

Recomendaciones para el dimensionamiento de la rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso mediante metodologías racionales



Recommendations for the design of structural rehabilitation of asphalt pavements through mechanistic methodologies

Ricardo Bardasano González
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

Es un hecho constatado que los firmes se deterioran y pierden sus características iniciales con el paso del tráfico y debido a la acción climatológica. Incluso cuando se realizan las tareas de conservación encaminadas a reducir la tasa de deterioro, es inevitable abordar en un momento dado la rehabilitación del firme, que constituye una actuación de mayor envergadura, cuando se alcanzan determinados límites. En España, la referencia básica para la rehabilitación del firme es la norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes", que constituye una herramienta muy útil, pero que sin embargo no está adaptada a las últimas tendencias internacionales en cuanto a dimensionamiento de firmes y de sus rehabilitaciones, dado que no contempla con carácter general el empleo de métodos analíticos de cálculo. El objetivo de este trabajo es proporcionar al técnico una serie de criterios adicionales a los establecidos por la norma 6.3-IC, a partir de los cuales pueda seguir una serie de pautas que le faciliten la tarea del diagnóstico del estado estructural de los firmes con pavimento bituminoso y de la elección y dimensionamiento de su rehabilitación estructural, complementando aquellos aspectos incluidos en la norma en los que sea susceptible el uso de métodos analíticos de cálculo.

PALABRAS CLAVES: pavimento, rehabilitación, deflector de impacto, cuenco de deflexión, dimensionamiento analítico.

Abstract

It's a fact that pavements deteriorate and lose their initial characteristics due to traffic and weather actions. Even when the maintenance efforts aimed at reducing the rate of deterioration had been performed, it is unavoidable addressing pavement rehabilitation, which is a greater scope action, at a given time when certain service limits have been reached. In Spain, the essential basis for pavement rehabilitation is the standard 6.3-IC "Rehabilitación de firmes" which constitutes a very useful tool for this purpose, but which nevertheless is not adapted to the latest international trends in design of pavements and their rehabilitation, since it does not cover, in general terms, the use of mechanistic pavement design methods. The aim of this paper is to provide a number of additional technical criteria to those established by standard 6.3-IC from which a set of guidelines that facilitate the tasks of asphalt pavement condition diagnosis and choice/design of their structural rehabilitation can be followed, so that they are complementary to those areas of the standard that are likely to improve by using analytical methods of calculation.

KEY WORDS: pavement, rehabilitation, falling weight deflectometer, deflection bowl, mechanistic design.



1. Introducción

Desde el mismo momento en que un firme se pone en servicio, la acción del tráfico y de la climatología provocan una disminución de sus características funcionales y estructurales iniciales, incluso aunque dicho firme haya sido dimensionado correctamente y a pesar de que se hayan ejecutado las correspondientes operaciones de conservación ordinaria, de carácter preventivo, con el fin de reducir la velocidad de degradación de tales características. Cuando el nivel de servicio del firme llega a umbrales no admisibles por la administración que gestiona la carretera, ésta se debe plantear la necesidad de un segundo nivel de conservación: la rehabilitación, entendida como una actuación de carácter, en principio, extraordinario, cuyo objetivo puede ser recuperar el nivel de servicio inicial (o al menos, acercarse lo más posible a él) o extender la vida de servicio del firme un período adicional al inicialmente proyectado. Además, la rehabilitación puede plantearse sin haber llegado a límites críticos de los indicadores de servicio para adaptarse a una nueva situación de solicitaciones no contempladas en el momento de la concepción del firme. Dichas rehabilitaciones pueden ser superficiales o estructurales, en función de cuales sean las características del firme que se pretende renovar.

Existen numerosas referencias bibliográficas relacionadas con la concepción, la selección y el dimensionamiento de las rehabilitaciones del firme de una carretera. Sin ir más lejos, en España disponemos de la norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes" de la Instrucción de Carreteras, aprobada por la Orden FOM/3459/2003 de 28 de noviembre, que constituye una amplia guía de proyecto más allá de las tablas de dimensionamiento que contiene, conformando una metodología práctica que guía al técnico y describe de forma detallada cada una de las tareas que ha de seguir hasta la definición completa de la solución de rehabilitación.

Dichas tablas, por su parte, se basan en el procedimiento generalizado entre las distintas administraciones de carreteras, esto es, en las relaciones existentes entre las intensidades de tráfico pesado, el nivel de deterioro de los firmes y las deflexiones; además, para la elaboración de dichas tablas, se ha recurrido a comprobaciones con métodos de cálculo analítico. Sin embargo, la norma, al igual que ocurre con la 6.1-IC "Secciones de firme", no permite con carácter general el empleo de este tipo de métodos, también denominados racionales, y los restringe a determinadas situaciones en los tráficos más ligeros.

Este criterio parece divergente con las últimas tendencias en lo que respecta a la normativa de firmes de otras administraciones, tanto regionales como internacionales, en las que se apuesta decididamente por la racionalización del cálculo de los firmes. Los métodos analíticos o racionales para el dimensionamiento de firmes en secciones de nueva construcción han experimentado en los últimos años, de hecho, un gran avance en su difusión y en su empleo, debido en gran parte al desarrollo de programas informáticos que los implementan y a su inclusión en diferentes normativas relacionadas con el diseño de secciones de firme, bien como complemento a otras metodologías habitualmente empleadas (catálogos de secciones), o bien adoptando el rol de metodología principal (si bien en este caso, también habitualmente apoyada en dichos catálogos de secciones).

Sin embargo, el empleo de este tipo de métodos no ha alcanzado similar difusión en el caso de las rehabilitaciones estructurales de firmes. Los motivos para ello son diversos, pero a juicio del autor los más importantes son los siguientes:

- La escasa formación especializada de los ingenieros encargados de acometer el dimensionamiento de la rehabilitación.
- La insuficiente caracterización del estado estructural del firme, para la que habitualmente se emplea como

indicador único la denominada deflexión patrón (y sus correspondientes estadísticos), que efectivamente da una indicación sobre la capacidad estructural global del firme, pero que es claramente ineficaz para la definición precisa de su estado.

