

DIMENSIONAMIENTO ANALÍTICO DE PAVIMENTOS BITUMINOSOS SOBRE PUENTES DE HORMIGÓN

María Castro Malpica.

Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

Departamento de Ingeniería Civil: Transportes. Universidad Politécnica de Madrid.

RESUMEN

El dimensionamiento analítico de los pavimentos sobre puentes tiene la dificultad de no poder emplear directamente los métodos tradicionales de la Mecánica de Firmes. En este artículo se presenta un nuevo método de dimensionamiento analítico de pavimentos bituminosos sobre tableros de puentes de hormigón. Se puede aplicar a pavimentos situados sobre tableros de vigas, losa y cajón. Asimismo, se puede emplear cualquiera que sea el grado de adherencia entre pavimento y tablero. En esencia, se basa en simular el tablero mediante un sistema bicapa. La determinación del sistema bicapa equivalente al tablero del puente se puede hacer mediante un proceso iterativo o utilizando los valores aquí expuestos.

ABSTRACT

Traditional methods based on structural design of pavements cannot be applied to the analytical design of pavements over bridge decks. In this paper a new method for the analytical design of bituminous pavements over concrete bridge decks is presented. It can be applied to pavements over girder, slab and box girder bridges. Also, it can be used whatever the degree of adherence considered between pavement and deck. The philosophy of the method consist of modelling the deck as a two layer system. The identification of the two layer system equivalent to the bridge deck can be made using either an iterative process or the values proposed in this article.

1. INTRODUCCIÓN

En numerosos países no hay normativa específica para el pavimento de los puentes y es práctica muy usual limitarse a colocar a tal fin la misma capa de rodadura del resto de la carretera, sin tener en cuenta la diferencia de rigidez existente entre ambos soportes. En algunos países existen recomendaciones que suelen ir más encaminadas

a la definición de la impermeabilización que a la del pavimento en sí, adoptando para éste mezclas bituminosas de la normativa general. En contadas ocasiones, dichas recomendaciones incluyen un catálogo de secciones específicas para pavimentos de puentes.

El dimensionamiento analítico de pavimentos de puentes no se puede hacer mediante la aplicación directa de los métodos usuales de la Mecánica

Comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de noviembre de 1997.

Recibido en ROP:
mayo de 1997

ca de Firmes al no cumplirse sus hipótesis. Por otra parte, apenas existen trabajos en el campo particular del dimensionamiento de los pavimentos de puentes. Ello puede ser debido a tratarse de un problema que está en la frontera entre la ingeniería de estructuras y el dimensionamiento de firmes y para el cual, debido a su complejidad, hasta fechas relativamente recientes no se ha dispuesto de herramientas suficientes con las que abordarlo.

El comportamiento de los pavimentos de los puentes es a menudo insatisfactorio, apareciendo fallos derivados en gran medida de no considerar en las soluciones adoptadas la flexibilidad del puente. En este artículo se presenta un nuevo método de dimensionamiento analítico de pavimentos bituminosos sobre puentes de hormigón que tiene en cuenta este factor. Se ha pretendido que pueda ser de utilidad para el proyecto de nuevos pavimentos de puentes, así como en la conservación o rehabilitación de los antiguos.

Debe dejarse bien claro que, en última instancia, el proyecto de pavimentos sobre puentes no puede basarse exclusivamente en la fría aplicación de un método analítico, sino que han de tenerse muy en cuenta los aspectos particulares de cada obra y los condicionantes económicos, así como, en definitiva, la experiencia acumulada por cada proyectista o constructor. Sin embargo, un método analítico puede ser de gran ayuda, por ejemplo, en la comparación de diversas opciones o en el estudio de nuevos pavimentos.

El contenido de este artículo está basado en la Tesis Doctoral de la autora, para cuya realización contó con una beca de la Demarcación de Madrid del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Paralelamente a este trabajo, se han elaborado unas "Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Pavimentos de Puentes" para la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

2 LOS PAVIMENTOS DE LOS PUENTES

Las funciones principales del pavimento de un puente son proporcionar al usuario una buena regularidad superficial y una adecuada resistencia al deslizamiento a la vez que presentar una durabilidad suficiente. Pero, además, el pavimento protege al tablero del puente de la acción directa del tráfico y de la intemperie, especialmente del agua, la helada y los fundentes que se puedan emplear para combatirla. Con el fin de mejorar esta función de protección del tablero se está generalizando la colocación de una capa de impermeabilización antes de construir el pavimento propiamente dicho. Para limitar la carga muerta sobre la estructura, el pavimento (incluyendo la impermeabilización del tablero en caso de ejecutarse ésta) suele tener espesor reducido.

En síntesis, los pavimentos bituminosos sobre puentes están constituidos por una o varias capas de materiales asfálti-

cos sobre un tablero que previamente ha sido tratado con un riego de imprimación o bien impermeabilizado.

