

Determinación de Factores de Equivalencia de Carga a partir de la Respuesta Estructural de Firmes Flexibles

ANGEL MATEOS MORENO (*); MARK B. SNYDER (**)

RESUMEN El objetivo de este estudio ha sido la aplicación de un procedimiento mecánico-empírico para la determinación de Factores de Equivalencia de Carga para firmes flexibles. Dicha determinación requiere, en primer lugar, la aplicación de un modelo de respuesta estructural, y en segundo lugar la aplicación de ciertos criterios de deterioro (usualmente leyes de fatiga). Se realizó una serie de ensayos encaminados al estudio de la respuesta estructural de firmes flexibles en la pista de ensayo de firmes a escala real Mn/ROAD. Fueron utilizados diferentes vehículos, midiéndose la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los mismos; esta información se utilizó para la validación y calibración del modelo de respuesta estructural.

Posteriormente se aplicaron diferentes leyes de fatiga para la determinación mecánico-empírica de los Factores de Equivalencia de Carga. Los valores así obtenidos fueron finalmente comparados con los proporcionados por la guía AASHTO - 1993 para diseño de firmes.

LOAD EQUIVALENCY FACTORS FROM THE STRUCTURAL RESPONSE OF FLEXIBLE PAVEMENTS

ABSTRACT *The objective of this research has been the application of a mechanistic-empirical procedure for the determination of Load Equivalency Factors for flexible pavements. Such determination requires, as a first step, the application of a structural response model, and as a second step the application of certain deterioration criteria (usually fatigue laws).*

A series of tests was performed at Mn/ROAD, a full-scale pavement research facility, in order to study the structural response of flexible pavements. Different types of vehicles were used, and the horizontal strain at the bottom of the asphalt layer was measured; this information was used for the validation and calibration of the structural response model.

Then, different fatigue laws were applied for the mechanistic-empirical determination of the Load Equivalency Factors. These values were finally compared to the values provided by the AASHTO - 1993 guide for pavement design.

Palabras clave: Firmes flexibles; Factor de Equivalencia de Carga; Comportamiento estructural.

1. INTRODUCCIÓN

El método de dimensionamiento de firmes de la presente guía AASHTO⁽¹⁾ (de 1993) está basado en un Eje Estándar simple de 80 kN. Previamente al dimensionamiento, las cargas del tráfico deben ser convertidas a un Número Equivalente de Ejes Estándar. Esta conversión se realiza mediante los Factores de Equivalencia de Carga (LEF⁽²⁾), que representan el daño relativo producido por una configuración de carga específica con respecto al producido por el Eje Estándar. El Factor de Equivalencia de Carga, para un eje específico, se define como el número de repeticiones del Eje Estándar que producirían el mismo deterioro en el firme que una única aplicación del eje específico en cuestión.

Los LEF de la guía AASHTO-1993 están basados en los resultados empíricos del Ensayo de Carreteras AASHO, que se

realizó en Illinois a finales de los años cincuenta. Diversas deficiencias detectadas en este método, así como las nuevas demandas del tráfico y procedimientos constructivos, o los avances en el conocimiento de la respuesta estructural de firmes y sus mecanismos de deterioro, hacen necesario el desarrollo de un método basado en procedimientos mecánico-empíricos más que en empirismo. Es necesario un procedimiento que pueda considerar adecuadamente las condiciones climáticas, de tráfico y materiales de cada caso concreto, así como los diferentes mecanismos de daño que causan el deterioro del firme.

La guía AASHTO está siendo revisada, incorporando un nuevo método de diseño en el cual el deterioro del firme será estimado mediante un procedimiento mecánico-empírico. El estudio presentado en este artículo es el resultado de una investigación, enmarcada dentro de un proyecto patrocinado por la FHWA⁽³⁾, llevada a cabo en el Departamento de Ingeniería

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX.

(**) Ph.D., P.E. - Former Associate Professor -. Department of Civil Engineering. University of Minnesota.

(1) AASHTO: "American Association of State Highway and Transportation Officials".

(2) LEF: "Load Equivalency Factor".

(3) FHWA: "Federal Highway Administration".

Civil de la Universidad de Minnesota y enfocada al desarrollo de factores de equivalencia de carga mecánico-empíricos.

El desarrollo de factores de equivalencia de carga mecánico-empíricos requiere dos pasos principales:

1. Modelo de respuesta estructural: determinación de la respuesta del firme, en términos de tensiones y deformaciones, frente a las cargas del tráfico.
2. Modelo de deterioro: determinación, a partir de la respuesta estructural, del daño sufrido por el firme.

El primer paso requiere la aplicación de un modelo mecánico que permita reproducir adecuadamente la respuesta estructural del firme. Son numerosos los modelos disponibles actualmente en el mercado, considerando diferentes tipos de comportamiento, configuraciones de carga, etc. El segundo paso, el modelo de deterioro, es llevado a cabo usualmente mediante una ley de fatiga que relaciona cierta magnitud de respuesta estructural, normalmente deformaciones, con el número de repeticiones de carga permitidas hasta el agotamiento.

De los dos pasos principales en el desarrollo de factores de equivalencia de carga mecánico-empíricos, la investigación estuvo enfocada especialmente al primero de ellos, el modelo de respuesta estructural, llevándose a cabo una validación experimental con resultados medidos en la Pista Mn/ROAD.

Mn/ROAD es una pista de ensayo de firmes a escala real. Incluye numerosas secciones, que están instrumentadas con diferentes sensores para medir tensiones, deformaciones y deflexiones, así como la temperatura y otras variables ambientales. Se realizó una serie de ensayos con el fin de estudiar la respuesta estructural de diferentes secciones de firmes flexibles. Para ello se utilizaron diferentes vehículos, midiéndose la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los mismos; esta información se utilizaría para la validación y calibración del modelo de respuesta estructural.

El modelo estructural utilizado fue de tipo multicapa elástico lineal (programa BISAR), estableciéndose inicialmente los parámetros del mismo (módulos de elasticidad de

cada capa) a partir del cálculo inverso con deflectómetro de impacto (FWD⁽⁴⁾).

Una vez validado el modelo de respuesta estructural se utilizarían diferentes leyes de fatiga como segundo paso para la determinación mecánico-empírica de factores de equivalencia de carga. De los dos mecanismos de deterioro usualmente considerados en los métodos de diseño analítico de firmes (fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa y deformaciones permanentes provenientes de la explanada), este estudio está enfocado al primero de ellos, esto es, la fatiga de la mezcla bituminosa. El segundo mecanismo de deterioro (deformaciones permanentes) requiere más énfasis en las deformaciones verticales desarrolladas en la explanada bajo el paso de los vehículos, magnitud que no ha sido considerada en este estudio.

Por consiguiente, los factores de equivalencia de carga mecánico-empíricos se determinarían considerando un único mecanismo de deterioro, la fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa, por medio de leyes de fatiga.

Finalmente se compararían estos valores con los LEF proporcionados por la guía AASHTO-1993. En este punto se realizaría sólo una comparación (AASHTO frente a mecánico-empírico), pero no una validación experimental.

2. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA

La mayoría de los métodos empíricos consideran las cargas del tráfico en términos de un eje estándar; previamente al diseño del firme, el tráfico real debe ser transformado a un número equivalente de aplicaciones de dicho eje.

El eje estándar en el procedimiento AASHTO es un eje simple de 18 kip (80 kN). Según dicho procedimiento, el LEF de un eje tándem de 160 kN es 1.38; esto quiere decir que el paso de un eje tándem de 160 kN se considera, en términos de diseño estructural, equivalente al paso de 1.38 ejes estándar (Figura 1).

(4) FWD: "Falling Weight Deflectometer".

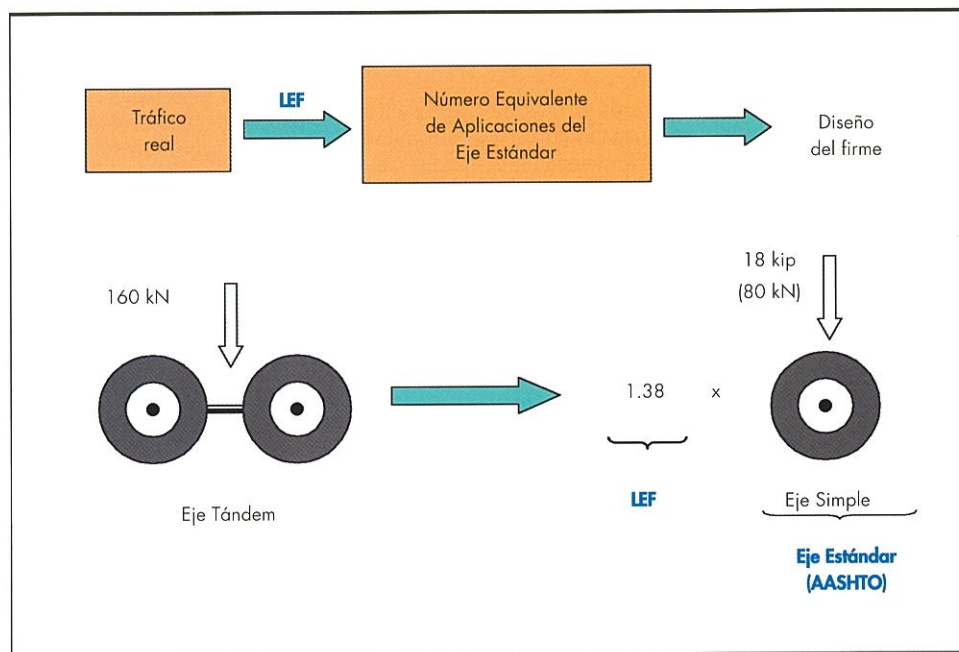


FIGURA 1. Factores de Equivalencia de Carga (LEF).

2.1. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA ~ PROCEDIMIENTO AASHTO

Los LEF del procedimiento AASHTO fueron obtenidos empíricamente a partir de los resultados del ensayo de carreteras AASHTO, llevado a cabo en Ottawa (Illinois) a finales de los años cincuenta (1958-1960). Se construyeron numerosos pavimentos, rígidos y flexibles, aplicando cargas de vehículos de 9 a 134 kN para ejes simples y de 107 a 214 kN para ejes tandem. El deterioro del pavimento fue cuantificado en términos de Servicio: un panel de evaluadores cuantificó el estado de cada sección con un índice que indicaba, de forma subjetiva, la calidad de la circulación. Esto se hizo asignando una nota (PSR⁽⁵⁾) de 0 a 5, correspondiendo 0-1 a muy malo y 4-5 a muy bueno. La pérdida de calidad de circulación, esto es, la bajada del índice de servicio PSR, fue correlacionada estadísticamente con el número de aplicaciones de carga así como con otros factores como el tipo de eje, el nivel de carga, la capacidad estructural, etc.; pero no se usaron modelos mecánicos.

Los factores de equivalencia de carga están tabulados en la guía AASHTO-1993 para ejes simple, tandem y tridem⁽⁶⁾, para un rango de cargas de 9 a 223 kN para ejes simples y de 9 a 401 kN para ejes tandem y tridem. Se consideran cuatro factores en la determinación de los LEF para firmes flexibles:

- Definición del eje: 1. Tipo de eje (simple, tandem o tridem)
2. Nivel de carga
- Definición del firme: 3. "Structural Number" (SN⁽⁷⁾)
- Servicio: 4. Nivel de servicio final
(en términos de PSI⁽⁸⁾)

Deficiencias del procedimiento AASHTO para la determinación de Factores de Equivalencia de Carga

Diferentes estudios apuntan ciertas deficiencias en el procedimiento AASHTO para la determinación de los LEF. Adicionalmente, la nuevas circunstancias desde la finalización del ensayo AASHTO, así como los avances en el conocimiento de los mecanismos de respuesta estructural y deterioro de los firmes, apuntan a una necesidad de revisión del citado procedimiento.