- La excesiva dependencia del proceso de cálculo de los espesores de las capas que componen el firme.
- El incumplimiento, en la práctica, de las hipótesis de partida. Efectivamente, son numerosas las hipótesis y simplificaciones adoptadas difícilmente se cumplen en la práctica puesto que evidentemente las capas que constituyen el firme están formadas por materiales de comportamiento mucho más complejo del que se le supone para el cálculo; no obstante, dichos resultados se han demostrado suficientemente útiles para el cálculo y, a día de hoy, son la mejor opción existente.
- La dificultad en el empleo de determinadas técnicas relacionadas con dichos métodos y en la interpretación correcta de sus resultados.
- La inexistencia de una metodología orientada al empleo de estos métodos que guíe al ingeniero en el proceso de forma concreta y detallada.

Como se ha indicado, la propia norma 6.3-IC constituye un valioso documento como guía de proyecto de una rehabilitación, pero presenta el inconveniente de que no permite el uso de los métodos racionales más que marginalmente, ni incorpora por tanto las directrices para el empleo de los mismos en los diferentes apartados que la conforman. Precisamente, el objetivo de este trabajo es proporcionar al técnico una herramienta útil en este sentido, a partir de la cual pueda seguir una serie de pautas con las que desenvolverse cómodamente en la no tan sencilla tarea de diagnosticar el estado estructural del firme, y de elegir y dimensionar su rehabilitación siguiendo la base metodológica establecida la norma 6.3-IC, precisándola y complementándola en aquellos aspectos incluidos en la misma



en los que sea susceptible el empleo de métodos analíticos para mejorarla, y reflexionando sobre algunas cuestiones que al autor le parecen fundamentales.

No se pretende tratar, por el contrario, con extensión y detalle los métodos analíticos de cálculo (aunque efectivamente es necesario introducir sus bases) ni desarrollar cada una de las cuestiones que deben abordarse en el dimensionamiento de la rehabilitación estructural, para lo cual el técnico responsable deberá acudir, aparte de a la propia norma, a publicaciones y artículos técnicos especializados.

Este trabajo se ceñirá a lo relacionado con la rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso, excluyendo por tanto las rehabilitaciones superficiales y el tratamiento de los firmes rígidos (aunque algunas de las consideraciones que se incluyen tienen carácter general y son aplicables también a estos). Además, se presupone que el lector está familiarizado con los equipos de auscultación de firmes y con el proceso general de la rehabilitación estructural, por lo que no se aborda en detalle la descripción de cada uno de los términos empleados en el trabajo.

2. Los métodos analíticos en el dimensionamiento de firmes

Como ya se ha indicado, no es el objeto de este trabajo la descripción detallada de los métodos de dimensionamiento analítico de firmes, que ya están tratados con suficiente extensión en múltiples publicaciones técnicas e incluso en normativas de secciones de firme de diferentes administraciones autonómicas, pero sí se considera necesario describir someramente las bases en las que se asientan.

La consideración del firme como una estructura es el concepto básico sobre el cual se desarrolla el estudio analítico de firmes. Como en todo sistema de cálculo estructural, existe una teoría para predecir los estados de deterioro o fallo de la estructura, una caracterización de las propiedades de los mate-

riales aplicable a la teoría seleccionada y una determinación de las relaciones entre las magnitudes de los parámetros para conseguir el nivel de comportamiento deseado.

La teoría empleada en este estudio responde al concepto de considerar el firme como una estructura constituida por un conjunto de capas que conforman un sistema multicapa elástico, que cumple los siguientes supuestos básicos:

- Las capas son de longitud infinita en las direcciones horizontales.
- Las capas tienen espesor uniforme.
- La última capa es infinita en sentido vertical (espacio semi-indefinido de Boussinesq).
- Las capas están compuestas por materiales elásticos lineales, homogéneos, isótropos, y definidos por su módulo de elasticidad (E) y por su coeficiente de Poisson (ν).

Para conocer el estado tensional del firme bajo una carga se aplica la teoría multicapa elástica desarrollada por Burmister (Donald, M. Burmister 1895-1981) en "The general theory of stresses and displacements in layered soil systems, Journal of Applied Physics (1945)" [6]. En la aplicación de este método, se aceptan las siguientes simplificaciones:

- Cada una de las cargas que actúa sobre el firme se representa mediante una presión distribuida uniformemente sobre un área circular.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre las capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales), parcial, o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas, de modo que no alteran las hipótesis anteriores.
- No se suelen considerar los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento, debido a que, salvo en algunos casos, son prácticamente despreciables.

- No se considera el peso propio del firme.

Con estas hipótesis y simplificaciones, las ecuaciones en derivadas parciales que resultan del planteamiento del problema se resuelven mediante transformadas. La respuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales definidas, que se resuelven numéricamente mediante aplicaciones informáticas.

Para saber si el firme está correctamente dimensionado, es decir, si el espesor de las capas es suficiente, se empieza determinando el estado tensional producido por una carga tipo. A partir de los valores de las tensiones y de las deformaciones obtenidas en el cálculo se determina el número N_f de veces que el firme es capaz de soportar la aplicación de la carga tipo mediante un análisis de fatiga o de deformaciones. Para ello se han debido establecer previamente las funciones de transferencia (leyes de fatiga o leyes de deformación) de los materiales que componen el firme. El valor de N_f debe ser superior al número N_t de aplicaciones de carga previstas durante el período de proyecto (es decir, el tráfico equivalente de proyecto) deducidas del estudio de tráfico correspondiente.

Las citadas funciones de transferencia son expresiones matemáticas obtenidas a partir de ensayos de laboratorio y que deben ser calibradas en estudios a escala real, con las que se determina el número N_f de aplicaciones de la carga tipo que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural por fatiga, o al valor límite de deformaciones plásticas acumuladas, a partir de ciertos parámetros críticos que forman parte de la respuesta del material a la sollicitación. Los valores críticos a considerar son, en general (dependen del método adoptado para el cálculo):

- Mezclas bituminosas: máxima deformación horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa (ϵ_p).
- Capas tratadas con cemento: máximo esfuerzo horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa (σ_p).