La impermeabilización consiste en un tratamiento superficial sobre el tablero del puente de manera que se forma una membrana cuya misión es aislarlo del agua. Atendiendo al procedimiento de formación de la membrana se pueden clasificar en dos grandes grupos: tratamientos "in situ" y tratamientos con láminas prefabricadas.

Entre los tratamientos "in situ" más empleados están los constituidos por materiales bituminosos, aunque también se utilizan tratamientos no bituminosos y tratamientos mixtos.

Dentro de los materiales de naturaleza bituminosa existe una enorme variedad de soluciones, que fundamentalmente se pueden agrupar en dos tipos: másticos bituminosos en caliente y morteros bituminosos en frío.

Entre los materiales no bituminosos se encuentran las resinas epoxy, los poliuretanos y los poliésteres. Más utilizadas que estas impermeabilizaciones con resinas sintéticas son las constituidas por materiales mixtos como la brea-epoxy.

Existe una gran variedad de pavimentos bituminosos sobre tableros de hormigón. El número de capas, composición de las mezclas bituminosas y espesores suelen variar bastante de unos a otros países. En muchas ocasiones se emplea como pavimento sencillamente la misma capa de rodadura del firme de la carretera.

Generalmente se coloca como pavimento una o varias capas de mezclas bituminosas cuyo espesor total suele variar entre 3 y 10 cm (en España habitualmente entre 5 y 7 cm). Sobre la impermeabilización, con el fin de evitar el posible punzonamiento de ésta por las capas superiores y, en ocasiones, completar su estanquidad se puede colocar una capa, llamada de protección (o intermedia), de asfalto fundido, hormigón bituminoso o arena-betún. Encima de la capa de protección se sitúa, en caso necesario, una nueva capa para hacer un repavimentado, aunque en ocasiones se utiliza la capa de protección o intermedia para este fin. Por último, se coloca la capa de rodadura que puede estar constituida por:

- ▼ Mezclas convencionales tipo hormigón bituminoso.
- ▼ Asfaltos fundidos con adición de asfalto natural y gravillas incrustadas.
- ▼ Microaglomerados discontinuos con betún modificado.
- ▼ Mezclas porosas.
- ▼ Microaglomerados en frío con emulsiones de betún modificado y fibras.
- ▼ Hormigones bituminosos con granulometría cerrada y betunes modificados.

Para la pavimentación de tableros de gran superficie se han utilizado en ocasiones procedimientos de impermeabilización y pavimentación de alto rendimiento, en los que se ejecuta en una sola intervención todo el proceso. Se trata de procesos patentados, que en líneas generales consisten en: riego de

