





# **ANEJO A**

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL DIMENSIONAMIENTO**

---

### **Índice**

A.1.	INTRODUCCIÓN .....	163
A.2.	MÉTODOS ANALÍTICOS .....	163
A.2.1.	HIPÓTESIS DE BURMISTER .....	163
A.2.2.	HIPÓTESIS DE WESTERGAARD .....	164
A.2.3.	FASES DEL PROCEDIMIENTO .....	165
A.2.4.	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO .....	166
A.2.5.	VERIFICACIÓN .....	167
A.3.	MÉTODOS EMPÍRICOS .....	167
A.4.	REFERENCIAS ESPECÍFICAS .....	168



**A.1. INTRODUCCIÓN**

El dimensionamiento de un firme se puede abordar según dos caminos diferentes:

- Considerando los factores básicos de dimensionamiento (tráfico, explanada, características de los materiales y variables climáticas) de manera explícita, con el objetivo, como en el cálculo tradicional de estructuras, de determinar tensiones, deformaciones y desplazamientos, comparando estos resultados con los valores admisibles. Este enfoque es el de los métodos analíticos de dimensionamiento.
- Implícitamente, considerando todos esos factores globalmente en un proceso basado fundamentalmente en la experiencia sobre el comportamiento de los firmes. Así es como se hace en los métodos empíricos de dimensionamiento.

Desde un punto de vista práctico, estos últimos se presentan en tablas, gráficos, ábacos o catálogos de secciones estructurales; los métodos analíticos requieren, en cambio, la realización directa de cálculos. Sin embargo, ambos grupos de métodos han experimentado un acercamiento progresivo en los últimos años: una buena parte de los denominados métodos empíricos se sustentan no sólo en el análisis de la experiencia disponible, sino en cálculos que sirven para poner de manifiesto la influencia cuantitativa de las distintas variables; por su parte, los métodos analíticos requieren un contraste con la experiencia, tanto en lo que se refiere a la elección de los parámetros de cálculo como, sobre todo, al análisis de los resultados e incluso los propios modelos empleados requieren una verificación o contraste con la realidad.

En estas Recomendaciones se propone un método empírico de dimensionamiento estructurado en forma de catálogo de secciones de firme. Este método ha sido elaborado bajo consideraciones tanto empíricas como analíticas.

**A.2. MÉTODOS ANALÍTICOS**

Los métodos analíticos de dimensionamiento se basan en el estudio del estado de tensiones y deformaciones producido por las solicitaciones que se tengan en cuenta (cargas, temperaturas, etc.) con posteriores consideraciones sobre lo que significa dicho estado en el deterioro de la sección estructural. Un método analítico consta por tanto de dos componentes: un modelo de respuesta y un análisis de deterioro.

Los modelos de respuesta se pueden clasificar en tres grandes familias: modelos mecánicos, de regresión y probabilistas, siendo los primeros los de empleo más generalizado. Existen tres tipos de modelos mecánicos según los principios de modelación geométrica y de cálculo en los que se basan: sistemas multicapa, teoría de placas y métodos numéricos (elementos finitos, por ejemplo). Por otro lado, pueden clasificarse según las ecuaciones constitutivas de los materiales: modelos elásticos y viscoelásticos. Hasta el presente, el mayor desarrollo para firmes flexibles y semirrígidos lo han alcanzado los modelos basados en sistemas multicapa y ecuaciones elásticas (hipótesis de Burmister); en cambio, para los firmes rígidos los métodos más usuales se basan en la teoría de placas y en las ecuaciones elásticas (hipótesis de Westergaard).

**A.2.1. HIPÓTESIS DE BURMISTER**

En resumen estas hipótesis son las siguientes:

- El firme se representa geoméricamente como una estructura constituida por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en planta y de espesor constante, apoyadas en un espacio semiindefinido de Boussinesq.
- Cada capa se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo. Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.
- Cada una de las cargas que actúan sobre el firme, por ejemplo las ruedas de un vehículo, se representa mediante una presión, en general vertical, distribuida uniformemente sobre un área circular.
- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales) o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.
- 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 casos excepcionales son prácticamente despreciables.

Con estas hipótesis, 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. Para ello se utilizan los correspondientes programas de ordenador, de los que existen muchas versiones en el mercado.