- Capas granulares y explanadas: máxima deformación vertical de compresión en la fibra superior de la capa (ϵ_z). En general, no suelen aplicarse los criterios de fallo de las capas granulares de base o subbase.

3. Metodología para el dimensionamiento de la rehabilitación estructural del firme

La metodología para la correcta selección y dimensionamiento de la solución de rehabilitación estructural de un firme, entendiendo como tal aquella cuyo objeto es incrementar la capacidad estructural del firme existente para adecuarla a las acciones previstas del tráfico en el periodo de servicio considerado, debe constar, en términos generales, de las siguientes fases:

- Estudio de las causas y de la necesidad de la rehabilitación estructural. La respuesta a esta cuestión puede ayudar a intuir, en primera instancia, la solución más adecuada.
- Recopilación y análisis de los datos necesarios y de los factores de proyecto. Será necesario disponer de información acerca del tipo de firme, de su historial de construcción/rehabilitaciones, del entorno (en particular, de las características de la explanada, del drenaje y de su comportamiento, y de la climatología de la zona), y de las solicitudes del tráfico esperables.
- Diagnóstico del estado del firme. En definitiva, analizar cuál es la situación del firme y determinar cuál puede ser su evolución probable. La información necesaria debe incluir, al menos, el resultado de una inspección visual, los resultados de una campaña de evaluación estructural mediante un deflectómetro de impacto y de medida de la regularidad superficial mediante un perfilómetro de alto rendimiento, y sería deseable contar con un estudio de la composición del firme y espesores de capas del mismo mediante georradar, y con un estudio de laboratorio de los materiales obtenidos mediante extracción de testigos del firme o apertura de catas.

mediante extracción de testigos del firme o apertura de catas.

- Análisis de soluciones y selección del tipo más apropiado. En función del diagnóstico acerca del estado del firme, de la disponibilidad de materiales, de la facilidad de ejecución, de la afección al tráfico, así como de otros factores entre los que evidentemente no pueden faltar los criterios económicos (costes de la propia actuación, costes de afección a los usuarios, vida útil prevista/requerida de la sección, costes de conservación previstos, etc.), se deberá seleccionar la solución óptima de rehabilitación.
- Dimensionamiento de la solución elegida. Se trata en este punto de definir con precisión, en base a los cálculos que sean necesarios (o en la experiencia en el caso de los métodos empíricos, o más generalmente en una combinación de cálculo y experiencia) las características estructurales del firme (principalmente materiales, espesores y características mecánicas de los mismos). Dependiendo del propio resultado del diagnóstico del firme, este paso puede ser simultaneado con el anterior.

3.1 Recopilación y análisis de los datos necesarios y de los factores de proyecto

En este apartado, a efecto de la aplicación de métodos analíticos de cálculo, se hace necesario incidir en la necesidad de una correcta caracterización del tráfico pesado que solicita el firme. Tradicionalmente se ha empleado a estos efectos únicamente la intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el

año de puesta en servicio (IMD_p) debido, fundamentalmente, a que la metodología para una caracterización del tráfico precisa, dada la complejidad y variabilidad de su composición (diferentes tipos de vehículos, pesos, configuraciones de ejes y ruedas, presiones de contacto), es laboriosa y por tanto su coste económico es alto. Pero, en opinión del autor, este dato es insuficiente por los siguientes motivos:

- La definición de “vehículo pesado” es demasiado vaga y generalista a efectos de aplicación de las normas de rehabilitación.
- Desde los trabajos iniciados por el CEDEX en 1984 mediante pesaje dinámico para caracterizar la al tráfico pesado, en los cuales debería haberse basado, deseablemente, la simplificación de la normativa española, se han producido profundos cambios en el parque de vehículos en España.

También para el empleo en los métodos analíticos es necesaria una simplificación, dado que considerar cada carga particular sería inabordable. En estos casos, lo más habitual es emplear un eje tipo, denominado habitualmente eje equivalente, que en el caso de España suele ser el eje simple de 13 toneladas con rueda gemela (si bien la configuración de cargas y las presiones de inflado son diferentes según la fuente consultada). Las solicitaciones del tráfico suelen expresarse en términos de tráfico equivalente de proyecto, que no es más que el número de ejes equivalentes acumulados durante el periodo de proyecto.

Para ello, a partir de los datos recogidos en las campañas de aforo y pesaje dinámico convenientemente realizadas, se fijará el espectro del tráfico pesado existente o previsto para la carretera de que forma parte el firme a rehabilitar, es

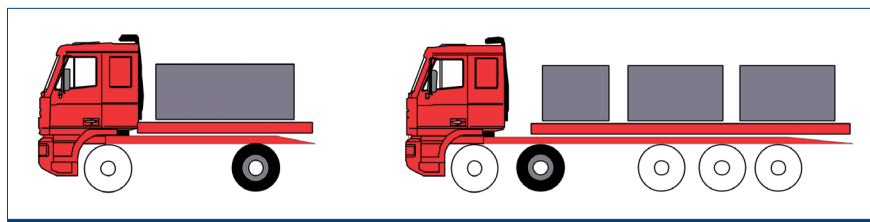


Figura 1.

decir, se debe definir para cada vehículo pesado la disposición, tipología y magnitud de las masas de sus ejes, agrupando por categorías (en general, vehículos rígidos de dos ejes, vehículos rígidos de tres ejes, vehículos rígidos o articulados de cuatro ejes, vehículos articulados de cinco ejes y vehículos articulados o trenes de carretera de más de cinco ejes).

A partir de estos datos, para cada vehículo considerado individualmente (aunque también sería posible emplear datos agregados dentro de cada categoría, pero dado que las herramientas informáticas actuales permiten el tratamiento de gran volumen de datos en un reducido período de tiempo, se puede realizar el cálculo para cada vehículo), se puede determinar su equivalencia en términos de ejes tipo; esta equivalencia se denomina habitualmente coeficiente de agresividad, y no es más que la suma de ejes equivalentes de 13 t que ejercen el mismo daño sobre el firme que cada uno de los ejes reales correspondientes a su configuración. Puede emplearse, por ejemplo, la metodología establecida en la norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana [4], basada en las relaciones obtenidas en diferentes ensayos entre el efecto del deterioro producido sobre el firme por un eje cualquiera y el que produciría el eje tipo.