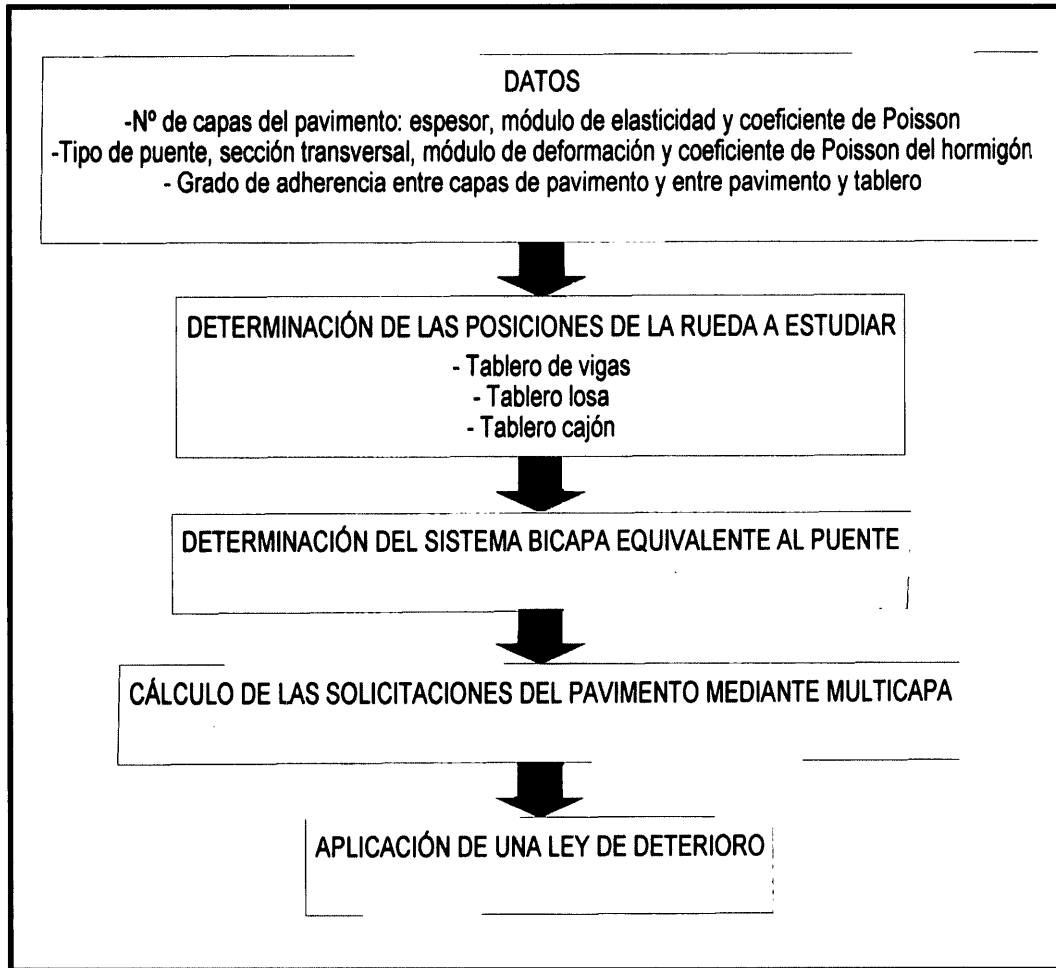


Figura 1. Proceso de dimensionamiento.

imprimación sobre el tablero; colocación de un microaglomerado bituminoso; impermeabilización por una película de betún modificado; riego de arena sobre la impermeabilización; y por último, una capa de rodadura formada por una mezcla con betún polímero. En Francia y en Suiza se ha utilizado también un procedimiento de alto rendimiento que tiene la particularidad de colocar bajo la impermeabilización una capa de mezcla porosa con el fin de evitar la formación de ampollas.

3. MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO

Entre las características del puente que deberían considerarse en el proyecto del pavimento, la flexibilidad estructural del puente es un factor esencial pues afecta a la flexibilidad del pavimento, que debe ser capaz de "seguir" las deformaciones de la estructura que le sirve de soporte. En este sentido, es necesario referir que, hasta el momento de elaborar este método, de los tres métodos analíticos de dimensionamiento existentes (De Backer [4], Tabchi [12], Battiatto, Ronca y Verga

[1]) dos de ellos siguen esta línea. El tercero está enfocado al cálculo de deformaciones permanentes del pavimento y sus planteamientos son muy distintos. La flexibilidad del puente está relacionada con el tipo estructural, la geometría y las características resistentes del hormigón.

El método que aquí se presenta se ha desarrollado para pavimentos bituminosos situados sobre los tipos de puentes de hormigón más utilizados: vigas, losa y cajón. Se estima que los puentes de hormigón en sus modalidades de puentes de vigas, losa y cajón, constituyen más del 90% de todos los puentes que se resuelven con este material [7]. Según el Inventario realizado por el MOPTMA los puentes de vigas, losa y con sección cajón representaban en 1995 aproximadamente el 93% de todos los de la red estatal española y el 96% si se tenían en cuenta únicamente los de hormigón [9].

El dimensionamiento analítico de un pavimento consiste en esencia, en la determinación de las tensiones y/o deformaciones del pavimento y la aplicación de una ley de deterioro. El método que a continuación se describe sirve para calcular el estado tensodeformacional del pavimento con una precisión aceptable para el proyecto. Además se ha procurado que las herramientas y los conocimientos necesarios para emplearlo permitan una aplicación práctica fácil para los ingenieros de proyecto.

No se trata de un método pensado para tareas de investigación. Si se pretende conseguir resultados de tensiones y deformaciones de mayor precisión o, por ejemplo, estudiar con detalle la zona de contacto entre pavimento y tablero sería recomendable emplear un modelo de elementos finitos [3], lo que supondría un mayor coste de tiempo, tanto de preparación del modelo como de análisis de resultados.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método utiliza una herramienta clásica de la Mecánica de Firmes, como es el análisis multicapa, pero modificado de forma que se pueda considerar la flexibilidad del puente, sustituyendo el tablero por un sistema bicapa equivalente.

