

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes
RESUMEN TEMA 13 ESPECÍFICO
DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES

1.- DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES FLEXIBLES Y RÍGIDOS. MÉTODOS RACIONALES. SISTEMAS MULTICAPA. MÉTODOS EMPÍRICOS. DESCRIPCIÓN CONCEPTUAL.

Se entiende el Dimensionamiento de firmes como el **proceso en el que se determinan los materiales que constituyen las distintas capas del firme y sus espesores**, de manera que se alcance una vida de servicio determinada y se optimice su coste. Al respecto, existen dos grandes grupos de métodos de dimensionamiento, los **empíricos** y los **analíticos o racionales**.

Otro aspecto a destacar en el dimensionamiento de los firmes son los **Factores de Proyecto** que se adoptan en los procesos de Diseño de Firmes, y que son los siguientes: las **Cargas del Tráfico** (presentes y futuras), la **Capacidad de soporte del terreno** y la **Climatología**. Sin embargo, en algunos procesos de diseño de firmes, se introducen otros Factores de Proyecto, como pueden ser la Velocidad de aplicación de las cargas o las Temperaturas de exposición del pavimento.

Entre los Métodos para el Dimensionamiento, podemos destacar:

A) MÉTODOS ANALÍTICOS.

Los Métodos Analíticos de diseño estructural de firmes se basan en el **análisis del estado de tensiones y deformaciones producido por las solicitaciones que se consideren (cargas, temperaturas, etc.) con un posterior estudio de lo que significa dicho estado tenso-deformacional en la degradación de la estructura del firme**. Por tanto, un Método Analítico consta de dos componentes: **Un Modelo de Respuesta y Un Análisis de Fallo**.

Dentro de los Modelos de Respuesta se puede hacer la siguiente clasificación por familias: Mecánicos, de Regresión y Probabilísticos. En concreto, los **Modelos de Respuesta Mecánicos** son los más generalizados, existiendo a su vez dentro de esta familia, tres tipos según los principios de modelización geométrica y de cálculo: **“Sistemas Multicapas”, “Teoría de Placas”** y **“Elementos Finitos”**.

Por otro lado, según **las ecuaciones constitutivas de los materiales**, tendremos tanto los Modelos Elásticos como los Modelos Visco-Elásticos. Hasta la fecha, el mayor desarrollo para firmes **flexibles y semirrígidos**, lo alcanzan los **Modelos basados en los Sistemas Multicapa y Ecuaciones Elásticas (BURMISTER)**; recurriendo dichos métodos en lo que al análisis de fallo se refiere, a **las leyes de fatiga**.

En concreto, el Modelo de Respuesta Elástico Multicapa de Burmister se basa en una serie de **hipótesis** que consideran que el firme, y en su caso, las capas de asiento, están formados por capas horizontales, paralelas entre sí, de espesor constante, indefinidas en su plano, y apoyadas en un macizo semiinfinito homogéneo.

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes**B) MÉTODOS EMPÍRICOS.**

Los Métodos Empíricos se basan bien en la observación del comportamiento de firmes existentes o en parámetros que en cualquier caso no permiten realizar un cálculo analítico. En general necesitan mucho tiempo para extraer conclusiones y son difíciles de generalizar a condiciones distintas de aquellas para los que fueron creados. Básicamente, estos métodos se pueden agrupar en tres familias: “Los **Métodos de Nomograma** (AASHO)”, “Los **Ábacos**” y “Los de **Catálogos de Secciones Tipo** (como las normas españolas)”.

2.- NORMAS Y ESPECIFICACIONES ESPAÑOLAS**2.1.- Normativa de la Administración Central.**

La **Norma 6.1 – IC de Secciones de Firme, aprobada por Orden FOM / 3460 / 2003 de 28 de noviembre** es de obligado cumplimiento para el diseño de firmes en la Red de Carreteras del Estado. Esta norma está basada en Métodos Analíticos, pero con soluciones estandarizadas (Catálogo). Asimismo, cabe resaltar que incorpora el Principio de Equivalencia de Secciones (Ensayo AASHTO), al presentar varias Secciones estructurales para una misma sollicitación de cargas (Tráfico) y un mismo Cimiento (Explanada).

Entre las modificaciones más significativas de esta norma con respecto a la anterior se pueden señalar las siguientes:

- Nuevo cuadro de formación de explanada y nuevo catálogo de secciones de firme.
- Incorporación nuevos materiales en el diseño de los firmes, como p.e. las mezclas bituminosas de alto módulo (MAM) para capas de base y las mezclas bituminosas de granulometría discontinua en caliente para capas de rodadura.
- Obligatoriedad de empleo de pavimentos continuos de hormigón armado cuando se opte por firmes con pavimento de hormigón en las categorías de tráfico T00 y T0.