- En el ensayo AASHTO se consideró un número limitado de materiales y secciones de firme. Además, las cargas del tráfico y los procedimientos de construcción han cambiado desde entonces. Consecuentemente, la aplicación de los resultados obtenidos a las situaciones actuales supone una extrapolación significativa.
- Las condiciones climáticas no son consideradas adecuadamente, a pesar de que sus efectos sobre el comportamiento de un firme son muy significativos. Los resultados del ensayo AASHTO son extrapolados a con-

⁽⁵⁾ PSR: "Present serviceability rating".

⁽⁶⁾ En el ensayo AASHTO no se utilizaron ejes tridem. Los LEF para ejes tridem han sido incorporados en la guía AASHTO como resultado de investigaciones llevadas a cabo posteriormente.

⁽⁷⁾ SN: "Structural Number". La capacidad estructural de un firme flexible es considerada en el procedimiento AASHTO mediante este "número estructural". Representa un espesor equivalente de las capas estructurales del firme sobre la explanada. Cada capa contribuye a este número en proporción a su espesor y a un coeficiente de equivalencia de capa, que crece según la calidad estructural del material. Valores típicos de este coeficiente de equivalencia son en torno a 0.4 para mezclas bituminosas y alrededor de 0.10-0.15 para capas de bases granulares.

⁽⁸⁾ PSI: "Present Serviceability Index". Representa una estimación objetiva (a partir de medidas del deterioro del pavimento) del índice PSR.

diciones climáticas diferentes de aquellas para las que fue realizado.

- Los valores proporcionados por el procedimiento AASHTO están basados en el ajuste estadístico de los resultados del ensayo AASHTO; sin embargo, la dispersión de los resultados fue muy alta.
- Desde el desarrollo inicial de los LEF se han producido importantes avances en el conocimiento de los mecanismos de respuesta estructural y deterioro de firmes. La incorporación de este conocimiento requiere la utilización de un modelo basado en procedimientos mecánico-empíricos, no sólo en empirismo.
- Diferentes factores no incluidos en el procedimiento AASHTO pueden tener una influencia significativa en el comportamiento de un firme; tal es el caso de la velocidad de circulación, tipo de rueda, presión de inflado, etc.
- Un único número, el "Structural Number" (SN), caracteriza la estructura del firme. La forma en que cada capa contribuye a soportar las cargas del tráfico no se considera adecuadamente.
- El procedimiento AASHTO actual no permite una definición detallada de las características particulares de cada sección de firme concreta (estructurales, de fatiga, geométricas, etc.).
- El procedimiento AASHTO se presenta en una forma muy simple que permite realizar el dimensionamiento sin consideraciones de tipo estructural o de cómo se desarrollan los mecanismos que causan el deterioro de un firme. Sin embargo, el entendimiento de estos procesos es fundamental para la consecución de un diseño adecuado.

2.2. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA ~ MECÁNICO-EMPÍRICOS

La mayoría de los métodos analíticos de diseño de firmes son, en esencia, muy similares (Figura 2):

1. Modelo de respuesta estructural: multicapa elástico lineal.
2. Modelo de deterioro: leyes de fatiga y acumulación de daño mediante la hipótesis de Miner.

El problema de una carga circular aplicada sobre una sistema bicapa elástico lineal fue resuelto por Burmister en 1943. Con la aparición de los ordenadores su teoría pudo ser aplicada a sistemas de cualquier número de capas. En la actualidad hay numerosos programas comerciales que resuelven este problema. Algunos ejemplos son WESLEA (desarrollado por el "Army Corps of Engineers" estadounidense y modificado en la Universidad de Minnesota para su incorporación en el pro-

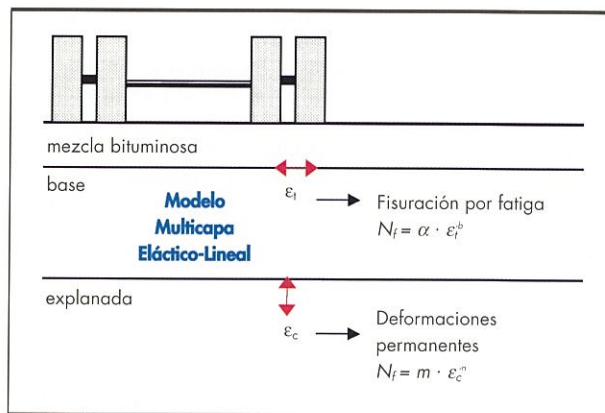


FIGURA 2. Diseño analítico de firmes.

grama de diseño ROADENT), BISAR (desarrollado por la Shell) o ELSYM5 (desarrollado en la Universidad de California, Berkeley). La mayoría de estos programas difieren en la interfaz para la entrada y salida de datos, siendo el núcleo del programa, el proceso matemático, similar en todos ellos.

La linealidad del sistema permite superponer los efectos de las cargas, con lo que esta solución puede ser aplicada a cualquier configuración de ejes (simple, tándem...) con tal de suponer que las cargas de los neumáticos se distribuyen sobre áreas circulares.

La resolución de un sistema multicapa elástico lineal sometido a una carga estática circular requiere la resolución de una ecuación diferencial biarmónica (Δ^2). Usando la transformada de Hankel, este problema se transforma en una ecuación más sencilla, que puede ser resuelta, obteniéndose la respuesta estructural mediante la transformada inversa de Hankel. La precisión obtenida con este proceso depende del número de puntos utilizados para dicha transformada, que requiere una integración numérica. En general, ésta es adecuada para el propósito para el que estos programas son usados; pueden considerarse fiables 4 ó 5 cifras significativas en la mayoría de las situaciones.

Una de las ventajas de este tipo de programas (multicapa elástico lineal) es que la caracterización de los materiales es muy simple: módulo elástico y coeficiente de Poisson. Además, aunque la resolución matemática de este problema es bastante compleja, el uso de los ordenadores hace de esta herramienta uno de los pilares básicos del diseño analítico de firmes, estando su uso cada vez más extendido.

Respecto al segundo paso fundamental de un proceso de diseño analítico, el modelo de deterioro, la mayoría de los métodos lo resuelven mediante la aplicación de leyes de fatiga. Una ley de fatiga es una relación matemática entre cierta magnitud de respuesta estructural y el número de repeticiones permitidas hasta el agotamiento. Normalmente se consideran sólo dos mecanismos de deterioro:

1. Fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa ~ considerada mediante la deformación horizontal de tracción en el fondo de la capa de mezcla bituminosa.
2. Acumulación de deformaciones permanentes ~ considerada mediante la deformación vertical de compresión en la coronación de la explanada.

Puesto que las propiedades de los materiales cambian con el paso del tiempo, las condiciones ambientales, etc. (por ejemplo, el módulo de la mezcla bituminosa disminuye con la temperatura) y puesto que el espectro de cargas de tráfico incluye diferentes tipos de ejes, niveles de carga, etc., el cálculo de la vida de servicio se realiza usualmente mediante la acumulación lineal del daño producido en cada fase y por cada tipo o configuración de carga. Esto se lleva a cabo mediante la aplicación de la hipótesis de Miner.

La hipótesis de Miner consiste, básicamente, en que cada aplicación de carga "consume" una fracción de la vida del firme igual a la inversa del número de repeticiones permitidas para dicha carga. Por ejemplo, si consideramos "I" tipos de ejes y "J" períodos temporales, el daño acumulado sería:

$$\text{Daño} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{n_{ij}}{N_{ij}}$$

siendo, n_{ij} número de repeticiones del eje i durante el período j

N_{ij} número de repeticiones del eje i que agotarían el firme con las condiciones estructurales del período j

El firme se considera agotado cuando este "daño" supere el valor 1.

La determinación mecánico-empírica del factor de equivalencia de carga para un eje específico es inmediata una vez supuesto un modelo de respuesta estructural y unas leyes de fatiga. Basta con calcular el número de repeticiones permitidas hasta el fallo para el eje en cuestión con el número de repeticiones permitidas para el Eje Estándar.

Este proceso de determinación de la vida de servicio de un firme, mediante un modelo multicapa elástico lineal y la aplicación de leyes de fatiga, conlleva toda una serie de simplificaciones, desde la modelización de las cargas de los vehículos hasta la consideración del daño sobre el firme. Sin tratar de ser exhaustivos, sino más bien tratando de dar una visión general de los muchos puntos en que la realidad se simplifica para poder abordar el problema, se podrían citar los siguientes aspectos:

- Para la explanada y las capas granulares del firme se supone un material continuo, homogéneo, isótropo, elástico y lineal. Cabe citar al respecto la no-linealidad (influencia del estado tensional) de los suelos, su naturaleza granular (no continua), o la anisotropía (debida a los procesos de construcción o al efecto de las cargas del tráfico).
- Respecto a la mezcla bituminosa, es de especial importancia su naturaleza viscoelástica. También se han descrito efectos de no linealidad y diferente comportamiento en tracción que en compresión.
- El análisis estructural se simplifica suponiendo un problema estático, si bien la naturaleza del problema es dinámica. Además se supone una extensión horizontal indefinida de las capas, se asimilan las cargas de los neumáticos a cargas uniformemente repartidas sobre superficies circulares, etc.
- El mecanismo de deterioro se simplifica también de forma significativa. El proceso real por el que el daño en un firme se produce y evoluciona es mucho más complejo que una simple ley de fatiga. La fisuración por fatiga de la mezcla, por ejemplo, se inicia en el fondo de la capa de mezcla bituminosa, propagándose hacia la superficie, repercutiendo además sobre el comportamiento estructural del firme y causando una redistribución de tensiones que no es considerada en estos modelos simplificados.

Cada uno de estos aspectos, así como otros tantos que podrían haberse citado, requeriría un estudio y consideración especiales. Hay numerosas aplicaciones que permiten abordarlos, algunas veces de forma simplificada.

Por ejemplo, la no-linealidad de suelos puede ser considerada con modelos de elementos finitos, si bien existen aplicaciones de tipo multicapa elástico lineal que la abordan de forma aproximada (en el programa KENLAYER se adopta un único punto como representativo de cada capa y se resuelve el problema en una serie de iteraciones haciendo depender el módulo de la capa del estado tensional). Algo parecido puede decirse de la viscosidad de la mezcla bituminosa (puede modelizarse mediante elementos finitos, si bien hay programas, como KENLAYER, que la abordan de forma simplificada).

La naturaleza granular del suelo puede ser estudiada mediante el método de los elementos discretos.

La anisotropía es incorporada en diferentes programas de tipo multicapa elástico lineal (un ejemplo de ello es el programa CIRCLY).

También existen modelos más complejos de deterioro, siendo de especial interés los modelos de iniciación y propagación de fisuras así como diversos modelos para la determinación de deformaciones permanentes (un ejemplo de estos últimos es el que incluye el programa VESYS; se determina la contribución de cada capa a la deformación permanente total suponiendo un porcentaje de la deformación que permanece sin recuperar tras el paso de un vehículo). Algunos modelos incorporan aplicaciones bastante ingeniosas, como la incluida en el programa MMOPP para simular la evolución de la irregularidad longitudinal.

La naturaleza estocástica de las propiedades del firme también es considerada en algunos programas (un ejemplo interesante es ROADENT).

Como conclusión final, puede decirse que existen numerosos modelos alternativos que permiten abordar los diferentes aspectos no resueltos por el modelo multicapa elástico lineal y las leyes de fatiga utilizados habitualmente. Sin embargo, a la hora de su aplicación, surgen dos problemas fundamentales: por un lado, ¿hasta qué punto el nuevo modelo reproduce adecuadamente el comportamiento real del firme? y por otro lado, el problema de la determinación de los parámetros del modelo. Fijar los parámetros de modelos complejos es enormemente difícil con la experiencia acumulada hasta el momento. Así, estas aplicaciones más complejas son utilizadas fundamentalmente en el campo de la investigación, o para explicar ciertos fenómenos que se observan en la realidad, pero en la actualidad no están incorporadas en la práctica habitual del diseño analítico de firmes.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

La base de la validación experimental del modelo de respuesta estructural se estableció sobre el estudio de la deformación horizontal (longitudinal y transversal) medida en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los vehículos de ensayo. Los datos experimentales provinieron de secciones de firme instrumentadas de la pista de ensayo Mn/ROAD.