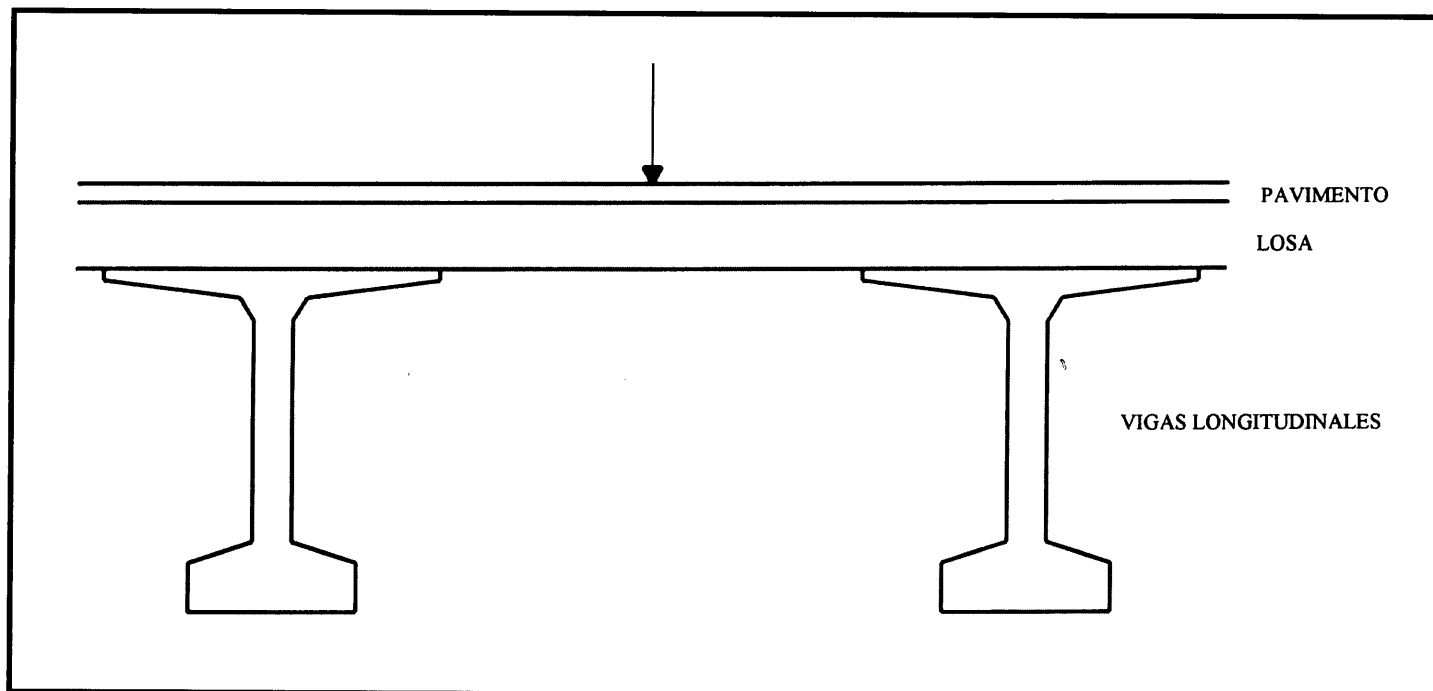
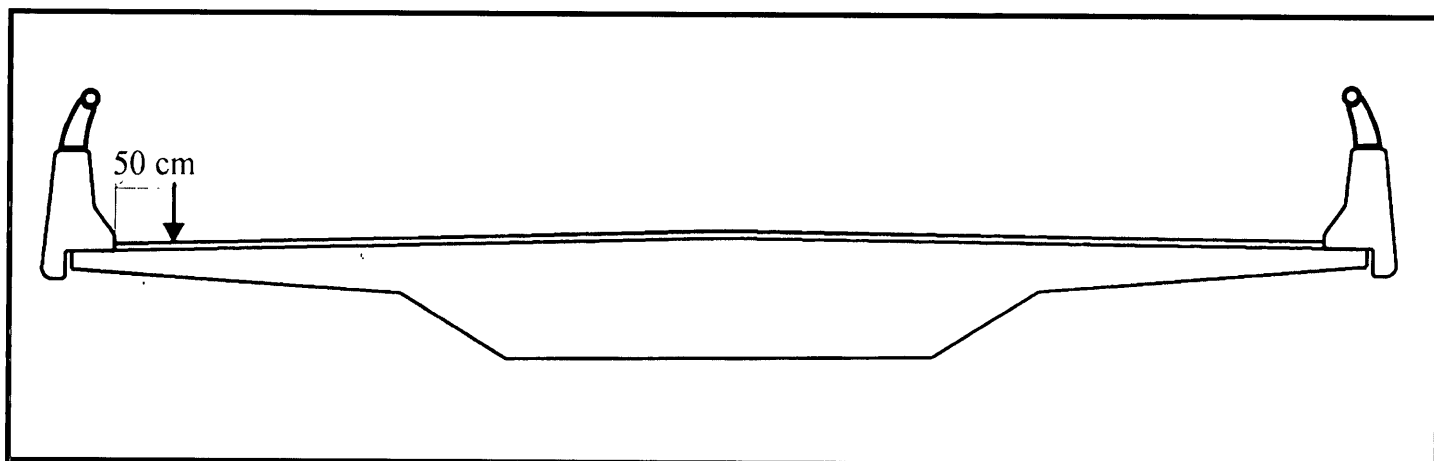
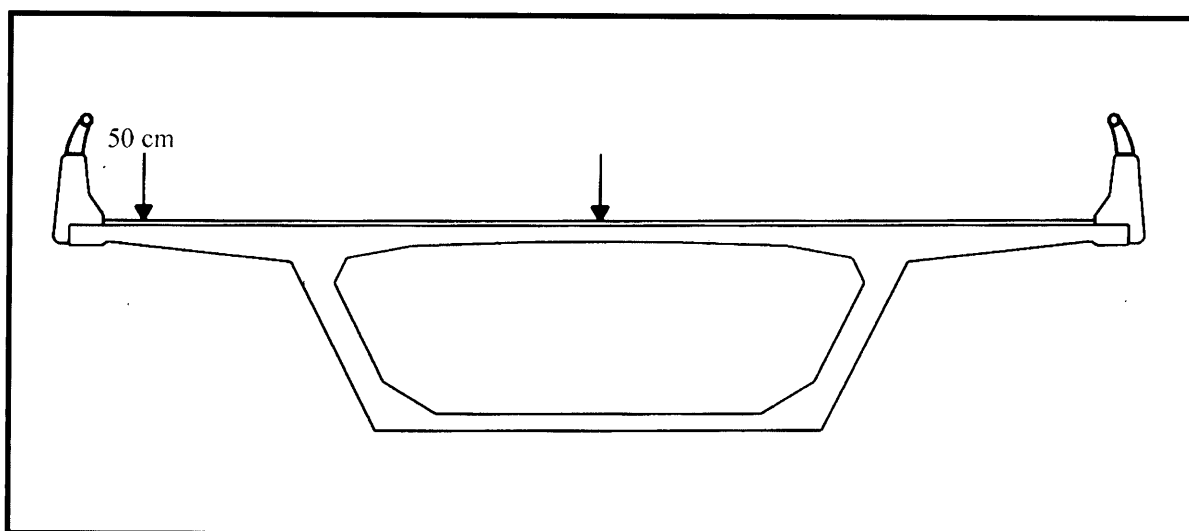
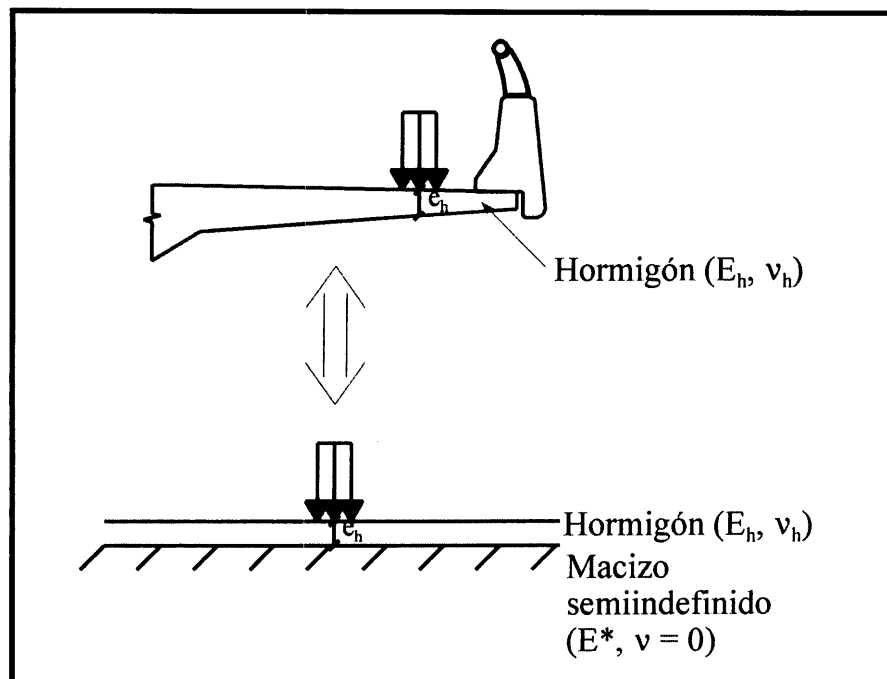