2.2.- Normativa de las Comunidades Autónomas.

En el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía, la Consejería de OPT (actualmente Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio), con los objetivos básicos de incorporar los conocimientos que sobre el comportamiento de los firmes construidos sobre terrenos tan heterogéneos geotécnicamente como son los de Andalucía y de adaptación de la normativa estatal sobre secciones de firmes a unas sollicitaciones de bajos tráficos como los que soporta la Red de Carreteras de Andalucía, aprobó en 1.999 la Instrucción para el Diseño de Firmes de la R.C.A., a través de la Orden Circular 1/99 de la D.G.C., que se basa fundamentalmente en:

- Una nueva concepción del Cimiento del Firme (en referencia a la Instrucción, con la introducción conceptual del “Terreno Natural Subyacente”)
- Aplicación directa de **Métodos Analíticos para Firmes Flexibles y Semirrígidos**
- Aplicación de un **Método Semiempírico para Firmes Rígidos.**
- **La instrucción viene acompañada de la aplicación informática ICAFIR que permite llevar a cabo el dimensionamiento práctico de los firmes de acuerdo con las indicaciones del propio documento.**

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes

En el año 2006, tras casi ocho años de vigencia, la COPT (actualmente Consejería de Fomento, Infraestructuras y Ordenación del Territorio) hizo público un nuevo texto, en el que, básicamente, se reordenaba la estructura general del primer documento y se actualizaban las bases de cálculo de las que se partía, y que, bajo determinadas condiciones, producían en el texto original de 1999 sobredimensionamientos innecesarios.

3.- FIRMES RÍGIDOS. CRITERIOS DE PROYECTO. ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

Los Firmes Rígidos de carreteras son aquellos en los que la parte resistente de la sección del mismo está encomendada a una capa de hormigón hidráulico y es sobre el pavimento donde recae la responsabilidad estructural y funcional, mientras que las capas inferiores tienen por misión asegurar un apoyo uniforme, estable y no erosionable para aquél. Entre las **características principales** que podemos destacar de los pavimentos de hormigón podemos destacar:

- A) **Rigidez del Pavimento:** Hace que el pavimento sea muy resistente a las elevadas presiones de contacto de los vehículos pesados. Además, no sufren roderas viscoplásticas.
- B) **Juntas:** La retracción inicial del hormigón y las variaciones termohigrométricas hacen necesaria la disposición de juntas. Así, las juntas transversales serán de “**contracción, de hormigonado o de dilatación**” y las juntas longitudinales serán “**de alabeo o de hormigonado**”.
- C) **Sensibilidad a Agentes Externos:** Destaca por ejemplo que en zonas sometidas a heladas y cuando se prevea el empleo de sales fundentes en invierno, será necesario incorporar al hormigón un aireante y asegurarse de la efectiva existencia de aire ocluido.
- D) **Características Superficiales:** Por un lado deberá cuidarse la **resistencia al deslizamiento**, dada su influencia sobre la seguridad, debiendo garantizarse la suficiente macrotextura y microtextura. Otras características superficiales que deben cuidarse son las que afectan a la comodidad como es el caso de la regularidad.
- E) **Durabilidad:** La resistencia mecánica del hormigón aumenta con el tiempo, y si la concepción del pavimento ha sido correcta, su índice de servicio disminuye lentamente. La fatiga a flexión del hormigón es la que determinará finalmente el agrietamiento generalizado y la necesidad de su refuerzo o reconstrucción.
- F) **Apertura al Tráfico:** En las especificaciones se fija en **14 días el tiempo ha transcurrir desde la puesta en obra hasta la apertura al tráfico general.** Para ello se han desarrollado pavimentos denominados **fast-track con los que, gracias al empleo de un hormigón superplastificado de muy alta resistencia inicial, se puede reducir el plazo a 6-24 horas.**
- G) **Conservación y Rehabilitación:** Un pavimento de hormigón correctamente proyectado y construido requiere poca conservación.

A) NORMA 6.1 IC DE SECCIONES DE FIRME

En primer lugar comentaremos los criterios de proyecto que se fijan en la **norma 6.1 IC**. En ésta se establece que para las categorías de Tráfico T00 y T0 sólo pueden proyectarse pavimentos continuos de hormigón armado. Si se justificase su conveniencia por razones técnicas o económicas, para firmes de carreteras con categoría de tráfico pesado T1 podrá también emplearse pavimento continuo de hormigón armado.