PROYECTO Mn/ROAD

El Proyecto Mn/ROAD es una Pista de Ensayo de Firmes a escala real. Fue construida en 1994 y está situada al norte de Minneapolis. Depende del Departamento de Transporte de Minnesota, estando involucradas en el proyecto otras organizaciones como la Universidad de Minnesota, la "Federal Highway Administration" o la corporación 3M.

Mn/ROAD (Figura 3) dispone de dos tramos de ensayo: una pista principal ("main line") y una pista de bajo volumen ("low volume loop"). La pista principal, de 9 km de longitud, está situada en paralelo a la autovía inter-estatal 94, de forma que el tráfico real de dicha autovía circula normalmente por esta pista, si bien puede desviarse por un carril alternativo cuando se realizan las operaciones periódicas de auscultación, ensayos, etc. La pista de bajo volumen es un circuito cerrado, de 4 km de longitud, por el que circulan continuamente vehículos conducidos manualmente con el objetivo de simular las condiciones del tráfico en carreteras de bajo volumen.

Mn/ROAD dispone de más de 40 secciones de firme diferentes, incluyendo tanto flexibles como de hormigón, y cubriendo una amplia gama de materiales y condiciones estructurales. Cada sección tiene una longitud de 150 m, estando instrumentadas con sensores para medir las diferentes magnitudes de respuesta estructural (deformaciones, deflexiones, presión vertical, etc.) así como las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.).

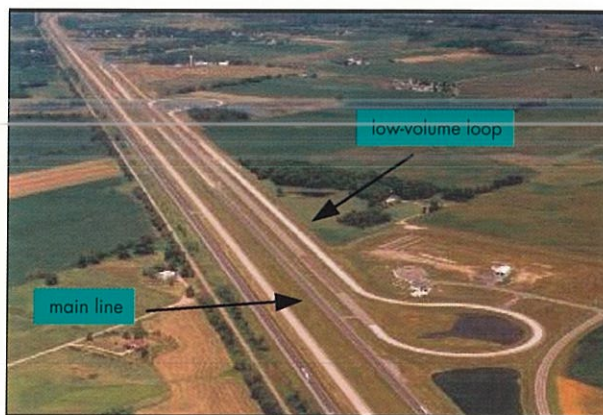


FIGURA 3. Pista de Ensayo de Firmes Mn/ROAD.

SECCIONES DE FIRME

Para este estudio se seleccionaron cuatro secciones (Figura 8). Dos de ellas (Secciones 16 y 19) de alta capacidad estructural y otras dos (Secciones 26 y 30) de baja capacidad estructural. Las primeras estaban en la pista principal y las segundas en la pista de bajo volumen.

ENSAYOS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL

Durante la primavera de 1999 se realizó una serie de ensayos encaminados al estudio de la respuesta estructural frente a vehículos reales en movimiento. Se utilizaron diferentes vehículos, pasando a diferentes velocidades, lo que permitió estudiar el efecto de diferentes factores:

Tipo de eje:	simple / tándem / trídem
Nivel de carga:	45 - 58 kN para el eje simple 107 - 205 kN para el eje tándem 111 - 249 kN para el eje trídem
Velocidad:	valor normal: 48 km/h (30 mph) valores alternativos: 8 / 24 / 97 km/h
Presión de inflado de los neumáticos:	valor normal: 0.76 MPa valores alternativos: 0.62 / 0.90 MPa

* La temperatura de la mezcla bituminosa variaba de unos ensayos a otros, oscilando entre 5 y 25 °C.

Se consideraron un total de 22 "Ensayos" en el estudio. Cada Ensayo consistía en una determinada configuración del vehículo (cargas por eje y presión de inflado de los neumáticos) pasando a una determinada velocidad - por ejemplo, el Ensayo 3 es el indicado en la Figura 4.

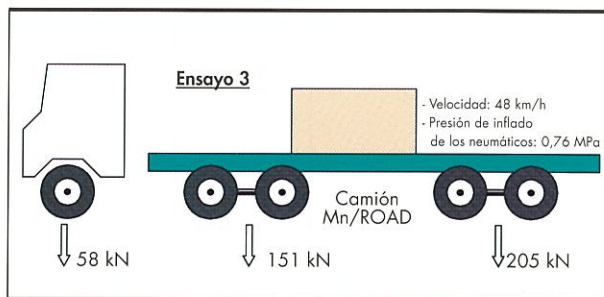


FIGURA 4. Ejemplo de Ensayo.

Los vehículos de ensayo eran conducidos manualmente por operarios; se realizaron 5 "Pases" consecutivos por cada Ensayo, con el fin de obtener la respuesta para las diferentes posiciones transversales. Se pudo determinar la posición transversal del vehículo gracias a una cámara sujeta a uno de sus ejes y a una regla que, colocada sobre el pavimento en cada sección, hacía de referencia externa (Figura 5).

Los sensores para la medida de la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa (tanto longitudinal como transversal) estaban situados en una banda de

unos 600 mm de anchura: 3 sensores separados unos 300 mm, tal como puede observarse en la Figura 5.

La temperatura de la mezcla se midió por medio de termopares situados a distintas profundidades. El valor considerado en el estudio fue la media a través de la capa de mezcla bituminosa.

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS MATERIALES

El ensayo básico para la caracterización estructural de los materiales de las secciones de firme estudiadas fue el de deflectó-

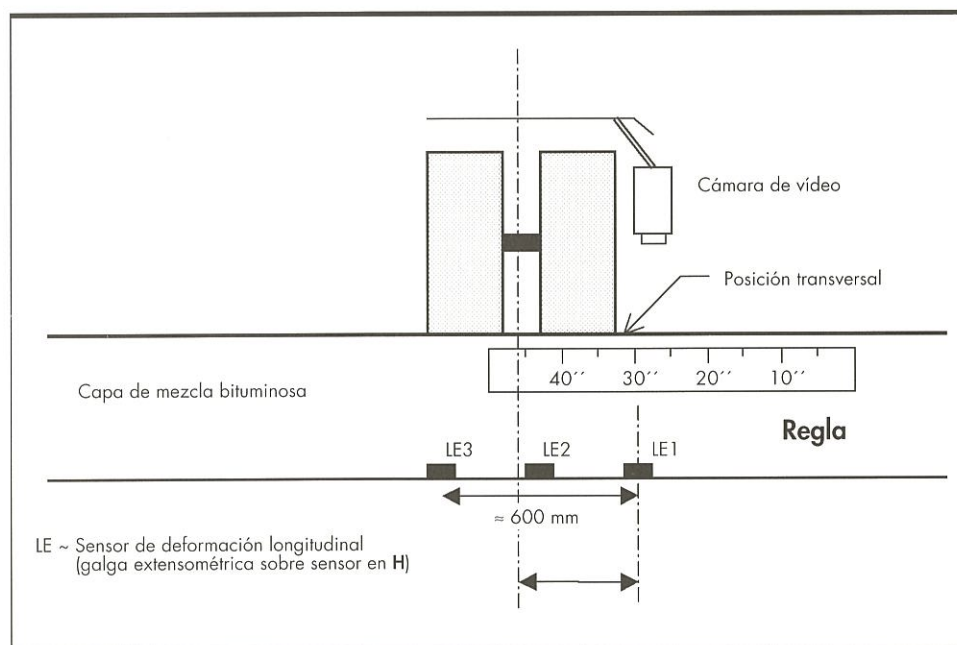


FIGURA 5. Determinación de la posición transversal.

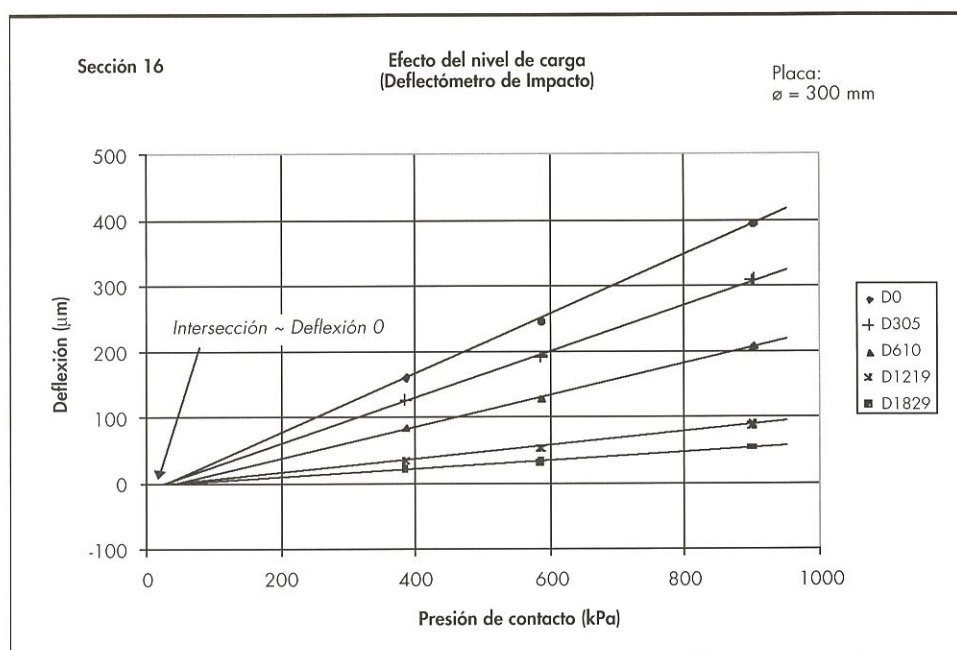


FIGURA 6. Efecto del nivel de carga - Ensayo FWD.

metro de impacto. El cálculo inverso a partir de los datos registrados en este ensayo dio una estimación inicial de los módulos de los materiales (modelo FWD). Cada sección fue ensayada en varios puntos, aplicando 9 golpes a tres niveles de carga:

- Pista principal:
 - 3 golpes a 400 kPa
 - 3 golpes a 600 kPa
 - 3 golpes a 900 kPa
- Pista de bajo volumen:
 - 3 golpes a 300 kPa
 - 3 golpes a 500 kPa
 - 3 golpes a 600 kPa
- * Placa de ensayo: ϕ 300 mm
- * Sensores de deflexión: 0 / 203 / 305 / 457 / 610 / 914 / 1219 / 1524 / 1829 mm

También se disponía de ensayos de laboratorio para el módulo de la mezcla bituminosa (ensayos de "Módulo elástico"⁽⁹⁾ y "Módulo dinámico"⁽¹⁰⁾).

PROGRAMAS DE CÁLCULO

Se utilizaron tres programas específicos en el estudio:

- BISAR (desarrollado por la Shell): es un programa de cálculo estructural, de tipo multicapa elástico lineal.
- EVERCALC (desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de Washington): es un programa de cálculo inverso de tipo multicapa elástico lineal.
- CIMA (desarrollado por el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX): es un programa de cálculo inverso de tipo multicapa elástico lineal; su particularidad reside en que puede realizarse el cálculo inverso no sólo a partir de deflexiones sino también a partir de cualquier otra magnitud de respuesta estructural, por ejemplo, deformaciones en la mezcla bituminosa.

⁽⁹⁾ ASTM D4123-82 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures".

⁽¹⁰⁾ ASTM D3497-79 "Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures".

4. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

4.1. MODELO FWD

Se realizó una serie de ensayos de deflectómetro de impacto con el fin de caracterizar estructuralmente los materiales de las secciones de firme estudiadas. Fueron llevados a cabo durante los mismos días de la primavera de 1999 en que se realizaron los ensayos de repuesta estructural frente a vehículos en movimiento, por lo que las propiedades de los materiales obtenidas pueden considerarse representativas de ese período estacional.