Figura 2.
Posición más favorable del centro de la rueda del vehículo en el caso de tableros de vigas.

Figura 3.
Posiciones del centro de la rueda del vehículo más desfavorables a estudiar en el caso de tableros cajón.

Figura 4.
Posición más desfavorable del centro de la rueda del vehículo en el caso de tableros losa.





Para aplicar el método, el proyectista debe conocer:

- ▼ El número de las capas del pavimento y el espesor, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de cada una de las mismas.
- ▼ El tipo de puente y la sección transversal del tablero. Así como el módulo de deformación y el coeficiente de Poisson del hormigón del tablero.
- ▼ El grado de adherencia esperable tanto entre las distintas capas del pavimento como entre la capa inferior del pavimento y el tablero.

La adherencia es un factor de suma importancia en los resultados del dimensionamiento. Le corresponde al proyectista considerar en el dimensionamiento la hipótesis de adherencia que más se acerque a la realidad. Para ello habrá de tener en cuenta los materiales, condiciones de puesta en obra, etc.

Con el fin de agilizar el cálculo de las tensiones y deformaciones es aconsejable disponer de un programa multicapa basado en las hipótesis de Burmister. El citado programa ha de permitir la introducción de valores muy inferiores a los habituales del módulo de deformación de las capas (que pueden llegar a ser del orden de 10 Pa) a la vez que proporcionar salidas de resultados en tensiones verticales en las que se pueda apreciar 0,1 Pa.