Por otro lado, para firmes de carreteras con categoría de tráfico pesado T1 y T2 el pavimento será de hormigón en masa, con juntas provistas de pasadores. Para los firmes de carretera con categoría de tráfico pesado T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42) o eventualmente en arceles, el pavimento será de hormigón en masa, con juntas sin pasadores.

En cuanto a los **criterios sobre la clase resistente del hormigón**, la **6.1 IC** señala que para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T2 se utilizará hormigón tipo HP-4,5. Por otro lado, para las categorías T1 y T2 podrá emplearse el HP-4,0 mayorando en 2 cm los espesores dados por el Catálogo de secciones de firme. Finalmente, para las categorías de tráfico pesado T3 y T4, y en arceles, se utilizará hormigón tipo HP-4,0, aunque también podrá utilizarse el HP-3,5 mayorando en 2 cm los espesores dados por el Catálogo de secciones de firme.

En relación a los **criterios sobre el refuerzo del hormigón**, la **norma 6.1 IC** fija que la cuantía geométrica del pavimento de hormigón armado continuo será del 0,7% para HP-4,5 y del 0,6% para el HP-4,0.

B) CRITERIOS FIJADOS EN LA ICAFIR.

En esta norma se consideran dos tipos de firmes rígidos: **“Pavimentos de hormigón vibrado con juntas de contracción, con o sin pasadores”** y **“Pavimentos continuos de hormigón armado”**.

Así, para la categoría de tráfico **T00 se utilizarán exclusivamente pavimentos continuos de hormigón armado**. Por otro lado, para las categorías de tráfico **T0 a T1 se utilizarán pavimentos continuos de hormigón armado o pavimentos de hormigón vibrado**. Finalmente, para las categorías **T2 a T4 se utilizarán exclusivamente pavimentos de hormigón vibrado**.

En cuanto a los **Criterios sobre la capa de apoyo del hormigón**, destaca que la ICAFIR establece la obligatoriedad de ejecutar capas de apoyo no erosionables bajo las capas rígidas del firme en las categorías de tráfico pesado T2 y superiores. Estas capas pueden ser una MBC sobre una capa de suelo cemento, una capa de hormigón magro o una capa de gravacemento.

De los **criterios sobre la cuantía del armado en PCHA** destaca que la cuantía geométrica del pavimento de hormigón armado continuo será del 0,7% para HF-4,5 y del 0,6% para el HF-4,0 (idéntico criterio al exigido en la 6.1.IC).

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes

En cuanto a las juntas, serán transversales o longitudinales. Las juntas transversales serán: **de contracción, de hormigonado o de dilatación. Por otro lado**, las juntas longitudinales serán: **de alabeo o de hormigonado**

En materia de **criterios sobre arcenes**, para la categoría de tráfico T00 será obligatorio disponer arcenes de hormigón provistos de barras de atado. Con tráfico T0 se recomienda la disposición de arcén de hormigón con barras de atado. Para tráfico T1 y T2 será opcional disponer o no de arcenes de hormigón. En el caso de optar por ellos, si el tráfico es de categoría T1, deberán incluir barras de atado.

Finalmente en cuanto a **criterios sobre la textura superficial**, se contempla la ejecución de un acabado superficial mediante las siguientes técnicas: **capa de rodadura bituminosa, denudado químico y estriado.**

2.3.- Análisis Estructural.

Independientemente del uso de la Instrucción 6.1.IC obligatorio para el dimensionamiento de estos firmes en la Red de Carreteras del Estado, la Instrucción para el Diseño de Firmes de la R.C.A. adopta para el cálculo de tensiones y deformaciones en los Firmes Rígidos, el Modelo de Respuesta desarrollado por Westergaard. Así, el objeto del análisis de la estructura es el de definir el espesor tanto del pavimento como, en su caso, de las capas inferiores.

Para ello, se parte de los Factores de Diseño establecidos en la Instrucción: Tráfico de Proyecto, Capacidad de Soporte del Cimiento, Tipo de Arcén y Unión entre Losas. Con ellos, la Instrucción establece el proceso de Dimensionamiento de la estructura del firme con las siguientes fases: Caracterización del Cimiento del Firme, Definición de las características del firme, Cálculo del espesor del pavimento según el Criterio de Fatiga, Cálculo del espesor del pavimento según el Criterio de Erosión y finalmente Análisis del Resultado.

