

O. C. 1/99

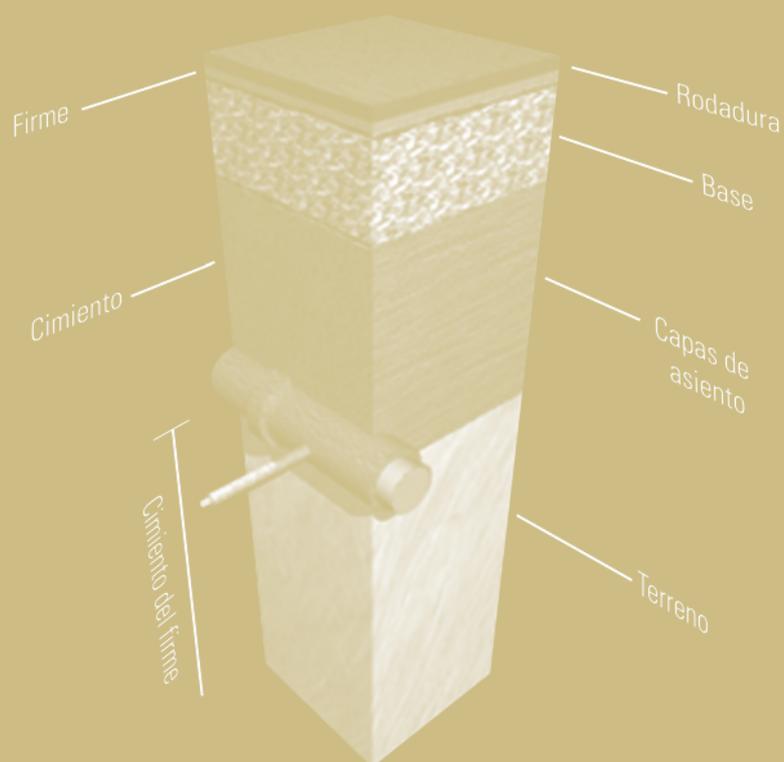
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía



JUNTA DE ANDALUCÍA

Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía



Consejería de Obras Públicas y Transportes
Dirección General de Carreteras

Sevilla, 2003

Consejería de Obras Públicas y Transportes
Dirección General de Carreteras

DIRECCIÓN:	Blas González González
COORDINACIÓN TÉCNICA:	Aurelio Ruiz Rubio
COORDINACIÓN INFORMÁTICA:	Antonio Fernández Menéndez
EQUIPO DE REDACCIÓN:	José Miguel Baena Rangel, Antonio Fernández Menéndez, Aurelio Ruiz Rubio, Blas González González
COLABORADORES:	Rafael Álvarez Loranca, Manuel Atienza Díaz Vicente Cuéllar Mirasol, Jacobo Díaz Pineda Fernando Ortiz Prego, Javier Pérez Ayuso Sandro Rocci Bocaleri, Recadero Romero Amich José Luis Romero Pérez, Ángel Tavira Herrero
PROGRAMACIÓN:	José Fernando López Navarro

COMITÉ TÉCNICO NACIONAL

PRESIDENTE:	José Manuel Gállego Estévez
SECRETARIO:	José Miguel Baena Rangel
MIEMBROS:	Rafael Álvarez Loranca, Alberto Bardesi Orue-Echevarría Vicente Cuéllar Mirasol, Jacobo Díaz Pineda José Antonio Fernández Cuenca, Mariano Gullón Löw Carlos Jofré Ibáñez, Sandro Rocci Bocaleri José Luis Romero Pérez, Pedro Uzquiza González

COMITÉ TÉCNICO ANDALUZ

PRESIDENTE:	José Manuel Gállego Estévez
SECRETARIO:	Antonio Fernández Menéndez
MIEMBROS:	Guillermo García González, Manuel Atienza Díaz José Miguel Baena Rangel, Juan Diego Bauzá Castelló Antonio Belmonte Sancho, Francisco Escámez Abad José María Fernández Fernández, José Alba García Tomás González de Canales, Jesús Martínez Hernández Jesús Merino Esteban, Fernando Moreno Benítez Miguel Ángel Municio del Campo, Antonio Ortuño Alcaraz Enrique Román Corzo, José Luis Romero Pérez Javier Ruiz de Terry, Ángel Tavira Herrero

Se agradece la colaboración de las siguientes Instituciones y Empresas:

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA, CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX), COMPOSÁN DISTRIBUCIÓN, DIPUTACIÓN PROVINCIAL DE HUELVA, DIPUTACIÓN DE GRANADA, DRAGADOS, FERROVIAL, GEA21,S.A, GEOCISA, GIASA, INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES, KAPLAN DISEÑO E INTERNET, RUS, SACYR, , TECSA , UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, URBACONSULT, URCI CONSULTORES, VORSEVI,S.A.

La normativa estatal de diseño de firmes (Instrucción 6.1 y 2-IC, Secciones de Firmes, de 1990), al estar diseñada para el ámbito de la Red de Carreteras del Estado, no pormenoriza con detalle en el amplio espectro de categorías de tráfico que soportan las redes viarias de Andalucía. Sobre todo no profundiza en la caracterización de los tráficos de baja intensidad, situación en la que se encuentra comprendida la mayor parte de la Red de Carreteras de Andalucía (carreteras autonómicas y provinciales). Además, la experiencia ha demostrado que en esos niveles de solicitud, dicha normativa podría estar sobredimensionada en las capas del pavimento.

La adaptación de dicha normativa estatal a la especificidad de terrenos de Andalucía, donde las capacidades portantes de los mismos son muy heterogéneas, es una necesidad evidente que se detectaba desde hace tiempo.