El método se puede dividir en las siguientes cuatro fases:

1. Determinación de las posiciones de la carga que es necesario estudiar. Se aplicará la carga en el punto del tablero por el que pudiendo pasar la rueda de un vehículo, tenga el

menor canto de la losa de hormigón. En función del tipo de puente la posición de la carga a considerar será:

- ▼ Tableros de vigas. Se colocará la carga en el punto medio de la losa de hormigón comprendida entre dos vigas longitudinales (Fig. 2).
- ▼ Tableros de sección cajón. Es necesario elegir entre los dos siguientes el que tenga menor canto de hormigón: el punto medio de la losa entre almas y el punto más exterior de los voladizos laterales por el que pueda pasar la rueda de un vehículo. Se considera que el centro de la rueda no se sitúa nunca a menos de 0,5 m de la acera, barrera o mediana [8] (Fig. 3).

▼ Tableros losa. El punto más exterior de los voladizos laterales por el que pueda pasar la rueda de un vehículo, de acuerdo con el criterio anteriormente expuesto para los tableros cajón (Fig. 4).

Figura 5.
Determinación del sistema bicapa equivalente al puente.
 $E^* =$ Módulo de elasticidad del macizo del sistema bicapa equivalente al puente.

2. Cálculo del sistema bicapa equivalente al puente. Dicho sistema bicapa estará constituido por una capa de hormigón sobre un macizo semiindefinido. La capa de hormigón tendrá igual espesor, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson que el tablero de hormigón bajo el punto de aplicación de la carga. Como coeficiente de Poisson del macizo se tomará cero. El módulo de elasticidad del macizo se determinará mediante un proceso iterativo, de forma que se tomará como módulo de elasticidad del macizo aquél para el cual su tensión vertical esté comprendida entre 5 y 0,1 Pa (Fig 5).

3. Aplicación del método multicapa para el cálculo de las tensiones y deformaciones del pavimento. Consiste en construir un modelo multicapa colocando una o varias as de mezcla bituminosa (tantas como tenga el pavimento a estudiar) sobre el sistema bicapa determinado conforme al apartado 2 (Fig. 6).

Una vez que, como resultado del punto 3, se han determinado las tensiones y deformaciones del pavimento, el proyectista deberá elegir una ley de deterioro y aplicarla para determinar la vida esperable del pavimento.

Respecto de la determinación del sistema bicapa equivalente al puente habría que hacer las siguientes puntualizaciones:

- ▼ La diferencia en los resultados derivada de considerar distintos grados de adherencia para el contacto entre la

Figura 6. Sistema multicapa para la determinación de las solicitaciones del pavimento.

capa de hormigón y el macizo semiindefinido es prácticamente despreciable.

▼ En el apartado 3.2 se dan gráficamente, valores recomendados del módulo de elasticidad del macizo semiindefinido del sistema bicapa equivalente al puente. Estos valores se pueden utilizar para comenzar las iteraciones. Si las características del puente coinciden con las expresadas en 3.2 se puede tomar directamente como módulo de elasticidad del macizo el valor indicado en dichos gráficos.

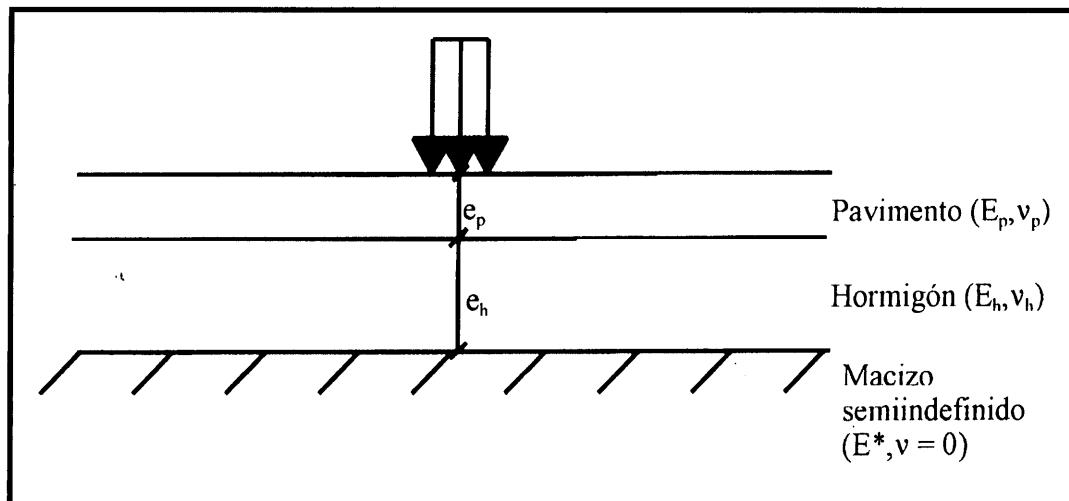
3.2 VALORES RECOMENDADOS

En el gráfico 1 se recogen los módulos de elasticidad del macizo del sistema bicapa equivalente al puente, correspondientes a aplicar la metodología propuesta a puentes de vigas con distintos cantos de losa. Se ha supuesto que el hormigón de la losa es H-250. Se han considerado valores de canto de la losa comprendidos entre los más usuales, 20 y 30 cm.