3.- MATERIALES.

De manera esquemática, podemos señalar una relación de los materiales que conforman los pavimentos de hormigón. En primer lugar destaca el **Cemento**, que será de clase resistente 32,5. Seguidamente se tienen los **Áridos** (artículo 610 PG-3), que se clasifican en Gruesos (tamiz 4 mm UNE) y finos (4 - 0,063 mm). Además están los **Aditivos** (reductores de agua, fluidificantes, aireantes, superplastificantes, acelerantes fraguado, curado).

Finalmente, se tienen otra serie de elementos donde destacan **los Pasadores** (barras lisas 25 mm y longitud 50 cm. Acero S-275-JR) y **Barras de Unión** (corrugadas 12 mm y longitud 80 cm). Por su parte, **en pavimentos Continuos de Hormigón Armado se utilizan barras de acero B 500 S ó B 500 SD** que cumplan las exigencias de la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE.

En concreto, respecto al **Tipo y Composición del hormigón**, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares especificará el tipo de hormigón a emplear de entre los indicados en la tabla siguiente, cuya designación corresponde con el valor de la resistencia característica a

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes

flexotracción a veintiocho días (28 d), referida a probetas prismáticas normalizadas de sección cuadrada, de ciento cincuenta milímetros (150 mm) de lado, fabricadas y curadas conforme a la norma UNE-EN 12390-2, y ensayadas con el procedimiento de dos puntos de carga.

La resistencia característica a flexotracción del hormigón a veintiocho días (28 d) se define como el valor de la resistencia asociado a un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento (95%).

4.- PUESTA EN OBRA.

La ejecución de un pavimento de hormigón consta esquemáticamente de las fases que se verán en este epígrafe. En primer lugar, se tiene la preparación de la **Superficie de apoyo de las losas**, para ello es esencial una buena regularidad de la superficie, no dañada y poco erosionable. En segundo lugar encontramos la **Fabricación del Hormigón y su Transporte** que será generalmente en camiones volquete y si es necesario con lonas o cobertores.

Seguidamente se tiene la **Puesta en Obra**, en la actualidad lo más frecuente es el uso de Pavimentadoras de Encofrados Deslizantes que son capaces de extender, vibrar y enrasar uniformemente el hormigón fresco. Esta fase culmina con el **Acabado, Texturado y Curado**. Habitualmente, la **textura superficial** se obtiene mediante un estriado longitudinal, por el paso de cepillos metálicos o de plástico. Previamente se arrastra una arpillera para conseguir una microtextura áspera superficial. Finalmente, se tendría la **Construcción de las Juntas y el Control de Calidad**.

5.- NORMAS Y ESPECIFICACIONES.

Para el Proyecto de Firmes Rígidos la Normativa a aplicar será por un lado la **Norma 6.1 – IC de Secciones de Firme, aprobada por Orden FOM / 3460 / 2003 de 28 de noviembre, aplicable en RCE** y por otro lado la **Orden Circular 1 / 99 sobre la Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, y su actualización de 2006**.

En lo relativo a las Prescripciones Técnicas, los artículos del PG-3 de aplicación, entre otros, son: Artículo 202.- Cementos, Artículo 240.- Barras Corrugadas para hormigón estructural, Artículo 280.- Agua a emplear en morteros y hormigones, Artículo 281.- Aditivos a emplear en morteros y hormigones, Artículo 285.- Productos filmógenos de curado, Artículo 550.- Pavimentos de Hormigón y el Artículo 610.- Hormigones.

En lo que se refiere a las **especificaciones de los materiales**, además de las ya indicadas en el apartado anterior, cabe señalar que lo dispuesto en el artículo 550 del PG-3 sobre Pavimentos de Hormigón, se entenderá sin perjuicio de lo establecido en el Reglamento 305/2011 de 9 de marzo de 2011, del Parlamento Europeo y del Consejo, por el que se establecen las condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción.

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes**6.- HORMIGÓN ARMADO, PRETENSADO, EN MASA CON PASADORES Y HORMIGÓN SECO COMPACTADO.**

El artículo 550 del PG-3, actualizado conforme a la Orden FOM/2523/2014, distingue los siguientes tipos de pavimentos de hormigón:

- **Pavimento de hormigón con juntas:** pavimento de hormigón en masa con juntas transversales a intervalos regulares, comprendido entre tres y cinco metros (3 y 5 m), en los que la transferencia de cargas entre losas puede efectuarse por medio de pasadores de acero, o bien confiarse al encaje entre los áridos.
- **Pavimento de hormigón armado continuo:** pavimento de hormigón dotado de armadura longitudinal continua, sin juntas transversales de contracción o, eventualmente, dilatación.