Las limitaciones de los modelos desarrollados bajo estas hipótesis tienen su origen en las mismas y pueden resumirse de la siguiente forma:

- La sección del firme se representa con simetría de revolución, es decir, tanto las cargas como el propio firme se suponen simétricos alrededor de un eje. Los efectos de las cargas producidas por los neumáticos en las proximidades de grietas o de bordes no pueden por tanto analizarse utilizando estos métodos; tampoco puede analizarse directamente el efecto de cargas cuya huella de contacto no es circular, como ocurre con los contenedores o con los apoyos delanteros de los semirremolques. Aunque podrían utilizarse modelos tridimensionales, aplicando un método de elementos finitos, estos no son prácticos debido a la gran cantidad de tiempo de ordenador y de planteamiento y análisis de los resultados que requieren.
- Se desprecian las fuerzas de inercia que se desarrollan en cada elemento del firme debido a las cargas dinámicas. El no considerarlas puede no ser aceptable en el caso de vehículos circulando a baja velocidad y materiales granulares o mezclas bituminosas y en el de vehículos que en sus movimientos realizan giros muy bruscos.
- Todos los materiales utilizados en construcción de firmes son en mayor o menor medida anisótropos, heterogéneos, no lineales y no elásticos; algunas de sus propiedades dependen del tiempo y se ven afectadas por cambios ambientales, como la temperatura o la humedad. Por tanto, para calcular tensiones y deformaciones de forma más precisa sería necesario el empleo de teorías complejas no lineales. La aplicación de la teoría elástica ha demostrado ser de todos modos suficientemente válida en la práctica.

## **A.2.2. HIPOTESIS DE WESTERGAARD**

Estas hipótesis, aplicables a los pavimentos de hormigón, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se supone que la losa es de espesor uniforme y que se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo, caracterizado mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.
- La losa está en equilibrio bajo la acción de las cargas del tráfico, su peso propio, las reacciones de las losas contiguas y la del apoyo.
- La reacción del apoyo se considera en cada punto proporcional al desplazamiento

vertical del mismo (macizo de Winkler) con una constante de proporcionalidad denominada módulo de reacción o de balasto.

Tanto en las fórmulas establecidas por Westergaard como en las modificaciones posteriores de las mismas un parámetro fundamental es el denominado radio de rigidez reativa, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$I = \left[ \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) K} \right]^{1/4}$$

siendo:

- I: radio de rigidez relativa (m).
- E: módulo de elasticidad del hormigón (MPa).
- h: espesor de la losa (m).
- $\nu$ : coeficiente de Poisson del hormigón.
- K: módulo de reacción del apoyo (MPa/m).

En el caso de una carga circular, las tensiones máximas en la losa para las distintas posiciones de aquélla vienen dadas por expresiones del tipo siguiente:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{Q}{h^2} f \left( \frac{I}{a} \right)$$

siendo:

- Q: magnitud de la carga circular (N).
- a: radio de la carga (m).

La principal ventaja de este método es que permite con facilidad el estudio de las tensiones provocadas por cargas situadas en las proximidades de los bordes de las losas.

### A.2.3. FASES DEL PROCEDIMIENTO

El desarrollo práctico de los métodos basados en hipótesis como las indicadas comprende las siguientes etapas:

- Evaluación de las sollicitaciones (aisladas o repetidas; estáticas o dinámicas, etc.) durante la vida útil del firme, evaluación de los efectos de las diversas acciones (cargas de cálculo) e integración de dichos efectos.
- Modelación de la sección estructural del firme mediante:
  - en el caso de firmes flexibles y semirrígidos, un sistema multicapa teórico con una serie de hipótesis de comportamiento para poder ser calculado, de forma práctica, mediante un programa de ordenador (hipótesis de Burmister).
  - en el caso de firmes rígidos, una placa apoyada sobre un macizo de Winkler (hipótesis de Westergaard).
- Selección de materiales a emplear en las distintas capas y estimación de los espesores necesarios.
- Análisis de la sección para determinar las tensiones, deformaciones y desplazamientos máximos que se pueden producir.
- Comparación de estos valores con los admisibles para cada material, según el criterio de deterioro considerado.
- Comprobación mediante dicho criterio de que cada capa puede llegar al final de la vida útil con un nivel de deterioro admisible y similar al del resto de las capas.
- Si no ocurre lo anterior, es necesario efectuar un nuevo cálculo modificando los espesores o las características resistentes de las capas, de tal manera que cada una de ellas alcance un deterioro admisible y similar al final de la vida útil.
- Comparación de los costes de las distintas opciones viables para elegir entre ellas la más económica para cada situación.

## A.2.4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES Y CONDICIONES DE CONTORNO

### A.2.4.1. EXPLANADA

El módulo de elasticidad del macizo semiindefinido de Boussinesq se suele fijar a partir del CBR de la explanada mediante la expresión:

$$E(\text{MPa}) = 10 \cdot \text{CBR}$$

Para un macizo de Winkler los módulos de reacción que se pueden considerar son los siguientes (en base a correlaciones prácticas):

CBR = 3	K = 30 MPa/m
CBR = 5	K = 40 MPa/m
CBR = 10	K = 55 MPa/m
CBR = 20	K = 70 MPa/m
CBR = 30	K = 90 MPa/m
CBR = 100	K = 220 MPa/m

En cuanto al coeficiente de Poisson puede oscilar entre 0,35 para suelos granulares y 0,50 para los muy cohesivos.