Como antes se indicó, se aplicaron nueve golpes a tres niveles de carga diferentes. Inicialmente se realizó un estudio con el fin de determinar el efecto del nivel de carga. La conclusión, para las cuatro secciones, fue que las deflexiones medidas eran directamente proporcionales al nivel de carga aplicado por el deflectómetro; esto es, que la repuesta del firme, en términos de deflexiones, era lineal (véase un ejemplo en la Figura 6). Así, sólo se utilizó uno de los golpes (el noveno) para realizar el cálculo inverso; los ocho golpes restantes hubieran dado resultados similares.

El cálculo inverso⁽¹¹⁾ se realizó con el programa EVERCALC, que utiliza un modelo estructural de tipo multicapa elástico lineal. Fue posible determinar el módulo de la mezcla bituminosa para distintas temperaturas, puesto que se realizaron ensayos a diferentes horas del día (véase un ejemplo en la Figura 7).

⁽¹¹⁾ El cálculo inverso es un proceso en el que los parámetros de un modelo estructural se determinan a partir de la respuesta medida frente a una carga conocida. El proceso es conceptualmente sencillo: se adopta un modelo de respuesta estructural (en la práctica multicapa lineal elástico, como BISAR) y se realiza una primera estimación de los módulos de elasticidad de las capas. El cuenco de deflexiones calculado se compara con el medido, y si no son lo suficientemente parecidos, los módulos se reajustan. Este proceso se repite hasta que ambos cuencos, teórico y medido, son lo suficientemente parecidos.

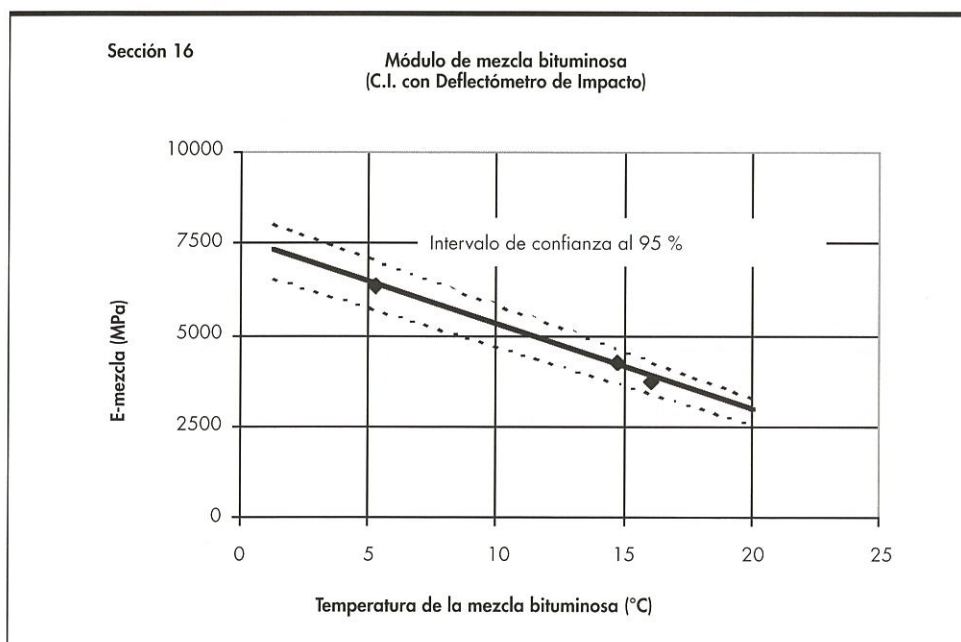


FIGURA 7. Módulo de la mezcla bituminosa - Ensayo FWD.

Se incluyó una capa rígida bajo la explanada. En este caso no había una capa rígida propiamente dicha, sin embargo, el nivel freático estaba cercano a la superficie. El efecto del nivel freático cercano a la superficie ha sido descrito como similar al de una capa rígida; se denomina “capa rígida aparente”.

El “modelo FWD” (Figura 8) es por tanto un modelo de tipo multicapa elástico lineal en el que los módulos de elasticidad de las capas se han obtenido mediante cálculo inverso a partir del ensayo de deflectómetro de impacto.

4.2. MÓDULO APARENTE DE LA MEZCLA BITUMINOSA

La mezcla bituminosa es un material con un marcado comportamiento viscoelástico. Su rigidez aumenta significativamente con la velocidad de la carga.

El modelo estructural base del estudio (“modelo FWD”) fue multicapa elástico lineal, en el que los módulos de elasticidad de las capas fueron fijados mediante cálculo inverso (C.I.) a partir del ensayo de deflectómetro de impacto. El deflectómetro de impacto aplica sobre el pavimento un pulso de carga de corta duración (30 a 50 ms son valores típicos); el módulo obtenido en el C.I. para la mezcla será representativo, por consiguiente, del contenido frecuencial de dicho pulso. Este módulo no tiene porqué coincidir con el módulo frente a un vehículo en movimiento, puesto que la naturaleza dinámica de ambas cargas es diferente.

Así, se determinó el “módulo aparente” de la mezcla bituminosa frente a vehículos en movimiento. La determinación se hizo experimentalmente, a partir de la deformación me-

didada en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los vehículos. Para ello se partió del “modelo FWD”, dejando fijos los módulos de las capas de base y la explanada, y reajustando el módulo de la capa de mezcla bituminosa para ajustar las deformaciones medidas (programa CIMA). El “módulo aparente” se calculó para ambas deformaciones horizontales (longitudinal y transversal) independientemente. En la Figura 9 puede verse un ejemplo de su determinación considerando la deformación transversal.

La determinación de este “módulo aparente” está basada en la suposición de que la diferencia entre la respuesta del firme frente a la carga de un deflectómetro de impacto y frente a la carga de vehículos en movimiento es debida fundamentalmente a la naturaleza viscoelástica de la mezcla bituminosa. No se están considerando los efectos de las capas granulares subyacentes, cuyos módulos se mantienen fijos (valores obtenidos en el C.I. con FWD). Posteriormente se comprobaría que esta suposición estaba de acuerdo con el comportamiento observado.

4.3. ESTUDIO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL FRENTE A LOS VEHÍCULOS DE ENSAYO

a. Efecto del nivel de carga

En los ensayos se establecieron tres niveles de carga para ejes tándem: 107 / 151 / 205 kN. Esto permitió estudiar los efectos de no-linealidad.

El mismo comportamiento fue observado en las cuatro secciones estudiadas, tanto para la deformación longitudinal como para la transversal: la respuesta del firme era lineal.

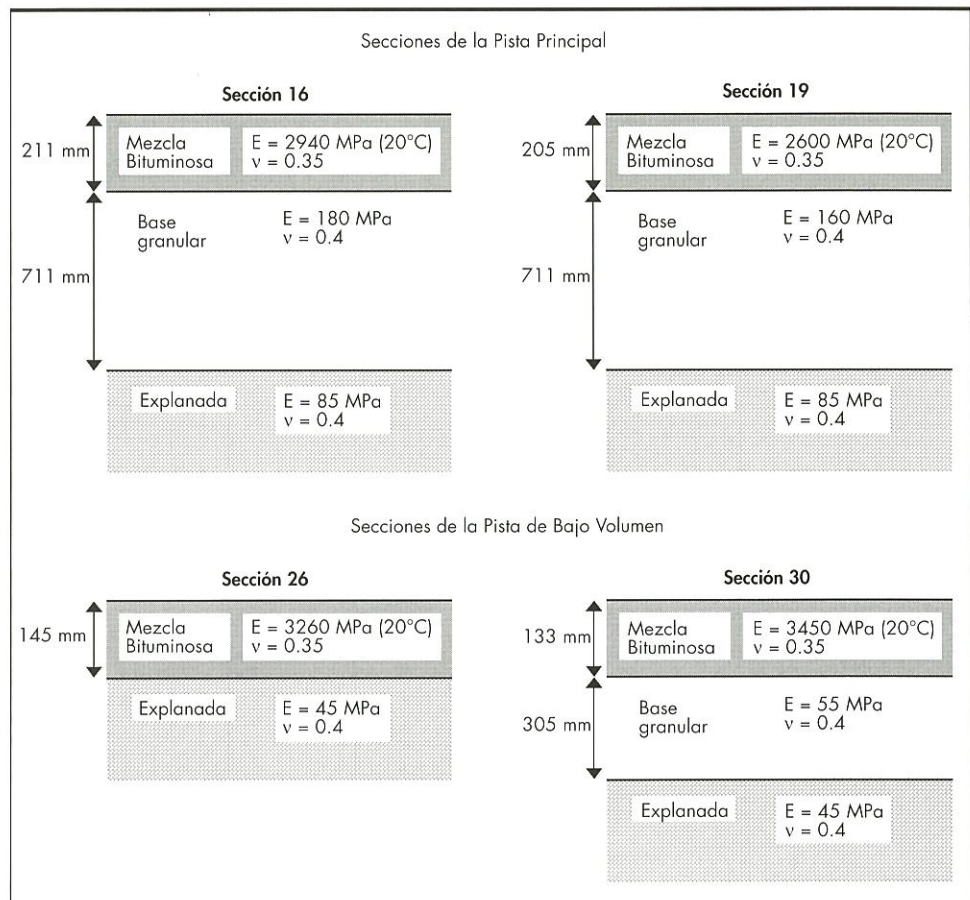


FIGURA 8. Modelo FWD.

Puede verse un ejemplo en la Figura 10; al dividir la deformación medida por la carga aplicada se obtienen valores similares para los tres niveles de carga.

b. Efecto del tipo de eje

En los ensayos se utilizaron ejes simple, tándem y tridem.

La comparación entre diferentes tipos de eje se llevó a cabo mediante el concepto de módulo aparente de la mezcla bituminosa. Éste resultó ser independiente del tipo de eje (véase un ejemplo en la Figura 11). Esto significa que el modelo multicapa elástico lineal puede ser utilizado para reproducir la máxima deformación en el fondo de la capa de

mezcla bituminosa para diferentes tipos de eje sin necesidad de reajustar los parámetros del modelo. Este resultado era previsible, de acuerdo con el principio de superposición, dada la linealidad observada en el punto anterior así como en el ensayo de deflectómetro de impacto.

c. Efecto de la velocidad

La velocidad normal de ensayo fue 48 km/h (30 mph). Se realizaron ensayos a otras velocidades (8 / 24 / 97 km/h) con el fin de estudiar este factor.

Se observó el mismo comportamiento en las cuatro secciones estudiadas: la deformación (tanto longitudinal como

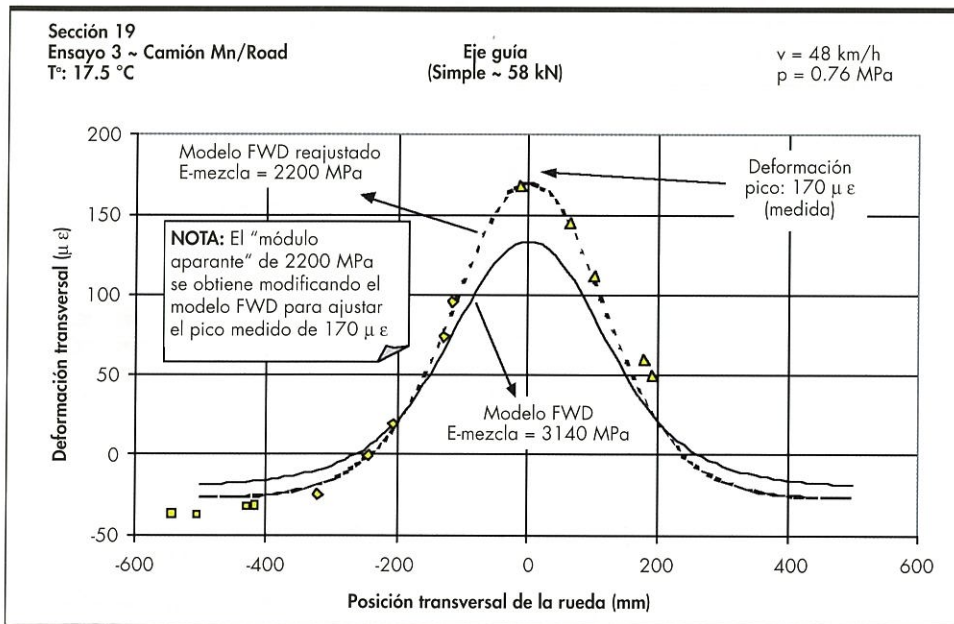


FIGURA 9. Determinación del "módulo aparente" de la mezcla bituminosa.