3.2. Diagnóstico del estado del firme

El diagnóstico del estado del firme es el proceso orientado en primer lugar a la identificación de sus patologías, de su localización y su naturaleza, llegando a ellas a través de los diversos síntomas y signos presentes en el pavimento, sobre la base de los datos y hechos recogidos y ordenados sistemáticamente, que permitan juzgar mejor qué es lo que está pasando y, además, determinar cuál es la evolución probable o la tendencia de su estado o patologías.

Como parte fundamental del proceso, debe realizarse tanto una inspección visual del firme, como una auscultación con equipos, preferiblemente de alto

rendimiento, en la que se midan las magnitudes más adecuadas para valorar el estado estructural. Es importante señalar que ambas son preceptivas y complementarias entre sí, y en ningún caso son excluyentes.

3.2.1 Auscultación del firme

La auscultación del firme es el reconocimiento de las características estructurales o superficiales de un firme mediante equipos específicos de medida, y su objetivo es proporcionar información precisa y cuantitativa acerca del estado de tales características. A efectos del dimensionamiento de la rehabilitación estructural de un firme con pavimento bituminoso, se considera imprescindible la auscultación de los siguientes parámetros:

- Regularidad superficial (IRI).
- Regularidad transversal (roderas).
- Cuenco de deflexión, mediante el empleo de un equipo tipo deflectómetro de impacto.

Es, sin duda, la auscultación de la capacidad estructural a partir de la deflexión la que requiere un mayor tratamiento, pese a ser también la que mayor importancia, por extensión, recibe en la norma 6.3-IC. Como ya se ha indicado, la auscultación de la deflexión debe realizarse inexcusablemente mediante un equipo tipo deflectómetro de impacto, registrando las deflexiones bajo el punto de aplicación de la carga y en otros seis puntos situados usualmente a una distancia radial del mismo de 20, 30, 45, 60, 90, y 120 cm respectivamente (aunque dicha configuración es variable en función del modelo y de la casa que lo fabrica), lo que permite obtener el denominado cuenco de deflexión.

Por una parte, como es sabido, las mezclas bituminosas tienen un comportamiento reológico complejo, con características visco-elasto-plásticas, conformando un sistema que responde a la aplicación de las cargas en función no sólo de la magnitud de las mismas, sino de la frecuencia con que son aplicadas (en definitiva, del tiempo de aplicación). Por tanto, es espe-

cialmente relevante utilizar equipos que permitan conocer el estado del firme bajo una carga lo más parecido posible a la carga real de los ejes del tráfico pesado que solicitan la carretera. En este sentido, los deflectómetros de impacto son los equipos adecuados para la auscultación del estado estructural de la carretera, puesto que simulan el paso de un eje de 13 t a una velocidad de paso comprendida aproximadamente entre 70 y 80 km/h.

Por otro lado el firme es un sistema estructural complejo, en el que cada una de sus capas presenta un comportamiento diferente, de acuerdo al fin al que este destinada de acuerdo a su posición dentro del conjunto de la estructura y, por consiguiente, el deterioro del firme puede producirse en cualquiera de ellas. El deflectómetro de impacto es el único equipo que permite obtener los datos necesarios (el denominado cuenco de deflexión) para establecer un diagnóstico diferencial respecto al estado del firme, esto es, permite establecer cuál o cuáles capas son las que están deterioradas, y con qué magnitud.

3.2.2 Empleo de métodos analíticos en el proceso del diagnóstico del firme

Una vez llegados a este punto, la cuestión ahora es mostrar cómo pueden emplearse los métodos analíticos como herramienta en el proceso de diagnóstico del estado del firme. Para ello, se parte del cuenco de deflexión obtenido mediante un deflectómetro de impacto. Existen, básicamente, dos técnicas de interpretación del cuenco de deflexiones (que bajo el punto de vista del autor no son excluyentes, sino que la mejor opción es considerarlas en conjunto) a estos efectos: las técnicas de cálculo inverso y las técnicas de interpretación de su forma. La primera de ellas es más precisa y ofrece una información más detallada y cuantificable, pero es más compleja y su empleo requiere una amplia experiencia en la misma; en cambio, la segunda es de aplicación más sencilla, aunque sus resultados tienen un carácter algo más vago.



Figura 2.

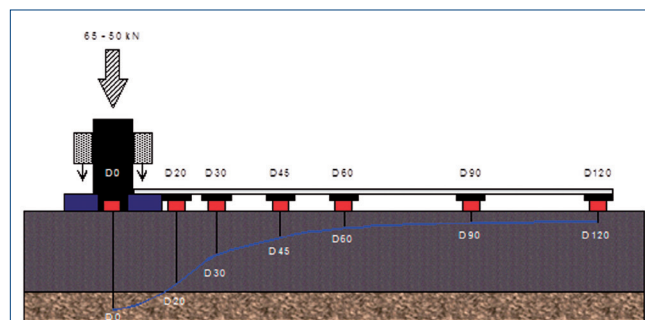


Figura 3.

El proceso conocido como cálculo inverso (*back-calculation*), permite determinar los valores de los módulos elásticos de las capas que constituyen el firme a partir del cuenco de deflexión y de los espesores de éstas, y, por tanto, el estado estructural en el momento de la medición. Consiste, básicamente, en aplicar reiteradamente el modelo de cálculo analítico (cálculo directo o *forward-calculation*) a un sistema multicapa de espesores y coeficientes de Poisson conocidos, partiendo de unos módulos elásticos estimados por el ingeniero, para determinar las deflexiones teóricas; éstas se comparan con las deflexiones medidas, y si ambos cuencos no satisfacen el ajuste establecido previamente por el usuario, se reajustan los módulos elásticos (empleando algún algoritmo de optimización) para proceder a una nueva iteración. El proceso finaliza cuando se logra un ajuste de los cuencos de deflexión dentro de las tolerancias marcadas por el usuario, cuando los módulos permanecen invariables en dos iteraciones sucesivas, o cuando se alcanza un número de iteraciones máximo sin que se produzca ninguno de los dos hechos anteriores.