### A.2.4.2. CAPAS GRANULARES

En estos materiales el módulo de elasticidad es una función de los módulos de las capas confinantes, del propio espesor de la capa granular y del coeficiente de rozamiento interno de los áridos.

En la práctica se puede tomar:

$$E = k \cdot E_{i-1}$$

donde  $E_{i-1}$  es el módulo adoptado para la capa subyacente y  $k$  un coeficiente que varía entre 2 y 4 según los factores indicados. Por su parte, el coeficiente de Poisson de un material granular puede variar entre 0,35 y 0,40.

### A.2.4.3. CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS

Estos materiales son los más sencillos de caracterizar mecánicamente. Incluso a partir de los resultados de resistencia a compresión simple o a tracción indirecta puede deducirse mediante correlaciones relativamente fiables el módulo de elasticidad. Sin embargo, no se pueden recomendar unos valores fijos para el cálculo, pues se trata en realidad de una amplísima gama de materiales diferentes. Para los materiales empleados en España se pueden recomendar a título orientativo los valores de la tabla A.1.

TABLA A.1. CARACTERÍSTICAS ELÁSTICAS DE LAS CAPAS TRATADAS CON CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS		
	E (MPa)	$\nu$
Suelo mejorado con cemento	100 - 1000	0,30
Suelocemento	4000-15000	0,25
Gravacemento	15000-22500	0,25
Hormigón magro	20000 - 25000	0,20
Gravaescoria	10000-20000	0,30



#### **A.2.4.4. MEZCLAS BITUMINOSAS Y MATERIALES ESTABILIZADOS CON LIGANTES BITUMINOSOS.**

En este caso se trata de materiales con características muy variables, difíciles de modelar, pues su rigidez es variable con las temperaturas y los tiempos de aplicación de las cargas. Para las mezclas bituminosas no abiertas empleadas normalmente en España (se trata de mezclas no muy ricas en betún y con un esqueleto mineral con elevado rozamiento interno) se pueden adoptar valores de módulos de elasticidad de 4.000 a 7.000 MPa, y de coeficiente de Poisson de 0,30 a 0,35.

#### **A.2.4.5. HORMIGONES**

A los hormigones empleados en pavimentación se les puede suponer un módulo de elasticidad en torno a 30.000 MPa, con coeficiente de Poisson de 0,15 a 0,20.

#### **A.2.4.6. CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS**

Las hipótesis de Burmister suponen el contacto entre las capas del firme con adherencia total o nula. En el primer caso, la resolución de las ecuaciones se realiza imponiendo la igualdad de deformaciones horizontales en la zona de contacto entre ambas capas. Hay que tener en cuenta que el grado de adherencia real que se puede conseguir entre dos materiales depende de su naturaleza y sobre todo de cómo se haya realizado la puesta en obra. Por otro lado, es preciso considerar que incluso partiendo de una adherencia prácticamente total, la diferencia de rigideces acaba conduciendo, por efecto de las cargas y del agua, a un cierto grado de despegue. En sentido contrario, la hipótesis de adherencia nula supone también un alejamiento de la realidad por cuanto siempre existe rozamiento entre los materiales.

Además, debe tenerse presente que la adherencia o no entre dos capas consecutivas es una de las variables que más influye en las tensiones y deformaciones que se producen. Por ello, para capas que puedan resultar críticas en el dimensionamiento deben compararse los resultados de las dos hipótesis.

#### **A.2.5. VERIFICACIÓN**

El principal problema que presentan los métodos analíticos de dimensionamiento es el de la verificación de los mismos, es decir, la comprobación de en qué medida las conclusiones que de ellos se pueden extraer concuerdan con la realidad. Por ejemplo, pueden existir superficies agrietadas que desde el punto de vista estructural puedan considerarse muy deterioradas y sin embargo no incidan en la normal circulación de los vehículos. Por otro lado, no todos los pavimentos que llegan a un grado apreciable de deterioro (grietas, deformaciones, etc.) evolucionan de manera rápida hacia una ruina total, sino que algunos tienen incluso cierta capacidad de autorreparación en épocas favorables o de admitir con éxito operaciones sencillas de conservación.

Para la determinación del estado de deterioro de un firme se pueden adoptar tres tipos de criterios básicos:

- Indicadores globales, que definen el estado de la superficie del pavimento en función de las deformaciones y fisuras existentes. En este caso, suelen establecerse unos umbrales límite, más allá de los cuales el firme puede considerarse en condiciones inadmisibles.
- Indicadores paramétricos, que tienen en cuenta una o varias características relacionadas con la resistencia del firme o con propiedades específicas de la superficie del pavimento.
- Consideraciones teórico-experimentales, que tienen en cuenta el fallo de la estructura mediante su análisis por medio de determinados criterios de deterioro, por ejemplo, tensiones máximas admisibles.