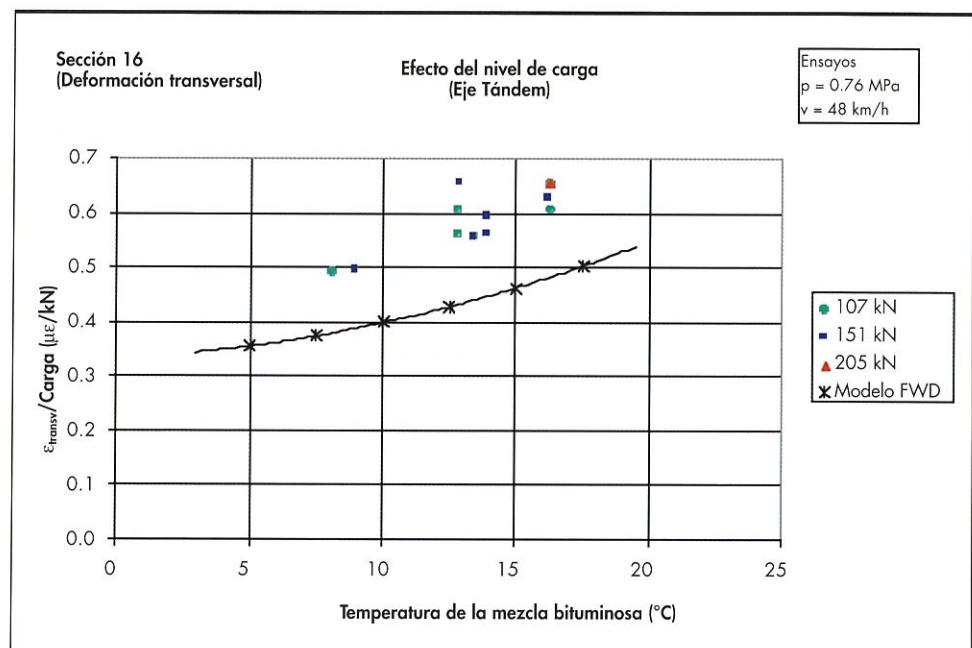


FIGURA 10. Efecto del nivel de carga.

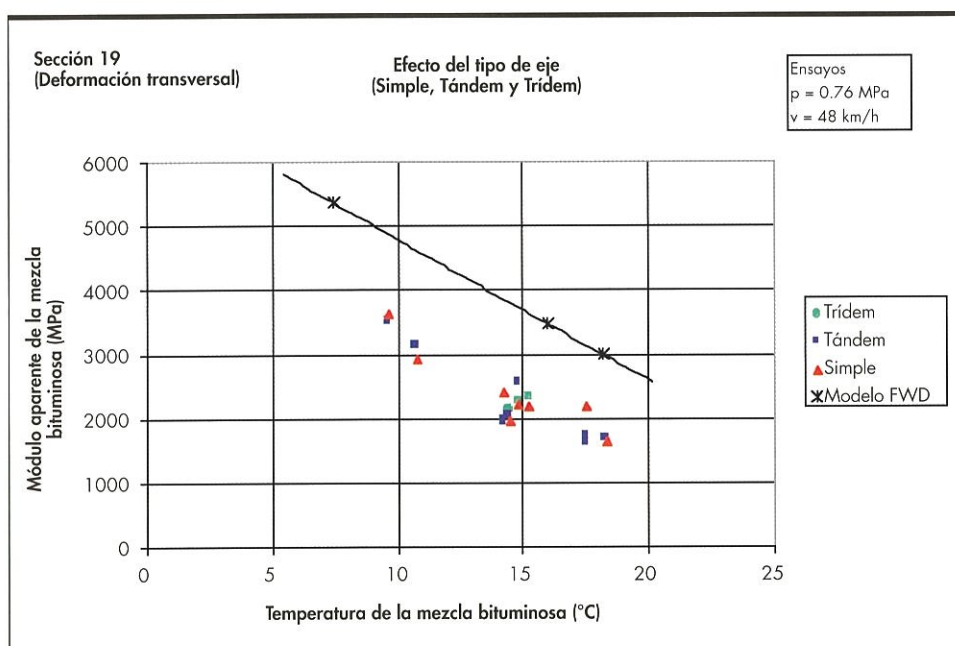


FIGURA 11. Efecto del tipo de eje.

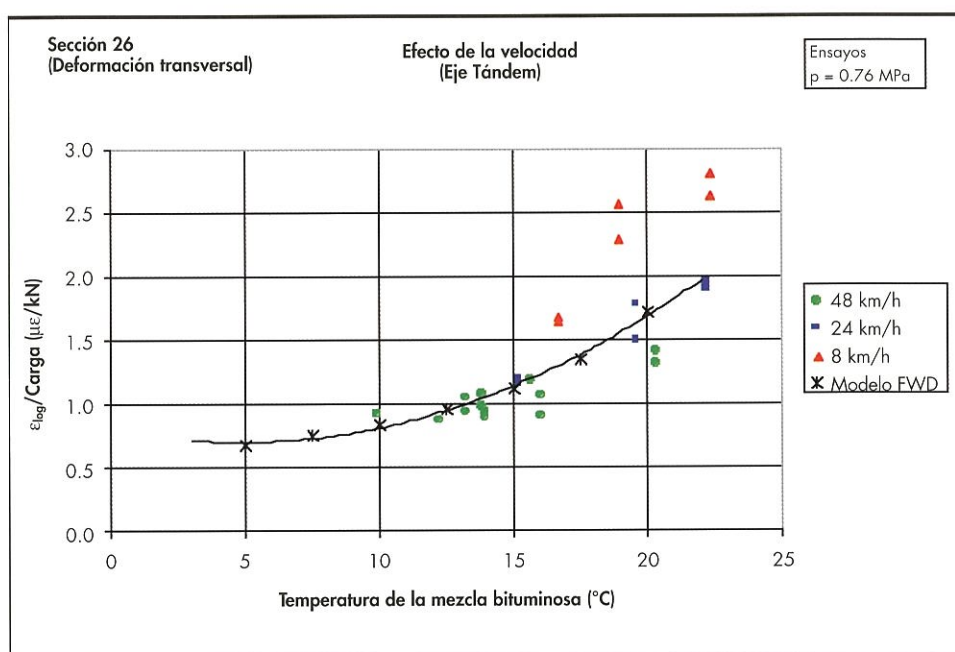


FIGURA 12. Efecto de la velocidad.

transversal) aumentaba significativamente al descender la velocidad y viceversa (véase un ejemplo en la Figura 12). Este resultado estaba en concordancia con el comportamiento viscoelástico de la mezcla bituminosa observado en los ensayos de laboratorio.

d. Efecto de la presión de inflado de los neumáticos

La mayoría de los ensayos fueron realizados con una presión de 0.76 MPa. Adicionalmente se realizaron ensayos a 0.62 y 0.90 MPa para estudiar el efecto de este factor.

La suposición habitual en el campo del comportamiento estructural de firmes es que el área de contacto entre neumático y pavimento es circular y que la presión

de contacto es constante e igual a la presión de inflado de los neumáticos. El último objetivo era determinar hasta que punto la citada suposición podía reproducir los cambios en la deformación medida en el fondo de la capa de mezcla bituminosa al cambiar la presión de inflado de los neumáticos.

El problema fue que el rango de presión utilizado para estudiar este factor no fue lo suficientemente amplio como para extraer conclusiones. Los cambios fueron pequeños en comparación con la dispersión de los resultados, por lo que no pudo concluirse, de estos ensayos, si la citada suposición era acertada o no.

e. Efecto de la posición transversal

Los sensores de deformación estaban situados en una banda de 600 mm de amplitud; tres sensores separados 300 mm aproximadamente. Los vehículos de ensayo pasaron sobre esa banda instrumentada, y puesto que eran conducidos manualmente, la posición transversal fue diferente de unos pases a otros (por cada "Ensayo" se realizaron cinco "Pases" del vehículo).

Ya se indicó que el modelo inicial, "modelo FWD", era multicapa elástico lineal en el que los módulos de elasticidad de las capas se obtuvieron a partir del cálculo inverso con deflectómetro de impacto. El módulo de la mezcla bituminosa se reajustó posteriormente con el objetivo de ajustar las deformaciones medidas en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los vehículos ("Modelo FWD reajustado"). El ajuste se hizo para la deformación medida justo bajo la rueda de los vehículos ($X = 0$ para rueda sencilla y $X = \pm 178$ mm para rueda gemela). Se trataba en este punto de determinar si este modelo predecía adecuadamente la deformación para las demás posiciones transversales.

Para cada ensayo y tipo de eje se trazaron gráficos de deformación medida y calculada frente a posición transversal. La conclusión fue que el "Modelo FWD reajustado" predecía adecuadamente la deformación horizontal (tanto longitudinal como transversal) medida en el fondo de la capa de mezcla bituminosa para las diferentes posiciones transversales de la rueda. Puede verse un ejemplo para eje simple (con rueda sencilla) en la Figura 9, y para eje tándem (con rueda gemela) en la Figura 13. Varios comentarios adicionales:

- De acuerdo con el modelo multicapa elástico lineal, así como con la modelización hecha para la carga, la deformación transversal (ϵ_{transv}) debería disminuir apreciablemente entre los dos neumáticos de una rueda gemela, lo que no concuerda con el comportamiento observado (véase Figura 13). Esta discrepancia podría estar relacionada con las suposiciones he-

chas para el área de contacto neumático-pavimento (carga circular y presión uniforme). El comportamiento observado estaría más en concordancia con una distribución de la carga más concentrada junto a los bordes transversales de los neumáticos, bien debido a una superficie de contacto no circular (superficie más ancha en la dirección transversal que en la longitudinal) o a una distribución no uniforme de presión (más concentrada junto a los bordes transversales de los neumáticos).

- Antes se indicó que el efecto de la velocidad era muy significativo; la deformación aumentaba al disminuir la velocidad de los vehículos. La deformación fue adecuadamente predicha para las diferentes posiciones transversales del eje para diferentes velocidades modificando sólo el módulo de la capa de mezcla bituminosa, y dejando fijos los módulos de las capas de base y explanada. Esto parece indicar que la mayor parte de los efectos de viscosidad provienen de la mezcla bituminosa. Para ilustrar este punto se considera en la Figura 14 un Ensayo realizado a baja velocidad (8 km/h), puesto que los efectos de viscosidad son más notables. La deformación de $225 \mu\epsilon$ medida justo bajo la rueda es muy superior a los $110 \mu\epsilon$ previstos por el "modelo FWD". Si se modifica el módulo de la mezcla bituminosa para ajustar ese pico de $225 \mu\epsilon$ ("modelo FWD reajustado") se observa que el modelo también predice adecuadamente la deformación para las demás posiciones transversales, cosa que no ocurre si se modifica el módulo de la capa de base granular; esto parece indicar que la razón por la que el "modelo FWD" no predice adecuadamente las deformaciones para este Ensayo realizado a baja velocidad está más en relación con el módulo de la mezcla bituminosa que con el módulo de la base (el módulo de la explanada apenas influye, en esta sección, en la deformación en el fondo de la capa de mezcla bituminosa).