Evidentemente, en el cálculo inverso la solución no es exacta ni única, y se requieren una serie de iteraciones y de condiciones para ajustar la solución a criterios de ingeniería de firmes; estas condiciones deben ser impuestas por el ingeniero, y consisten generalmente en modelizar el conjunto del firme según un sistema multicapa, en establecer los módulos elásticos iniciales (es decir, los que se emplean en la primera iteración), y en acotar las soluciones obtenidas (por ejemplo,

estableciendo un límite superior para el valor del módulo elástico de una capa granular, o realizando ensayos de laboratorio sobre los materiales que permitan fijar su valor). Es fundamental, en todo caso, la definición precisa de los espesores de las capas, dada la gran sensibilidad de los resultados respecto de este parámetro.

Una vez conocidos los módulos de las capas que constituyen el firme, es posible establecer, en primer lugar, qué capa o capas son las que presentan un deterioro estructural, mediante comparación con los valores habituales considerados en el dimensionamiento de firmes o, mejor aún, con los obtenidos en la auscultación del estado cero de la carretera (esto es, el estado de la carretera inmediatamente después de su construcción y antes de su puesta en servicio). Con ellos, será posible determinar qué alternativa de rehabilitación es más adecuada: por ejemplo, es posible establecer si hay problemas en la explanada (incluso se puede intuir su estado de humedad) y por tanto es necesario llegar hasta ella para sanear, si es suficiente la eliminación parcial y la reposición, etc. Posteriormente, estos módulos serán la base de partida para dimensionar la rehabilitación seleccionada.

Las técnicas de interpretación de la forma del cuenco se basan en analizar el tamaño, la pendiente y la curvatura de las diferentes zonas que pueden distinguirse en el cuenco. El tamaño y la forma del cuenco de deflexión depende de varios parámetros, como por ejemplo la capacidad estructural, la configuración de la carga aplicada y su magnitud, su duración, la temperatura, etc. Existen una serie de parámetros que resultan

de interés para su interpretación; entre ellos, los más conocidos, por su utilidad en la técnica de interpretación del estado del firme, son:

- RoC (*Radius of curvature*)- Radio de curvatura: parámetro propuesto por G.L. Dehlen en 1961 [13] y posteriormente modificado para adaptarlo a las deflexiones obtenidas por un deflectómetro, que está relacionado con la zona de curvatura positiva, y que refleja la rigidez y, en definitiva, la capacidad estructural de las capas superiores del firme (pavimento fundamentalmente, y base). Se calcula según la fórmula siguiente (donde $L = 200$ mm):

$$RoC = \frac{L^2}{2 \cdot D_0 \cdot (1 - D_{20}/D_0)}$$

- BLI (*Base layer index*) - Índice de la capa de base: este parámetro, pretende reflejar la pendiente del cuenco en las zonas próximas al punto de aplicación de la carga; como el radio de curvatura, es un indicador del estado de la capa de base y de la efectividad de la distribución de cargas a través del firme. Se obtiene como la diferencia entre la deflexión en el punto de aplicación de la carga y la deflexión a 30 cm del mismo:

$$BLI = D_0 - D_{30}$$

- MLI (*Middle layer index*) - Índice de la capa de la zona media: está relacionado con las capas de subbase y refleja la pendiente media, calculada como la diferencia entre las deflexiones a 30 y a 60 cm del punto de aplicación de la carga:

$$MLI = D_{30} - D_{60}$$

- *Lower layer index* (LLI) - Índice de las capas inferiores: a pesar de su nombre, que parece hacer referencia a capas situadas en la posición inferior de la estructura del firme, este parámetro está relacionado con la capacidad de soporte de la explanada. También valora la pendiente media del cuenco en dicha zona, y se calcula como la diferencia entre las deflexiones a 60 y a 90 cm del punto de aplicación de la carga:

$$LLI = D_{60} - D_{90}$$

- Área del cuenco de deflexión: es una herramienta de interés en la observación de la capacidad estructural de un firme, establecida por el ingeniero Mario Hoffman en 1981 durante el desarrollo de su tesis doctoral. El Área puede considerarse como un índice representativo de la forma del "cuenco de deflexión"; su valor representa el área normalizada de una sección longitudinal del "cuenco de deflexión", comprendida entre el punto de aplicación de la carga y un punto situado a 90 cm del mismo; dividiendo el valor del área de esta sección entre la deflexión medida bajo carga se normaliza su valor. De este modo, el Área no es más que la longitud del lado de un rectángulo, cuyo otro lado mide D_0 , y tal que su área es aproximadamente igual al área encerrada por el "cuenco de deflexión". Utilizando la aproximación de los trapecios para determinar el área, su valor (en mm) puede obtenerse de la siguiente fórmula:

$$\text{Área} = \frac{150}{D_0} \cdot (D_0 + 2 \cdot D_{30} + 2 \cdot D_{60} + D_{90})$$

La Tabla 1 ofrece unas indicaciones acerca de la interpretación del valor del Área, cuando se analiza conjuntamente con la deflexión bajo carga (D_0).

Estos parámetros son extremadamente útiles cuando se dispone del valor de referencia de los mismos

establecido para la sección teórica en el proyecto o, aún mejor, obtenidos a partir de la auscultación del estado cero de la carretera.

3.3. Dimensionamiento de la solución elegida

Con la metodología indicada en el apartado anterior, junto con los resultados de la inspección visual correspondiente, es posible establecer zonas en las que la debilidad estructural se debe a la explanada, y zonas en las que se debe a las capas de la estructura del firme, de manera que es factible y sencillo determinar la actuación de rehabilitación más adecuada, así como la necesidad de actuaciones en profundidad. Así será posible determinar si será más conveniente la eliminación parcial o total de alguna de las capas y su reposición con mezcla bituminosa, la extensión de un cierto espesor de recrecimiento, o una combinación de ambas (las tres alternativas más habituales en la rehabilitación estructural).