Así, los Pavimentos de Hormigón podemos agruparlos en 5 categorías:

1. PAVIMENTOS DE HORMIGÓN EN MASA (CON O SIN PASADORES).

El hormigón vibrado en masa constituye la capa resistente y a la vez la de rodadura del firme rígido. Esta capa debe poseer unas cualidades resistentes y superficiales que van implícitas con su misión dentro del conjunto del firme, pero a su vez, ha de complementarlas con otras de trabajabilidad que se relacionan con los equipos de extendido y compactado.

En estos pavimentos, las **Juntas Transversales de Contracción** para mejorar la transmisión de cargas entre losas contiguas, se ejecutan por aserrado con una anchura de corte no superior a 4 mm y profundidad no inferior al cuarto del espesor de la losa. En las mismas pueden colocarse (obligado para tráficos T1 y T2) los **pasadores** que son barras LISAS de acero NO adheridas al hormigón de 25 mm de diámetro y 50 cm de longitud o bien utilizar el denominado “sistema californiano” que prescinde de pasadores, realizando las juntas sesgadas, con una inclinación respecto al eje de la calzada de 6:1 para disminuir el efecto de las solicitaciones.

Por su parte, las **Juntas Longitudinales de Alabeo** se ejecutan cuando la anchura de hormigonado sea superior a 5 m, procurando que coincidan sensiblemente con las separaciones entre los carriles de circulación y evitando que lo hagan con las zonas de rodadura del tráfico, con una marca vial o con un pasador. Se ejecutarán por aserrado, con una profundidad de corte no inferior al tercio del espesor de la losa.

En todos los casos se proyectarán perpendicularmente a la junta longitudinal, barras corrugadas de unión de 12 mm de diámetro, 80 cm de longitud y espaciadas 1 m. Se dispondrán a la mitad del espesor de la losa y simétricas respecto de la junta.

2. PAVIMENTOS DE HORMIGÓN COMPACTADO (HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO O HCR)

Se trata de un hormigón con bajo contenido de agua, con una relación agua / cemento entre 0,35 y 0,40, que ha de compactarse enérgicamente con rodillos vibratorios y de

FJHC

Resumen Tema 13.- Dimensionamiento de Firmes

neumáticos, de forma similar a como se hace con una gravacemento. **Los firmes con este tipo de material, no obstante, no están contemplados ni en la instrucción 6.1-IC ni en la ICAFIR.**

3. PAVIMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO.

A este grupo pertenecen los **pavimentos de hormigón armado con juntas** constituidos por losas, los **pavimentos continuos de hormigón armado** y los **pavimentos con fibras de acero**.

Los pavimentos de hormigón armado con juntas fueron concebidos en una época en que las juntas constituían la zona más débil y un problema de conservación, por lo que parecía conveniente reducir su número, aumentando la longitud de las losas. Este tipo de pavimentos ha caído en desuso debido a su alto coste que no se compensa por una mayor calidad, dadas también las mejoras introducidas en la ejecución y comportamiento de las actuales juntas.

Los pavimentos de hormigón armado con fibras de acero (flejes) que permiten reducir el espesor del pavimento del orden de un 30 % y se usan en pavimentos sometidos a cargas muy pesadas (industriales, portuarios), etc.

Los pavimentos continuos de hormigón armado constituyen en cambio una extrapolación positiva de la técnica anterior, dado que llegan a suprimirse las juntas transversales, a costa de aumentar la cuantía de la armadura longitudinal de acero de alto límite elástico a valores superiores a 10 kg/m² (el mínimo de cuantía geométrica es del 0,7 % para hormigones tipo HF-4,5 y del 0,6 % para hormigones HF-4,0). Este pavimento, que se emplea bastante en el extranjero para tráfico pesado y con alguna aplicación en España.

4. PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PRETENSADO.

Gracias a la compresión que se introduce, se pueden construir losas de hasta 120 metros de longitud o incluso más y reducir el espesor del orden del 50 %. La experiencia en carreteras es poca, dada la complejidad de su aplicación pero en cambio en aeropuertos esta técnica ha encontrado mayor aplicación.

5. PAVIMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN.

En este apartado se incluyen otros tipos de pavimentos de hormigón entre los que pueden señalarse los adoquines e incluso las placas de hormigón armado prefabricadas.