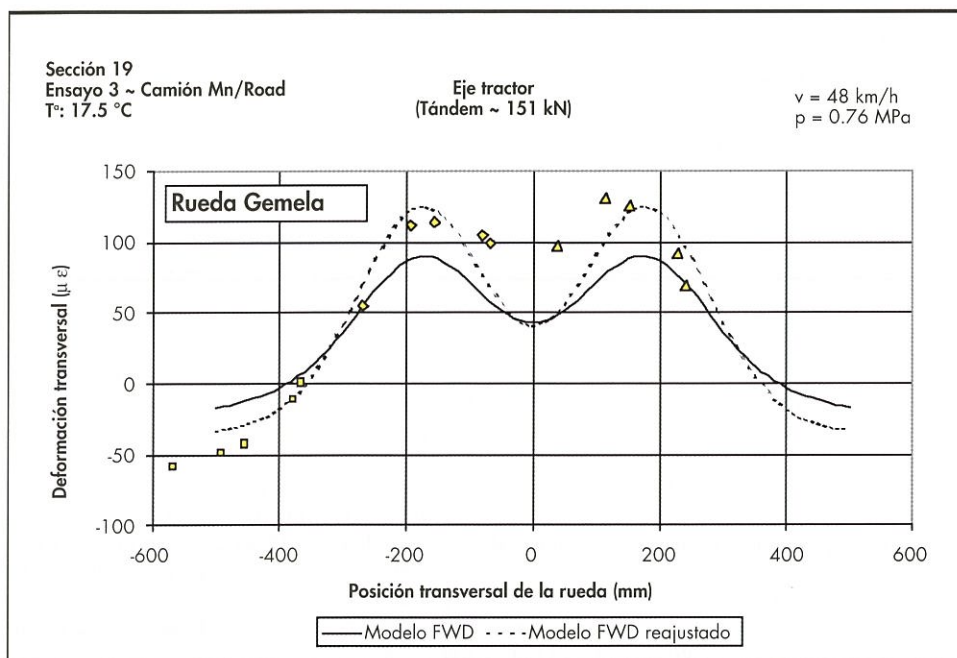


FIGURA 13. Efecto de la posición transversal.

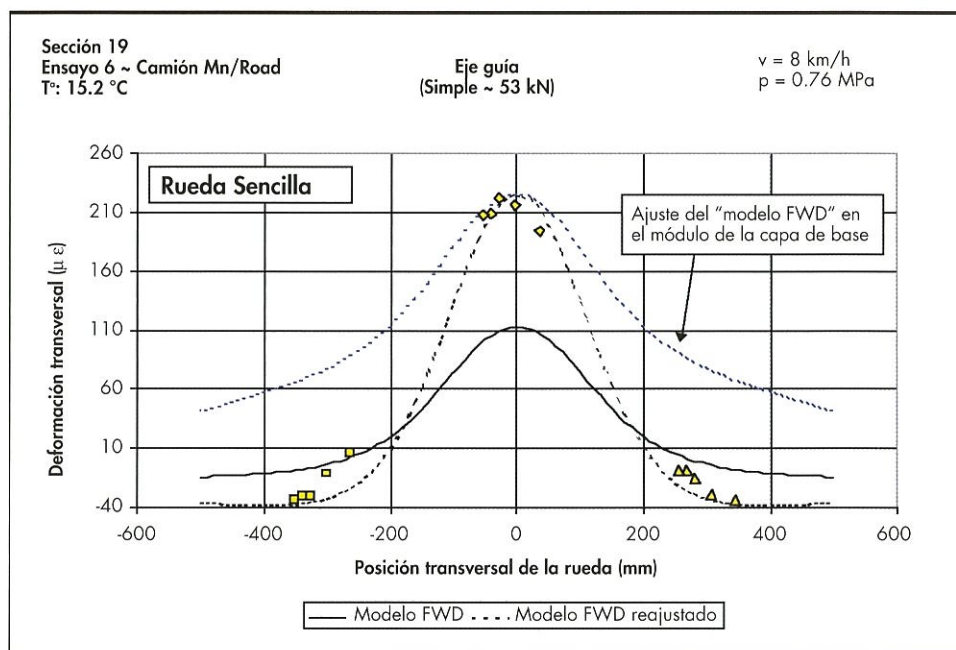


FIGURA 14. Efecto de la posición transversal.

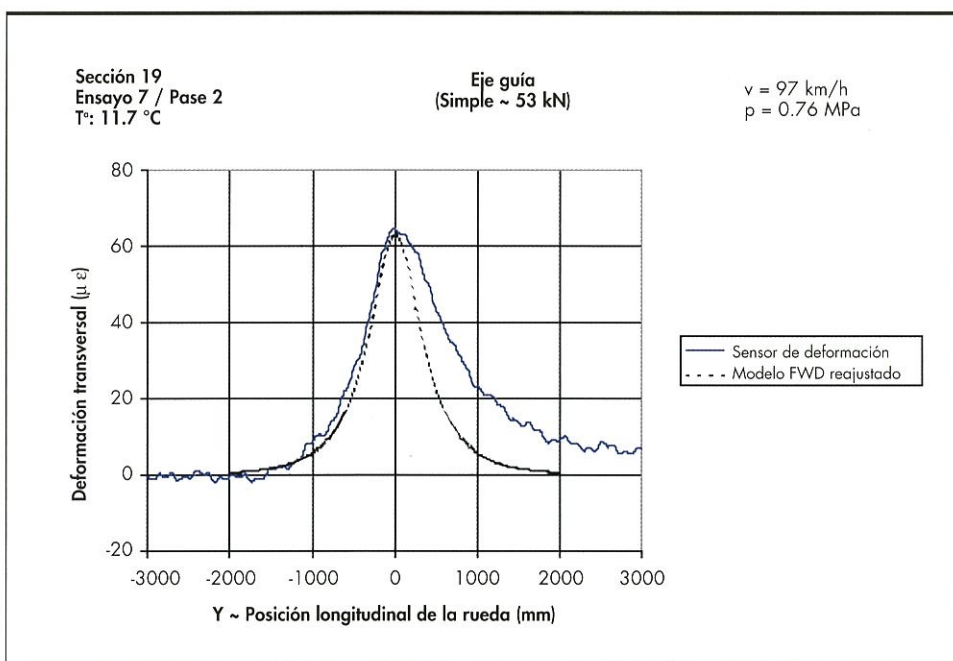


FIGURA 15. Registro longitudinal de deformación.

f. Efecto de la posición longitudinal

En el punto anterior se comprobó la habilidad del denominado "Modelo FWD reajustado" para la predicción de deformaciones horizontales en el fondo de la capa de mezcla bituminosa para las diferentes posiciones transversales del vehículo. Se trataba ahora de estudiar el efecto de la posición longitudinal. Para ello se compararon los registros longitudinales de las señales con las previsiones de dicho modelo.

En las Figuras 15 y 16 pueden verse dos ejemplos, el primero para deformación transversal y el segundo para longitudinal. En estos gráficos se dibujan las señales correspon-

dientes al paso de un eje simple (con rueda sencilla) del "Camión Mn/Road".

Las señales registradas son asimétricas longitudinalmente (respecto a $Y = 0$). Esto es especialmente claro para la deformación transversal; para la deformación longitudinal se pone más de manifiesto en Ensayos a baja velocidad (8 y 24 km/h). Al ser la mezcla bituminosa un material viscoelástico, parte de la deformación producida cuando la rueda está sobre el sensor permanece sin recuperar tras el paso de la misma, por lo que la deformación medida en la rama de salida es mayor que en la rama de entrada.

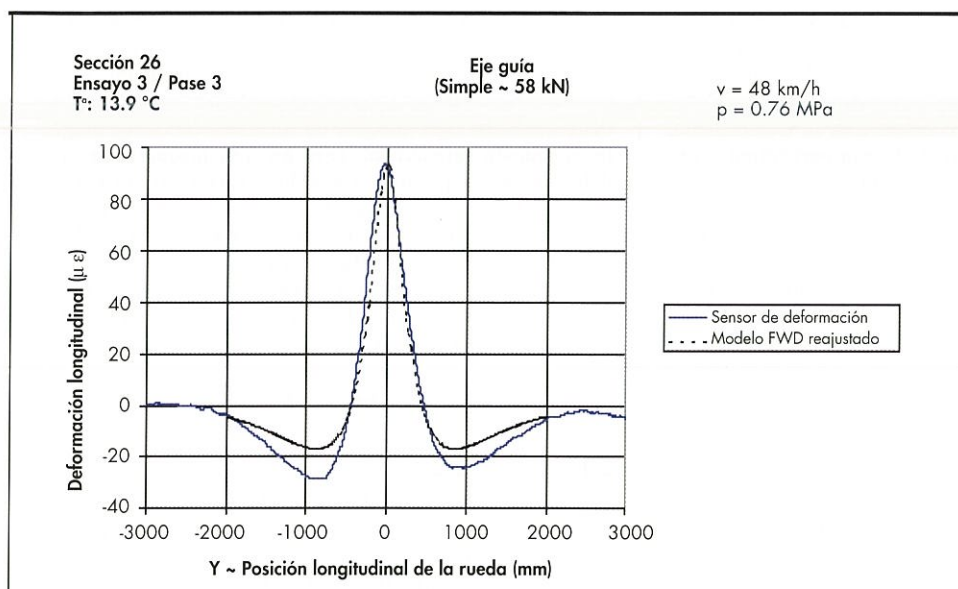


FIGURA 16. Registro longitudinal de deformación.

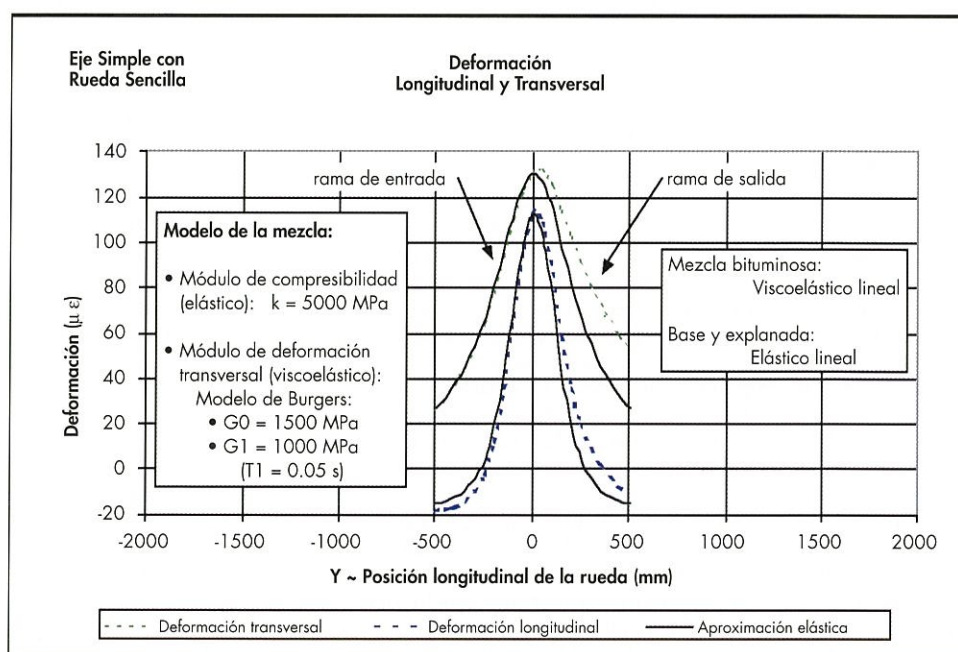


FIGURA 17. Aproximación elástica de una respuesta viscoelástica.

Respecto a la comparación sensor-modelo, los dos aspectos más importantes observados fueron:

- Para la deformación transversal: el modelo ajustó adecuadamente la rama de entrada, pero infraestimó la deformación en la rama de salida.
- Para la deformación longitudinal: el modelo ajustó adecuadamente ambas ramas en la zona tracción, pero infraestimó la compresión producida cuando el eje está a cierta distancia del sensor.

Se realizó un cálculo pseudo-estático utilizando para la mezcla bituminosa un modelo de comportamiento viscoelástico como el utilizado en el programa VEROAD (módulo de compresibilidad, k , elástico y módulo de elasticidad transversal, G , viscoelástico - modelo de Burgers). Se cal-

culó la deformación transversal y la longitudinal bajo el paso de una rueda sencilla. Posteriormente se ajustaron modelos elásticos aproximados en los que el módulo de la mezcla bituminosa se reajustaba para ajustar las deformaciones viscoelásticas calculadas; este era un proceso equivalente al realizado al considerar el módulo aparente de la mezcla bituminosa⁽¹²⁾. El resultado se expone en la Figura 17, y concuerda con el comportamiento observado en los ensayos.