El proceso de dimensionamiento de la rehabilitación debería, en primer lugar, determinar los módulos de las distintas capas del firme empleando el cálculo inverso sobre los datos obtenidos por un deflectómetro de impacto para, a continuación utilizando el cálculo directo, calcular la respuesta del firme ante el paso de un eje tipo. Empleando las funciones de transferencia adecuadas, se puede determinar el número de aplicaciones de la carga tipo que es capaz de resistir la sección; si este número es inferior al requerido (obtenido a partir de un estudio de tráfico futuro), será necesaria la rehabilitación estructural de la sección. Siguiendo un proceso iterativo de cálculo directo, incorporando sucesivamente pequeños espesores de mezcla bituminosa a la sección de firme existente, se puede determinar el espesor de recrecimiento necesario, de forma que el número de aplicaciones de carga resistido por la sección rehabilitada sea superior al número de ciclos de carga previsto para la misma en su período de diseño.

En el proceso, es necesario tener en cuenta que, llegado el momento de plantearse la rehabilitación estructural del firme, las capas que componen el mismo no mantienen sus características iniciales, sino que los valores de sus módulos disminuyen, al tiempo que van acumulando daño o, en otras palabras, van agotando parte de su vida útil. En el dimensionamiento analítico de firmes se suele emplear para tener en cuenta este efecto de acumulación de daño la ley de Miner, según la cual si una capa i con un módulo de elasticidad E_i es capaz de soportar N_{fi} aplicaciones de la carga tipo j , la fracción de daño producido por n_{ij} aplicaciones de dicha carga será $d_{ij} = n_{ij} / N_{fi}$ de modo que el agotamiento estructural de la capa se producirá cuando se verifique la igualdad:

$$\sum_{i,j} d_{ij} = 1$$

4. Ejemplo de aplicación

En este apartado se desarrolla un ejemplo de cálculo en el que se desarrollan, de forma eminentemente didáctica, algunas de las cuestiones planteadas en el trabajo, relacionadas con las técnicas de cálculo inverso y con el empleo de los diversos parámetros del cuenco de deflexión.

Supongamos una sección de firme constituida por 30 cm de mezclas bituminosas en caliente sobre 25 cm de zahorra artificial, apoyadas sobre una explanada de tipo E_2 . De los datos del proyecto, se sabe que dicha sección ha sido dimensionada para el paso de $10,4 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 13 t.

Para este dato del tráfico, los parámetros críticos admisibles, de acuerdo a las leyes de fatiga consideradas en

Tabla 1.

Parámetro		Interpretación	
Área	D_0	Firme	Explanada
Bajo	Bajo	Insuficiente	Suficiente
Bajo	Alto	Insuficiente	Insuficiente
Alto	Bajo	Suficiente	Suficiente
Alto	Alto	Suficiente	Insuficiente

Tabla 2. Resultados de la auscultación estructural del "estado cero".

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	M _R	RoC	BLI	MLI	LLI	ÁREA
[μm]							[MPa]	[m]	[μm]	[μm]	[μm]	[mm]
301	266	249	227	206	169	139	107	571	52	53	37	688

Tabla 3. Resultados para la zona singular detectada en el "estado cero".

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	M _R	RoC	BLI	MLI	LLI	ÁREA
[μm]							[MPa]	[m]	[μm]	[μm]	[μm]	[mm]
438	401	383	357	332	284	242	61	541	55	51	48	737
46 %	51 %	54 %	57 %	61 %	68 %	74 %	43 %	5 %	6 %	19 %	30 %	7 %

la norma 6.1-IC "Secciones de firme" ($\epsilon_h = 6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$ para las mezclas bituminosas y $\epsilon_z = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$ para la explanada), son para las mezclas bituminosas $\epsilon_h = 85$ [μ] y para la explanada $\epsilon_z = 234$ [μ].

Se dispone, además, de los resultados de la auscultación estructural del estado cero de la carretera, realizada inmediatamente antes de su puesta en servicio; para un determinado tramo de carretera, se tiene que el cuenco de deflexión representativo obtenido mediante un deflectómetro de impacto, para una carga de 6,5 t, junto con sus parámetros asociados, es el reflejado en la Tabla 2.

No obstante, en una zona localizada, con una longitud del orden de 80 m, de dicho tramo se han obtenido los valores de la Tabla 3 (en la fila inferior se muestra su variación respecto al valor de referencia del estado cero).

Del análisis del cuenco y de los diferentes parámetros, puede deducirse que los valores elevados de deflexión tienen su origen en la explanada, que por algún motivo no tiene la capacidad de soporte correspondiente al resto del tramo. Además, la capa de zahorra también se ha visto afectada, probablemente por disponer de un soporte menos rígido, que influye en su propia rigidez. A esta conclusión puede llegarse a partir de los siguientes análisis:

- Todas las deflexiones han aumentado en el segundo caso respecto al valor representativo del tramo. No obstante, el incremento es notable en la D₁₂₀ (74 %), directamente relacionada con la explanada del firme; a partir de ese valor, el cálculo de M_R ya muestra un

Tabla 4. Resultados del cálculo inverso en el "estado cero".

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	E _{MB}	E _{ZA}	E _{EXP}
301	266	249	227	206	169	139	5.421	297	110

Tabla 5. Resultados del cálculo inverso en la zona singular.

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	E _{MB}	E _{ZA}	E _{EXP}
438	401	383	357	332	284	242	5.402	250	60

evidente descenso en la capacidad de soporte de la explanada (43 %).

- Los valores de RoC y de BLI apenas experimentan cambio (5 % y 6 % respectivamente), lo cual es un indicador de que las capas superiores no presentan ningún problema.
- Tanto los valores de MLI como de LLI han sufrido un incremento más notable (19 % y 30 % respectivamente), lo que indica que el problema, respecto al valor representativo del tramo, se encuentra fundamentalmente en la explanada y en parte esto ha afectado también a la capa de zahorra artificial.
- Del mismo modo puede obtenerse una indicación a partir de la tabla de tendencias del parámetro Área respecto a la deflexión D₀.

Por otro lado, aplicando las técnicas de cálculo inverso a ambos cuencos de deflexión, se obtienen los valores indicados en las Tablas 4 y 5 para los módulos de sus capas.