En el gráfico 2 se recogen los módulos de elasticidad del macizo del sistema bicapa equivalente al puente, correspondientes a aplicar la metodología propuesta a puentes losa o cajón. Se ha supuesto que el hormigón del tablero es H-350. Se han considerado valores del canto del tablero comprendidos entre 20 cm y 1 m.

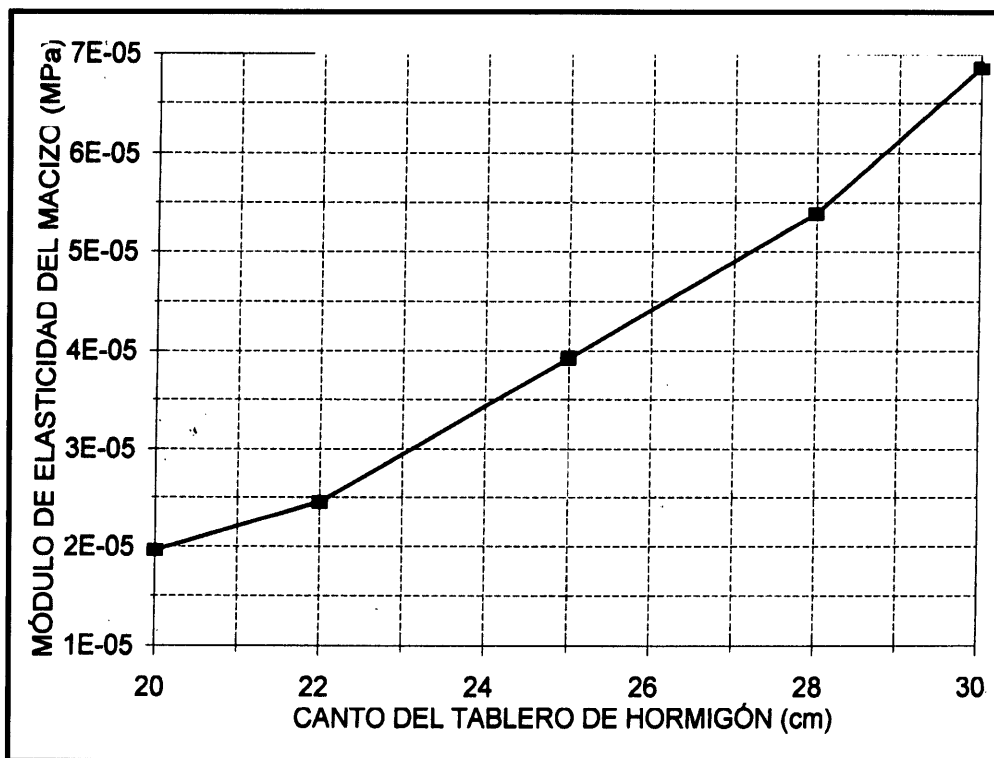
4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método de dimensionamiento analítico de pavimentos bituminosos sobre puentes de hormigón que tiene en cuenta la flexibilidad del tablero. Es un método pensado para servir de herramienta en tareas de proyecto, como puede ser la comparación entre distintas opciones.



Frente a otros métodos ya existentes presenta ventajas en cuanto a su rapidez, sencillez, precisión y ausencia de la necesidad de conocimientos específicos de cálculo de puentes para aplicarlo. Se puede utilizar en el caso de pavimentos situados sobre tableros de vigas, losa y cajón. Asimismo, se puede emplear cualquiera que sea el grado de adherencia entre pavimento y tablero.

Gráfico 1. Valores recomendados para el módulo de elasticidad del macizo del sistema bicapa equivalente al puente en el caso de tableros de vigas.