(12) La deformación viscoelástica calculada se correspondería con las señales de deformación medidas, mientras que las "aproximaciones elásticas" (Figura 17) se corresponderían con el "Modelo FWD reajustado".

g. Deformación longitudinal frente a transversal

La respuesta del firme en términos de deformación longitudinal parecía ser más rígida que en términos de deformación transversal, esto es, el “módulo aparente” de la mezcla bituminosa era mayor cuando se consideraba la deformación longitudinal que la transversal. Este comportamiento era esperable de un material viscoelástico: la deformación transversal comienza a actuar cuando el vehículo está a cierta distancia del sensor, actuando siempre con el mismo signo de tracción, dando tiempo para que se desarrollen los efectos de viscosidad. Sin embargo, la deformación longitudinal actúa primero en compresión y luego en tracción (véanse Figuras 16 y 17). La deformación longitudinal puede considerarse como una onda de alta frecuencia comparada con la transversal, por lo que es normal que la mezcla bituminosa responda de forma más rígida.

h. Representatividad del ensayo de deflectómetro de impacto

Las deformaciones predichas por el “modelo FWD”, en el cual los módulos de las capas eran obtenidas mediante cálculo inverso a partir del deflectómetro de impacto, eran representativas de vehículos moviéndose a velocidades relativamente altas; en concreto, en las Secciones 16 y 19 (pista principal) fueron representativas de los Ensayos a 97 km/h y en las Secciones 26 y 30 (pista de bajo volumen) de los Ensayos a 48 km/h. El “modelo FWD” claramente infraestimaba las deformaciones producidas bajo el paso de vehículos a bajas velocidades (Ensayos a 8 km/h).

4.4. CONCLUSIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La respuesta estructural de las cuatro secciones consideradas en este estudio fue lineal, para el rango de cargas y temperaturas considerado. Además, los efectos de viscosidad fueron muy significativos.

La linealidad de la respuesta se observó en el ensayo de deflectómetro de impacto (las deflexiones aumentaban linealmente con la carga) y en los ensayos de carga con vehículos (la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa aumentaba linealmente con la carga del eje).

El comportamiento viscoelástico se observó en los ensayos de determinación del módulo de la mezcla bituminosa en laboratorio (el módulo dinámico aumentaba al aumentar la frecuencia de carga) y en los ensayos de carga con vehículos (la deformación horizontal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa aumentaba significativamente al disminuir la velocidad del vehículo). El comportamiento viscoelástico también podía observarse en la asimetría longitudinal de las señales de deformación horizontal medidas en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de los vehículos de ensayo. La mayor parte de los efectos de viscosidad parecían venir de la capa de mezcla bituminosa.

El modelo estructural validado en este estudio es de tipo multicapa elástico lineal, en el que los módulos de las capas de suelos se determinan mediante cálculo inverso con deflectómetro de impacto y el módulo de la capa de mezcla bituminosa se determina experimentalmente a partir de la deformación medida en el fondo de dicha capa bajo el paso de los vehículos de ensayo (“módulo aparente” de la mezcla bituminosa).

El “módulo aparente” de la mezcla bituminosa resultó ser independiente del tipo de eje así como del nivel de carga. Sin embargo, resultó depender de la velocidad del vehículo. El módulo de mezcla bituminosa obtenido en el cálculo inverso con deflectómetro de impacto era representativo del “módulo aparente” para velocidades relativamente altas (Ensayos a 48 km/h en la pista de bajo volumen y a 97 km/h en la pista principal).

La utilización de un modelo elástico para reproducir la respuesta estructural de secciones de firme con comportamiento viscoelástico es una simplificación; como tal, presenta una serie de inconvenientes. Podremos encontrar modelos elásticos equivalentes en términos de cierta magnitud de respuesta estructural, pero no será posible, con un modelo elástico, reproducir todos los aspectos de la respuesta de un sistema viscoelástico. Por ejemplo, no podremos reproducir la asimetría longitudinal, tampoco será posible ajustar, al mismo tiempo, deformación longitudinal y transversal en el fondo de la capa de mezcla bituminosa y el módulo de la mezcla bituminosa deberá ser reajustado dependiendo de la velocidad del vehículo.

5. COMPARACIÓN DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA

5.1. INTRODUCCIÓN

La comparación de los Factores de Equivalencia de Carga (LEF) proporcionados por el procedimiento AASHTO con los obtenidos mediante procedimientos mecánico-empíricos presenta diversas dificultades. Los factores considerados por ambos métodos son diferentes. Por ejemplo, los métodos mecánico-empíricos permiten la consideración de factores (como la presión de inflado de los neumáticos o la velocidad) que no son considerados directamente por el procedimiento AASHTO. Otros factores como la capacidad estructural del firme son abordados de forma muy diferente: los métodos mecánico-empíricos permiten una definición detallada de la estructura del firme, considerando el papel de cada una de sus capas, mientras que el procedimiento AASHTO sólo considera un número, el SN (“Structural Number”), para caracterizar la estructura completa del firme. Así, con vistas a esta comparación se hicieron una serie de simplificaciones.

Los LEF recogidos en la guía AASHTO dependen de la capacidad estructural del firme, considerada (para firmes flexibles) mediante el SN. Este número representa un espesor equivalente de las capas estructurales del firme sobre la explanada; cada capa contribuye a este número en proporción a su espesor y a su calidad:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

siendo,

D_i espesor de las capas de mezcla bituminosa (D_1), base (D_2) y subbase (D_3)

a_i coeficiente de equivalencia de la capa i

m_i coeficiente de drenaje de la capa i

- Para los m_i se supuso un valor 1.0, lo que representa unas condiciones de drenaje adecuadas.
- Los coeficientes de equivalencia de capa, a_i , se establecen en la guía AASHTO en función de la calidad del material; en concreto es posible determinarlos a partir del módulo de elasticidad. En este estudio se utilizaron los módulos obtenidos en el cálculo inverso con deflectómetro de impacto.
- El resultado fue:
 - Sección 16: SN = 6.9 (pulgadas)
 - Sección 19: SN = 6.4 (pulgadas)
 - Sección 26: SN = 2.6 (pulgadas)
 - Sección 30: SN = 2.9 (pulgadas)

Con respecto a la determinación de los LEF mecánico-empíricos:

- Se utilizó el modelo multicapa elástico lineal.
- Los módulos de elasticidad fueron los obtenidos mediante cálculo inverso a partir del deflectómetro de

impacto (esto significa que no se considera el tráfico a baja velocidad).

- La temperatura se consideró fija (20 °C).
- No se consideró la distribución transversal del tráfico a través del carril.
- Sólo se consideró un mecanismo de deterioro: fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa, mediante leyes de fatiga.

Se seleccionaron cuatro leyes de fatiga, pertenecientes a cuatro instituciones diferentes:

Asphalt Institute (estadounidense):

$$N_f = 0.0796 \cdot (\epsilon_t)^{-3.291} \cdot (E)^{-0.854}$$

Shell (holandesa):

$$N_f = 0.0685 \cdot (\epsilon_t)^{-5.671} \cdot (E)^{-2.363}$$

TRL (británico):

$$N_f = 1.66 \cdot 10^{-10} \cdot (\epsilon_t)^{-4.32}$$

CEDEX (español):

$$N_f = 9.075 \cdot 10^{-9} \cdot (\epsilon_t)^{-3.67}$$

siendo, N_f número de repeticiones permitidas hasta el fallo
 ϵ_t deformación horizontal de tracción en el fondo de la capa de mezcla bituminosa

E módulo de la mezcla bituminosa (psi)

El exponente de la deformación ϵ_t es el que determina el LEF para cada nivel de carga. A mayor exponente (en valor absoluto), mayor LEF para cargas altas. Por ejemplo, si cierto eje simple produce el doble de deformación que la producida por el eje estándar (simple de 80 kN en el procedimiento AASHTO) la ley de fatiga de la Shell daría un LEF de $(2)^{5.671} = 50.9$ mientras que la ley del Asphalt Institute daría un LEF de $(2)^{3.291} = 5.25$.

Puesto que hay diferencias entre los exponentes de ϵ_t de unas leyes a otras, son esperables diferencias significativas entre los LEF dependiendo de la ley de fatiga considerada.

5.2. COMPARACIÓN DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CAPA

En las Figuras 18 y 19 se representa una comparación de LEF; AASHTO frente a mecánico-empíricos:

- En la Figura 18 se incluyen los resultados obtenidos para la Sección 16 (SN~6.9). Para la Sección 19 (SN~6.4) se obtuvieron resultados muy similares.
- En la Figura 19 se incluyen los resultados obtenidos para la Sección 26 (SN~2.6). Para la Sección 30 (SN~2.9) se obtuvieron resultados muy similares.

* En los gráficos se incluyen tres curvas para los LEF del procedimiento AASHTO (correspondientes a los

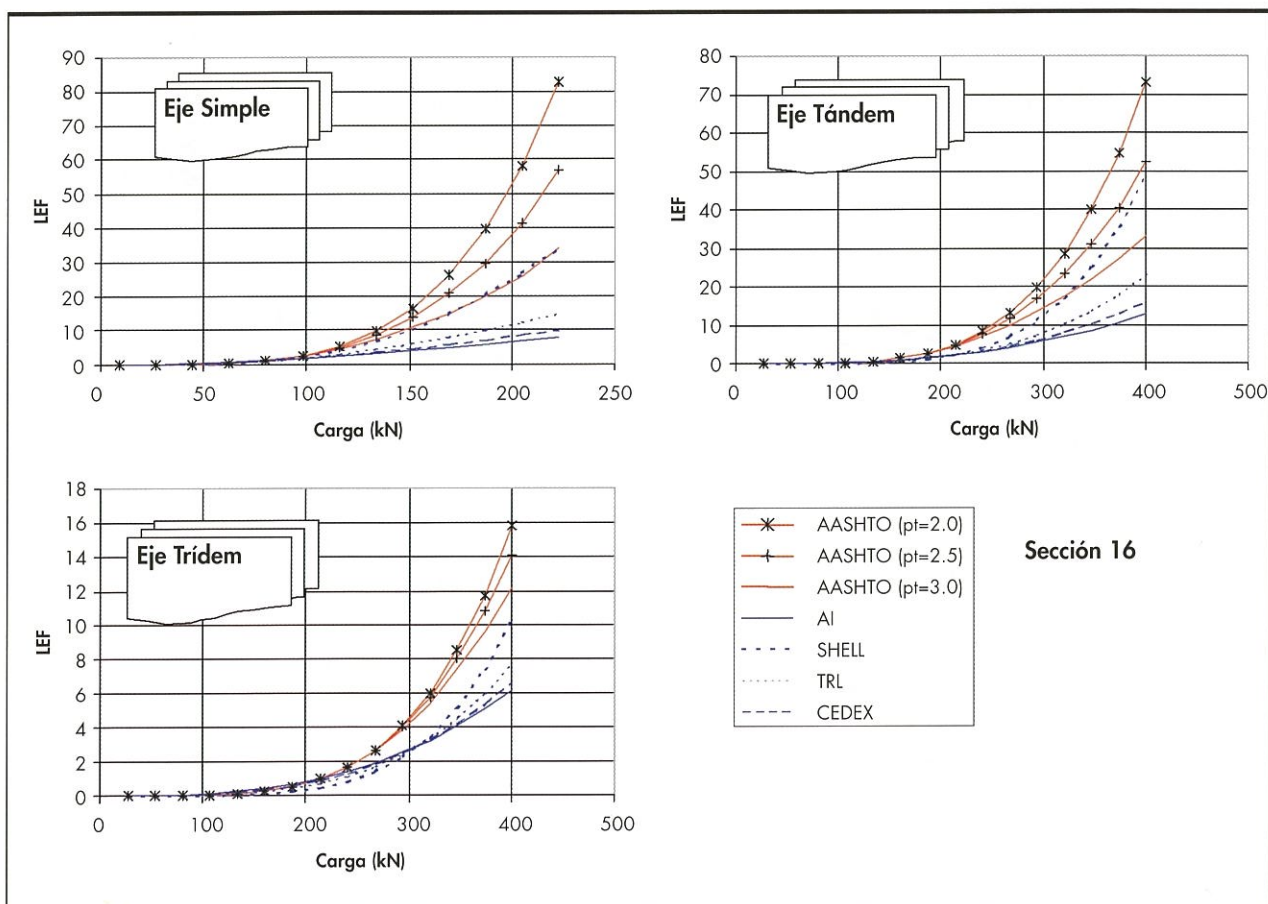


FIGURA 18. Comparación de Factores de Equivalencia de Carga - Sección 16.

tres niveles de servicio final: $p_t = 2.0 / 2.5 / 3.0$), así como cuatro curvas para los mecánico-empíricos (correspondientes a cada una de las cuatro leyes de fatiga seleccionadas).