Como puede observarse, dichos valores corroboran cuantitativamente las conclusiones extraídas a partir del análisis cualitativo de los parámetros.

Aplicando el cálculo directo a las secciones de firme consideradas, con los valores de los módulos de las

capas obtenidos mediante cálculo inverso, se obtienen los siguientes valores de los parámetros críticos de cálculo:

- Tramo representativo:
 $\epsilon_h = 88$ [μ] y $\epsilon_z = 208$ [μ]
- Zona singular:
 $\epsilon_h = 98$ [μ] y $\epsilon_z = 278$ [μ]

Comparando estos valores con los máximos admisibles ($\epsilon_h = 85$ [μ] y $\epsilon_z = 234$ [μ]) puede deducirse que el tramo considerado presenta un dimensionamiento ajustado al tráfico solicitante, en términos característicos (aunque ligeramente infradimensionada, probablemente porque los módulos considerados para las mezclas bituminosas en el proyecto no se están dando en la realidad, o porque se ha sobrevalorado el módulo de la zahorra artificial o de la explanada), pero es evidente que la zona singular no presenta las características suficientes para resistir las solicitaciones previstas durante la vida de servicio.

Puede resultar tentador pensar que se puede compensar dicha falta de capacidad estructural mediante la extensión de un determinado espesor de mezcla bituminosa, de modo que se reduzcan las tensiones en ambas capas; sin embargo, gracias al empleo de las técnicas racionales para el diagnóstico del estado del firme se ha

Tabla 6. Resultados de la auscultación estructural mediada la vida teórica de diseño.

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	M _R	RoC	BLI	MLI	LLI	ÁREA
[μm]							[MPa]	[m]	[μm]	[μm]	[μm]	[mm]
361	312	290	262	236	190	154	96	408	71	54	46	666
20 %	17 %	16 %	15 %	15 %	12 %	11 %	10 %	29 %	37 %	36 %	24 %	3 %

Tabla 7. Resultados de la auscultación estructural mediada la vida teórica de diseño en la zona singular.

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	M _R	RoC	BLI	MLI	LLI	ÁREA
[μm]							[MPa]	[m]	[μm]	[μm]	[μm]	[mm]
591	509	472	426	384	312	254	58	244	119	88	72	664
96 %	91 %	90 %	88 %	86 %	85 %	83 %	45 %	57 %	129 %	105 %	95 %	3 %

detectado que esta solución puede resultar inútil, ya que se ha detectado un problema en la explanada del que se desconoce, en principio, su origen, y que puede continuar su evolución, por lo que extender encima sucesivas capas de mezcla bituminosa no resultaría en más que en una pérdida de tiempo y de dinero.

Transcurridos 10 años desde su puesta en servicio, se estima que han circulado sobre el tramo en cuestión $4,46 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 13 t. Aunque aún faltan 10 años para que se cumpla su teórica vida de servicio, se ha comenzado a detectar ciertos problemas de fisuración y en las campañas de auscultación realizadas anualmente para el seguimiento del estado del firme, se han obtenido los cuencos representativos reflejados en las Tablas 6 y 7, correspondientes a distintas zonas dentro del mismo tramo inicial.

Y aplicando las técnicas de cálculo inverso a ambos cuencos de deflexión, se obtienen los valores de las Tablas 8 y 9 para los módulos de sus capas.

En ambos casos, pueden realizarse análisis análogos a los efectuados en la auscultación inicial con los parámetros de forma de los cuencos estructurales y los resultados del cálculo inverso. En el primer caso, se observa que fundamentalmente existe un agotamiento de las capas bituminosas superiores, debido fundamentalmente a la fatiga acumulada. Además, se observa una ligera disminución de los módulos tanto de las capas de zahorra artificial como de la explanada, lo que probablemente se deba a un efecto de descompactación al verse

Tabla 8. Resultados del cálculo inverso.

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	E _{MB}	E _{ZA}	E _{EXP}
361	312	290	262	236	190	154	3.866	260	100

Tabla 9. Resultados del cálculo inverso en la zona singular.

D ₀	D ₂₀	D ₃₀	D ₄₅	D ₆₀	D ₉₀	D ₁₂₀	E _{MB}	E _{ZA}	E _{EXP}
591	509	472	426	384	312	254	2.230	205	60

incrementados los esfuerzos de tracción en las mismas, superando para la relación de tensiones verticales a tensiones horizontales el valor límite definido por el ángulo de rozamiento de los materiales que las constituyen.

En el segundo caso, puede observarse claramente que la merma de capacidad portante de la explanada ha llevado al agotamiento prematuro al resto de las capas. Aplicando de nuevo el cálculo directo a las secciones de firme consideradas, con los valores de los módulos de las capas obtenidos mediante cálculo inverso, se obtienen los siguientes valores de los parámetros críticos de cálculo:

- Tramo representativo:
 $\epsilon_h = 115 [\mu]$ y $\epsilon_z = 259 [\mu]$
- Zona singular:
 $\epsilon_h = 184 [\mu]$ y $\epsilon_z = 436 [\mu]$

Por otro lado, si se calculan los valores máximos admisibles para los parámetros críticos para que la sección sea capaz de soportar el tráfico previsto durante los siguientes 10 años ($10,4 \cdot 10^6 - 4,46 \cdot 10^6 = 5,94 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 13 t), se obtiene que éstos son para las mezclas bituminosas $\epsilon_h = 99 [\mu]$ y para la explanada $\epsilon_z = 274 [\mu]$. Por tanto, y centrando el análisis ya únicamente en el tramo representativo (la zona singular, como se ha indicado, requiere una reparación

en profundidad, llegando al saneo de la explanada), se considera necesaria la rehabilitación de la sección, dado que ninguna de las capas será capaz de soportar el tráfico previsto.