### **A.3. MÉTODOS EMPÍRICOS**

Aunque se disponga de programas de ordenador para el análisis de secciones estructurales, en la mayoría de los casos las normativas se basan en secciones tipificadas o abacos que

relacionan las características de los materiales con sus espesores y con el tráfico previsto durante la vida útil. En general, estos métodos empíricos (en el caso de los pavimentos portuarios, el más conocido es el método de la British Ports Association) se basan no sólo en criterios experimentales obtenidos a partir de observaciones y ensayos in situ y en laboratorio, sino que, de forma más o menos explícita se apoyan también en hipótesis mecanicistas y la mayoría de ellos han sido contrastados con programas de cálculo. La justificación de la existencia de los métodos empíricos está en el hecho de simplificar la labor del proyectista. Pero no es recomendable su aplicación en un ámbito distinto del original del método, ya que las asimilaciones sobre tipología del tráfico, características y prescripciones de materiales, factores estacionales, etc., pueden ser muy difíciles de realizar. Menos justificadas aún están las extrapolaciones en cuanto a cargas de cálculo, limitación de espesores, equivalencia entre materiales, etc.

Todos los métodos empíricos de dimensionamiento tienen en común el procedimiento siguiente:

- Establecimiento de una vida útil al final de la cual se llega a un grado de deterioro determinado.
- Determinación de los parámetros de entrada: caracterización de la superficie de apoyo, valoración del tráfico de proyecto, condiciones locales y estacionales.
- Determinación de la solución o soluciones a través de un camino propio de cada método: ábacos, tablas o catálogos de secciones estructurales.

Una tendencia general que se observa en las versiones más recientes de diversos métodos de dimensionamiento empírico, la cual ha sido adoptada en estas Recomendaciones, es independizar la determinación del espesor de la capa inferior (normalmente subbase granular) del resto de las capas: se determina el espesor y las características de la subbase exclusivamente en función de la capacidad de soporte de la explanada. Esto significa que se considera la capa de subbase como una plataforma de trabajo con adecuada capacidad de soporte y homogénea en toda la superficie que se pavimenta. Por el contrario, los espesores de las capas superiores están condicionados por el tráfico.

En algunos procedimientos empíricos se obtiene un espesor ficticio de un material tipo, del que se pasa, mediante unos coeficientes de equivalencia o relaciones de sustitución, a capas de espesores reales formadas por otros materiales. De esta forma, se pueden configurar estructuras multicapas con materiales y espesores distintos. Principalmente cuando se utilizan abacos, se requiere un ajuste final de la sección estructural proyectada, mediante una serie de limitaciones incluidas en cada método y que no permiten elegir arbitrariamente los espesores. Los espesores de las capas de diversos materiales pueden a veces estar en contradicción con circunstancias reales de ejecución de la obra o con consideraciones técnicas y resistentes. Por ello, todos los métodos establecen una serie de limitaciones finales para llegar a obtener estructuras de firmes que cumplan su función resistente de manera armónica y equilibrada, ya que el deterioro de una capa implica la sobrecarga de las demás y su rápida destrucción. Esta armonía requiere una correcta relación entre espesores y rigideces, adecuándose en todos los casos al tipo y magnitud de las cargas de cálculo, a las condiciones climáticas, etc.

Los catálogos de secciones estructurales se basan en la discretización por intervalos de valores de la capacidad de soporte de las explanadas y de las cargas de cálculo. Dicha discretización tiene el aparente inconveniente de un menor ajuste de los espesores de cálculo al tráfico de proyecto. Sin embargo, los catálogos permiten estimar los parámetros de entrada dentro de intervalos de valores suficientemente amplios para no estar tan afectados por la imprecisión de los mismos. Esto no quiere decir que no se deban fijar lo mejor posible, sino que si se han evaluado correctamente, las posibles desviaciones quedarán, por lo general, dentro de los márgenes admisibles. Por otro lado, con un catálogo se unifican los criterios sobre dimensionamiento en el ámbito en el que se utiliza, lo que facilita el seguimiento de un grupo relativamente reducido de secciones estructurales.

#### **A.4. REFERENCIAS ESPECÍFICAS**

- CRONEY, D. (1977): *The design and performance of road pavements*, H.M.S.O., Londres.

- PEYRONNE, Ch; CAROFF, G. (1984): *Dimensionnement des chaussées*, Presses de l'ENPC, Paris.
- ULLIDTZ, P. (1987): *Pavement analysis*, Elsevier, Amsterdam.
- YANG, N.C. (1972): *Design of functional pavements*, McGraw-Hill, New York.
- YODER, E.J.; WITCZAK, M.W. (1975): *Principles of pavement design*, 2ª edición, John Wiley and Sons, New York y Toronto.