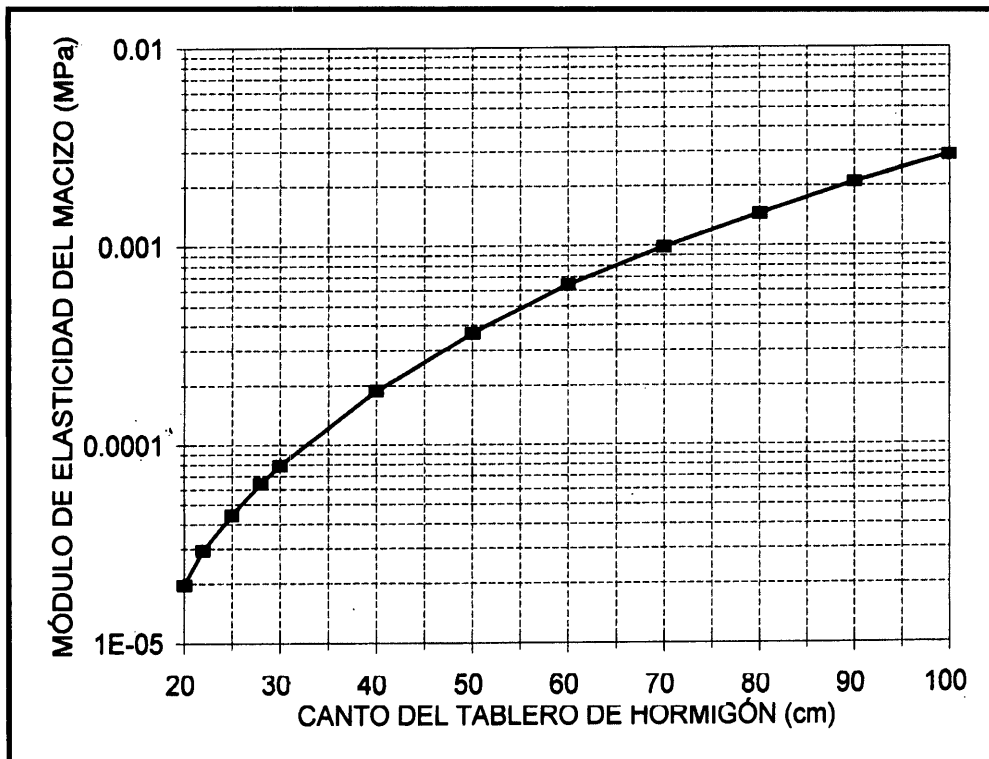


Gráfico 1. Valores recomendados para el módulo de elasticidad del macizo del sistema bicapa equivalente al puente en los casos de tableros losa o cajón.

Las hipótesis simplificativas en las que se basa hacen que no se deba utilizar en pavimentos sometidos a fuertes esfuerzos tangenciales, como los que podrían aparecer en puentes situados en curvas muy pronunciadas o en zonas de frenado. Así como, en pavimentos de gran espesor, situados en zonas de altas temperaturas, bajo tráfico lento y canalizado y/o con formulaciones que hagan prever la aparición de deformaciones permanentes.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Battlato G. y Verga C.** (1982): "The AGIP viscoelastic method for asphalt pavement design". 5th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor.
- [2] **Castro, M. y del Val M.A.** (1995): XI Curso Internacional de Carreteras: Área de Firmes y Pavimentos: Tema 28: "Pavimentos de puentes". Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente y Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- [3] **Castro, M.** (1996): "Desarrollo de una metodología para el dimensionamiento analítico de pavimentos flexibles sobre tableros de puentes de hormigón", Tesis doctoral dirigida por Miguel Ángel del Val Melús, Departamento de Ingeniería Civil - Transportes, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] **de Backer, C.** (1981): "Pavimentos bituminosos para tableros de puentes". Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, nº148, CEDEX, MOPTMA, Madrid.

reteras y Geotecnia, nº148, CEDEX, MOPTMA, Madrid.

[5] **Fernández del Campo, J.A.** (1970): "Recomendaciones para el proyecto y construcción de firmes sobre obras de fábrica", Publ. 24 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, CEDEX, MOP, Madrid.

[6] **Kraemer, C.** (1987): "Pavimentación de puentes". Curso de pavimentos asfálticos, Madrid.

[7] **Manterola, F.J.** (1995): XI Curso Internacional de Carreteras: Área de Estructuras: Tema 1: "Introducción". Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente y Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

[8] **MOP** (1972): "Instrucción relativa a las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras". MOP, Madrid.

[9] **MOPTMA** (1995): "Inventario de obras de paso de carreteras del Estado". Servicio de Puentes y Estructuras, Subdirección General de Tecnología, Dirección General de Carreteras, MOPTMA, Madrid.

[10] **Organisation de Cooperation et de Developpement Economiques** (1972): "Etanchéité des tabliers de pont en béton", OCDE, Recherche Routière, Paris.

[11] **Ortega, J. J. et al.** (1982): "Impermeabilización de tableros de puentes", CEDEX, MOPTMA, Madrid.

[12] **Tabchi, N. J.** (1984): "Durées de vie en fatigue des revêtements non adhérents des ponts", Travail de fin d'études. Université Libre de Bruxelles.

NOTACIÓN:

- E^* Módulo de elasticidad del macizo semiindefinido del sistema bicapa equivalente al puente
- E_h Módulo de deformación del hormigón del tablero
- E_p Módulo de elasticidad de la mezcla bituminosa del pavimento
- e_h Canto del tablero de hormigón
- e_p Espesor del pavimento
- ν Coeficiente de Poisson
- ν_h Coeficiente de Poisson del hormigón del tablero
- ν_p Coeficiente de Poisson del pavimento