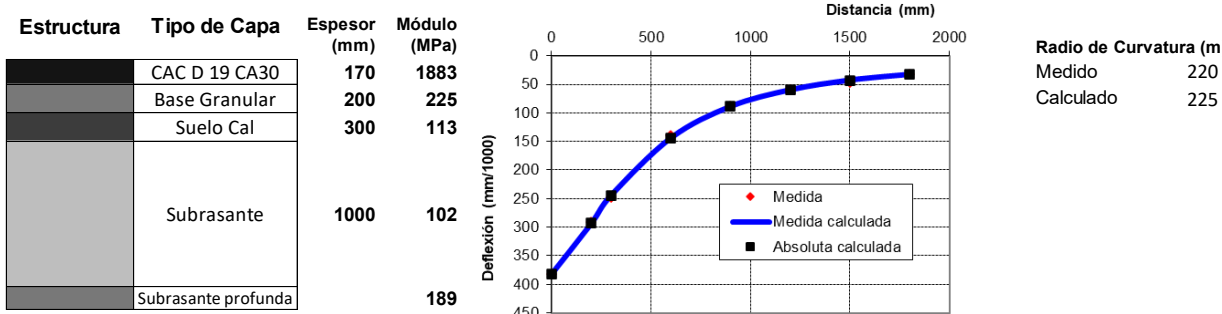
1) Resultados del Retroajuste Modular:

Resultados del Retroajuste modular

Recuperando resultados **Número de iteraciones 34, Convergencia de módulos,**

Tipo de medición de la deformada **ABSOLUTA FWD**

Distancia(mm)	Deformada (mm/1000)								Error promedio 1.8			
	0	200	300	600	900	1200	1500	1800				
Medida	382	291	248	140	89	59	46	33				
Calculada	382	293	244	144	89	60	43	33				
Error	0	2	4	4	0	1	3	0				



2) Parámetros de las Leyes de Falla de la Estructura:

Estructura	Año inicial	2007	Mes Inicial	Abril	Años a Simular	16	Número de capas	6
Tipo de Material	Tarea	Espesor (mm)	Módulo (MPa)	Relación (M/Minf.)	Poisson	Interfaz	Edad ejecución (meses)	IRI inicial (mm/km)
1 MAC F-10 AM3		30			0.35	Adherida	1	1000
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
1 CAC D 19 CA30		70			0.35	Adherida	1	
3 Base Granular		200	225		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	113		0.40	Adherida	1	
3 Suelo Cal		150	113		0.40	Adherida	1	
3 Subrasante			102		0.40	Adherida	1	

Variables asociadas a las Fallas

CAPA	Tipo de Analisis	Fisuración Inicio			Fisuración progreso			Daño medio fisuración	Ahuellamiento						Daño medio ahuellam	
		Eps6 Sig6	Alfa Eps Alfa Sig6	Alfa Mod	c	m	Coef. Ct		Tipo	Const. f1	Eps elast f2	Log Eps f3	Log N f4	Eps LogN f5		temp f6
MAC F-10 AM3		250.01	6.00	2.70	30.00	0	1.10	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0159	0.000
CAC D 19 CA30	1	91.53	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
CAC D 19 CA30	1	91.53	4.30	2.70	30.00	0	1.15	0.00	1	0.500	0.00	1.000	0.000	0.000	1.0297	0.000
Base Granular	3							0.00	1	-2.000	0.00	1.000	0.400	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-2.000	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Suelo Cal	3							0.00	1	-2.000	0.00	1.000	0.460	0.000	0.0000	0.000
Subrasante	3							0.00	1	-2.000	0.00	1.000	0.530	0.000	0.0000	0.000

3) Resultados del Modelo Ajustado y Evaluaciones de Campo