Con el objeto de cuantificar las diferencias se establecieron tres niveles de carga para cada tipo de eje, y se comparó la media de los valores mecánico-empíricos (para las cuatro leyes de fatiga) con la media de los valores AASHTO (para los tres niveles de servicio final; esto equivale aproximadamente a considerar un nivel de servicio final $p_t = 2.5$). Los resultados fueron:

- La media de los LEF mecánico-empíricos para ejes simples de 62, 80 y 151 kN fue aproximadamente 125, 100 y 50 %, respectivamente, de los valores proporcionados por el procedimiento AASHTO⁽¹³⁾.
- La media de los LEF mecánico-empíricos para ejes tándem de 107, 160 y 241 kN fue aproximadamente 70, 55 y 50 %, respectivamente, de los valores proporcionados por el procedimiento AASHTO.
- La media de los LEF mecánico-empíricos para ejes trídems de 160, 241 y 321 kN fue aproximadamente 90, 70 y 60 %, respectivamente, de los valores proporcionados por el procedimiento AASHTO.

(13) El resultado obtenido para el LEF de un eje simple de 80 kN es trivial.

5.3. CONCLUSIONES SOBRE LA COMPARACIÓN DE FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA

- Hay diferencias muy significativas entre los LEF mecánico-empíricos según la ley de fatiga considerada. Cada ley de fatiga ha sido calibrada en una situación diferente, y es representativa de las condiciones (materiales, clima...) para las que ha sido desarrollada.
 - También hay diferencias significativas entre los LEF de la guía AASHTO según el nivel de servicio final p_t considerado. Los LEF aumentan para bajos p_t .
 - En general, el rango de LEF proporcionado por el procedimiento AASHTO para los diferentes p_t estaba por encima del rango de valores proporcionado por el procedimiento mecánico-empírico para las diferentes leyes de fatiga.
- La conclusión general es que los LEF mecánico-empíricos infraestimaron los valores proporcionados por el procedimiento AASHTO, y a mayor carga, mayor infraestimación. Una de las posibles explicaciones es que sólo se ha utilizado un mecanismo de deterioro (fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa) en la determinación de los LEF-ME. Sin embargo, el daño en un firme se produce por la suma de una serie de mecanismos de deterioro; estos mecanismos están indirectamente considerados en el procedimiento AASHTO, ya que está basado en resultados empíricos.
- En el procedimiento AASHTO, los LEF para ejes simple y tándem son mayores para secciones con baja capacidad

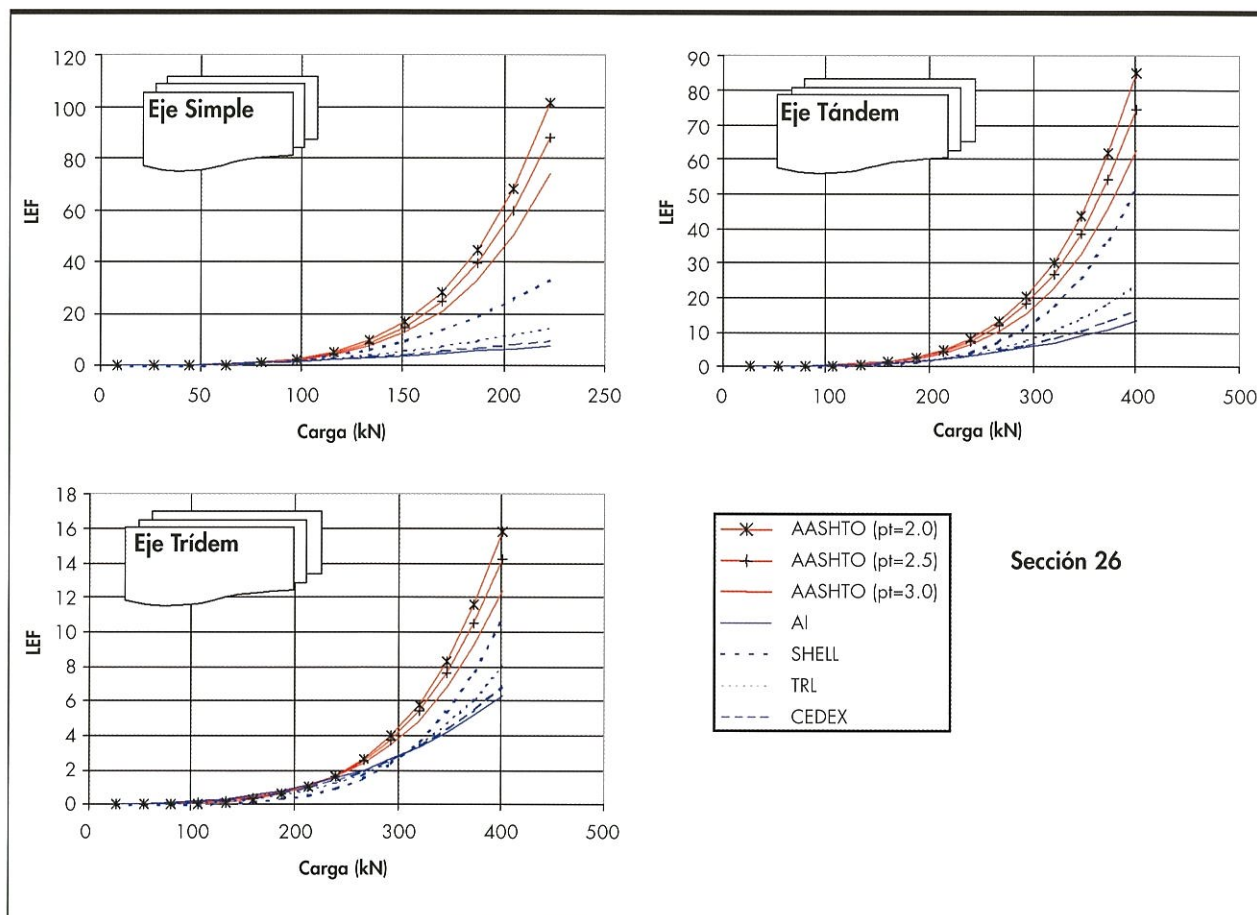


FIGURA 19. Comparación de LEF - Sección 26.

estructural, especialmente para altas cargas y para $p_t = 3.0$. Sin embargo, el procedimiento mecánico-empírico dio resultados similares para las cuatro secciones, a pesar de ser de muy diferente capacidad estructural.

6. CONCLUSIONES

Tras el estudio de los resultados de diferentes ensayos, y especialmente tras el estudio de la deformación medida en el fondo de la capa de mezcla bituminosa bajo el paso de vehículos en movimiento, se concluyó que el comportamiento estructural de las cuatro secciones de firme flexible consideradas en este estudio era lineal y que los efectos de viscosidad eran muy significativos. La mayor parte de los efectos de viscosidad parecían provenir de la capa de mezcla bituminosa.

Se utilizó un modelo estructural de tipo multicapa elástico lineal, que reprodujo adecuadamente la respuesta del firme bajo el paso de vehículos en movimiento. Los módulos de elasticidad de la explanada y de la capa de base del firme fueron determinados mediante cálculo inverso a partir del ensayo de deflectómetro de impacto, mientras que el módulo de la capa de mezcla bituminosa se determinó experimentalmente a partir de la deformación medida en el fondo de dicha capa.

Este modelo multicapa elástico lineal fue utilizado para la determinación de Factores de Equivalencia de Carga mecánico-empíricos. Sólo se consideró un mecanismo de deterioro, la fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa, mediante la aplicación de diferentes leyes de fatiga desarrolladas por diferentes organismos. Los valores así obtenidos infraestimaron notablemente los Factores de Equivalencia de Carga proporcionados por el procedimiento AASHTO, y a mayor carga, mayor infraestimación. Probablemente esto sea debido al hecho de que solamente se ha considerado un mecanismo de deterioro. Sin embargo, el deterioro de un firme es la conjunción de diferentes mecanismos, que indirectamente están recogidos por el procedimiento AASHTO, al estar éste basado en resultados empíricos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores querrían expresar su agradecimiento a la Comisión Fulbright, por el patrocinio y financiación de los estudios de postgrado en los Estados Unidos.

El proyecto de investigación fue patrocinado por la FHWA ("Federal Highway Administration") a través del Departamento de Transporte de Minnesota y del Proyecto Mn/ROAD. Los autores agradecen la contribución, tanto técnica como administrativa, de las diferentes personas de estos organismos que han asistido al desarrollo de los trabajos. También querrían agradecer especialmente a Matthew Oman y Drexel Glasgow (estudiantes de postgrado en la Universidad de Minnesota) su contribución a la planificación y ejecución del proyecto de investigación descrito en este artículo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO, "AASHTO guide for Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1993.
- BALAY J., JOUVE P., GOMES CORREIA A., HORNYCH P. and PAUTE J., "Mechanical Behavior of Soils and Unbound Granular Materials, Modelling of Flexible Pavements - Recent Advances", Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Proceedings, Vol. I, Seattle, Washington, 1997.
- BURMISTER D. M., "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways", Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, 1943, pp. 126-144.
- CHADBOURN B. A., NEWCOMB D. E. and TIMM D. H., "Measured and Theoretical Comparisons of Traffic Loads and Pavement Response Distributions", Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Proceedings, Vol. I, Seattle, Washington, 1997.
- DAI S., and VAN DEUSEN D., "Field Study of In-situ Subgrade Soil Response Under Flexible Pavements", Transportation Research Record 1639, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1998.
- DE JONG D. L., PEATZ M. G. F. and KORSWAGEN A. R., "Computer Program Bisar Layered Systems Under Normal and Tangential Loads", Konin Klijke Shell-Laboratorium, Amsterdam, External Report AMSR.0006.73, 1973.
- HIMENO K., KAMIJIMA T., IKEDA T. and ABE T., "Distribution of Tire Contact Pressure of Vehicles and its Influence on Pavement Distress", Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Proceedings, Vol. I, Seattle, Washington, 1997.
- HUANG Y. H., "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- IOANNIDES A. M. and KHAZANOVICH L., "Load Equivalency Concepts: A Mechanistic Reappraisal", Transportation Research Record 1388, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1993.
- MAMLOUK M. S. and KHANAL P. P., "Bimodular Analysis of Asphalt Pavements", Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Proceedings, Vol. I, Seattle, Washington, 1997.
- MATEOS MORENO A. y BAENA RANGEL J. M., "Cálculo inverso de firmes", I Congreso Andaluz de Carreteras, Granada, 1998.
- MINER M. A., "Cumulative Damage in Fatigue", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 67, 1945, pp. A.159-A.164.
- NILSSON R. N., OOST I. and HOPMAN P. C., "Viscoelastic Analysis of Full-Scale Pavements: Validation of VEROD", Transportation Research Record 1539, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1996.
- ULLIDTZ P., "Pavement Analysis", Elsevier Science, New York, 1987.