Por razones didácticas, se considera en este caso que el procedimiento de rehabilitación empleado será la extensión de un recrecimiento con mezcla bituminosa sobre el pavimento existente. De esta forma, se deberá seguir un procedimiento iterativo de cálculo directo, incrementando sucesivamente el espesor de mezcla bituminosa a la sección de firme existente, hasta que dicha sección sea capaz de resistir las solicitaciones previstas (en este caso, la rehabilitación persigue extender la vida útil de la sección otros 10 años, de modo que se alcance el período de diseño inicialmente planteado). En este sentido, hay que considerar que las capas del firme existente ya han soportado el paso de un determinado número de ejes y que por tanto, han agotado parte de su vida teórica, de acuerdo a la ley de Miner, por lo que habrá que tenerlo en cuenta en el cálculo.

En este caso, y centrándonos en la capa de mezcla bituminosa, como se ha indicado, en el estado cero se tenía que $\epsilon_h = 88 [\mu]$, lo que corresponde, de acuerdo con las ley de fatiga con-

Tabla 10. Parámetros críticos calculados para diferentes espesores de recrecimiento.

Espesor [cm]	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
ϵ_h	108	102	97	92	88	83	80	76

siderada, a $9,11 \cdot 10^6$ ejes equivalentes de 13 t; dado que en el momento en que se plantea la rehabilitación, ha soportado $4,46 \cdot 10^6$ ejes equivalentes, su

$$\frac{n_{rec}}{N_{rec}} = 1 - \frac{n_{actual}}{N_{actual}} \rightarrow \frac{n_{rec}}{N_{rec}} = 1 - \frac{4,46 \cdot 10^6}{9,11 \cdot 10^6} = 0,51$$

vida remanente es de:

por lo que la sección rehabilitada debe

$$\frac{n_{rec}}{N_{rec}} = 0,51 \rightarrow \frac{5,94 \cdot 10^6}{N_{rec}} = 0,51 \rightarrow N_{rec} = 11,6 \cdot 10^6$$

dimensionarse de modo que:

lo que, de acuerdo a las leyes de fatiga consideradas, supone un valor máximo admisible del parámetro crítico para las mezclas bituminosas de $\epsilon_h = 82 [\mu]$.

En la Tabla 10 se indican los valores de los parámetros críticos para la mezcla bituminosa calculados para diferentes secciones, con distintos espesores de mezcla bituminosa sobre el pavimento existente (considerando idénticas características estructurales para la mezcla bituminosa nueva que las determinadas en la auscultación estructural del estado cero).

Por tanto, para prolongar 10 años más la vida útil de la sección considerada, bastaría con extender sobre el pavimento existente un espesor de 7 cm de mezcla bituminosa.

5 Conclusiones

A lo largo del desarrollo del presente trabajo se han puesto de manifiesto una serie de reflexiones que, a juicio del autor, deberían estar presentes en el proceso de diagnóstico del estado del firme y en el dimensionamiento de su rehabilitación estructural.

Siguiendo como base la guía metodológica que se establece en la norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes", se han incluido algunos conceptos de análisis racional (o analítico) de firmes, que se han mostrado como una herramienta muy útil en el proceso de concepción de la rehabilitación estructu-

ral. El empleo de dichos métodos no sólo facilita elaborar un diagnóstico diferencial sobre el estado del firme, indicando su insuficiencia estructural y de manera precisa cual es la causa de la misma, sino que permite dimensionar, de forma eficaz, las actuaciones precisas para subsanarla. Se ha desarrollado, además, un ejemplo didáctico en el que se ha puesto de manifiesto, de forma práctica, la utilidad de estos métodos.

Este proceso es susceptible de ser afinado en diversos puntos, en los que probablemente el técnico interesado requiera mayor profundidad de exposición, pero como se ha indicado en la introducción, tanto por motivos didácticos como de limitación de extensión, se ha pretendido únicamente mostrar de manera sucinta sus posibilidades y su aplicabilidad en la práctica habitual del dimensionamiento de rehabilitaciones estructurales del firme, quedando como trabajo pendiente para futuras publicaciones el desarrollo de una metodología detallada y concisa.

6. Bibliografía

- [1] DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS, MINISTERIO DE FOMENTO. (2003). Norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes". ORDEN FOM/3459/2003, de 28 noviembre, publicada en el BOE de 12 de diciembre de 2003.
- [2] DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS, MINISTERIO DE FOMENTO. (2003). Norma 6.1-IC "Secciones de firme". ORDEN FOM/3460/2003, de 28 noviembre, publicada en el BOE de 12 de diciembre de 2003.
- [3] N/A. (2008). Mechanistic-Empirical pavement design guide - A manual of practice (interim edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- [4] DIVISIÓN DE CARRETERAS DE LA
- [5] DEL VAL MELÚS, M.A. ET AL. (2004). Ingeniería de carreteras (volumen II). McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- [6] BURMISTER, DONALD. M. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. Journal of Applied Physics (Volume:16, Issue:5, pp: 296-302).
- [7] CRESPO DEL RÍO, R., BARDASANO GONZÁLEZ, R. (2006). Novedades y alternativas en firmes y pavimentos - Novedades y propuestas para una ingeniería avanzada de firmes. Institute for International Research (IIR).
- [8] CRESPO DEL RÍO, R. (1986). Caracterización del tráfico en el dimensionamiento de firmes - El espectro de vehículos pesados en España. Cuadernos de investigación C15 (CEDEX).
- [9] DEL VAL MELÚS, M.A. (2004). Aspectos prácticos en la aplicación de la norma 6.3-IC de rehabilitación de firmes. VI Congreso Nacional de Firmes: Normalización e Innovación (Asociación Española de la Carretera).
- [10] HUANG, Y.H. (2004). Pavement analysis and design (second edition). Prentice Hall.
- [11] CARVALHO, R. ET AL. (2012). Simplified techniques for evaluation and interpretation of pavement deflections for network-level analysis. FHWA-HRT-12-023 (Federal Highway Administration).
- [12] HORAK, E.; EMERY, S. (2006). Falling weight deflectometer bowl parameters as analysis tool for pavement structural evaluations. 22nd Australian Road research Board (ARRB) International Conference.
- [13] DEHLEN. G.L. (1961). The use of the Benkelman beam for the measurement of deflections and curvatures of a road surface between dual wheels. CSIR, Special report, R.2 NITRR, RS/11/61. ❖