A partir de 1995, la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, a través de su Dirección General de Carreteras, comienza un proyecto tecnológico de gran envergadura como es la elaboración de una instrucción técnica para el diseño de firmes de la Red de Carreteras de Andalucía, en base a las competencias que establece el Estatuto de Autonomía de Andalucía.

Estos dos aspectos, entre otros, condujeron a plantear una normativa técnica de dimensionamiento de firmes, donde el proyectista, a la hora de diseñar el firme de la calzada, tuviera en cuenta los parámetros específicos de una serie de variables del territorio de Andalucía como son:

- La caracterización del tráfico en la Red de Carreteras de Andalucía.
- La climatología de Andalucía.
- La capacidad de soporte de los terrenos existentes en la traza y la disponibilidad real de los materiales en la zona.
- El análisis íntegro de la calzada, desde el pavimento hasta el cimiento.
- La obtención de un nivel de servicio aceptable durante el período de proyecto determinado.
- Los condicionantes económicos a la hora de analizar secciones de firmes teniendo en cuenta no sólo los costes iniciales de construcción sino también los costes de mantenimiento de reconstrucción o de rehabilitación.
- La utilización de materiales reciclables de forma que se produzca una menor agresión e incidencia sobre el medio ambiente.

Tener en cuenta todas estas variables implicaba la dificultad de aplicar los métodos empíricos de dimensionamiento que, mediante un catálogo de secciones más o menos extenso, pudiera recoger toda esta "casuística". Por todas estas razones, la presente Instrucción recurre a criterios y métodos analíticos de dimensionamiento de firmes tanto de las carreteras como de los viales urbanos.

El trabajo se ha desarrollado durante los años 1996, 1997 y el primer semestre del año 1998. Para su realización se formó un grupo de trabajo con personal técnico del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, de La Asociación Española de la Carretera y de la Dirección General de Carreteras. Además se nombró un Equipo de Redacción

con miembros de la Consejería de Obras Públicas y Transportes y del CEDEX. Paralelamente se celebraron numerosas reuniones con técnicos de los Servicios de Carreteras de las Delegaciones Provinciales de Obras Públicas y Transportes, se recopiló información sobre materiales y obras y se realizaron estudios específicos sobre la evolución del tráfico, los materiales y el clima de Andalucía.

El documento inicial ha sido examinado, a su análisis en profundidad, por dos Comités Técnicos durante el segundo semestre de 1998. Uno de ámbito nacional y otro de ámbito andaluz, con el objeto de someterlo a discusión y para recoger las valiosas aportaciones del conjunto de expertos universitarios y de personas con demostrada experiencia profesional en el campo del diseño y construcción de firmes de carreteras.

En la Instrucción, la parte más destacada es la inclusión, por primera vez en nuestro país, de criterios para el dimensionamiento analítico de firmes, sustituyendo a los tradicionales catálogos de dimensionamiento. Se pretende así que los proyectistas diseñen sus propios firmes de acuerdo con las características específicas de cada obra y de los materiales de la zona.

Es también nuevo el tratamiento dado al Cimiento del Firme, cuya capacidad de soporte se recomienda que se incremente notablemente. Por otro lado, en el documento se incluyen criterios para el análisis del tráfico y del clima, directrices para la evacuación del agua superficial y drenaje del agua subterránea y las prescripciones sobre materiales que no se incluyen en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales. Así mismo se incluyen comentarios aclaratorios, destacados del texto de la Instrucción, y algunos ejemplos para su mejor comprensión.

CAPÍTULO 1. OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN	11
1.1 Objeto	13
1.2 Ámbito de aplicación	13
CAPÍTULO 2. GENERALIDADES	15
2.1 Guía de uso	17
2.2 Consideraciones generales	18
2.2.1 Período de proyecto	18
2.2.2 Carril de proyecto	18
2.2.3 Vida de servicio	19
2.2.4 Firme de espesor variable	19
CAPÍTULO 3. FACTORES DE DISEÑO	21
3.1 Tráfico	23
3.1.1 Tráfico de proyecto	23
3.1.2 Tráficos especiales	27
3.1.3 Tráfico en carreteras de zonas agrícolas	27
3.2 Cimiento del firme	30
3.2.1 Introducción	30
3.2.2 Características de suelos y materiales	31
3.2.3 Reconocimiento del terreno natural subyacente	32
3.2.4 Clasificación del cimiento	35
3.3 Clima	35
3.3.1 Zonas térmicas	35
3.3.2 Zonas pluviométricas	36
CAPÍTULO 4. CRITERIOS DE PROYECTO	37
4.1 Introducción	39
4.2 Definición de tramos de proyecto	39
4.3 Criterios de proyecto para el cimiento del firme	40
4.3.1 Disposición de suelos	40
4.3.2 Agua en el terreno	43
4.3.3 Pendientes transversales	43
4.3.4 Capas anticontaminantes	43
4.3.5 Tratamientos sobre suelos de gran plasticidad	44
4.3.6 Actuaciones sobre suelos compresibles	44
4.4 Criterios de proyecto para la estructura del firme	45
4.4.1 Firmes con pavimento bituminoso y capas inferiores no tratadas con cemento	46
4.4.2 Firmes con pavimento bituminoso y capas inferiores tratadas con cemento	46
4.4.3 Firmes con pavimento de hormigón	47
4.4.4 Disposición transversal	47

4.4.5 Secciones especiales para travesías	49
4.4.6 Secciones de firmes provisionales	49
4.4.7 Ensanches de calzada	49
4.4.8 Reciclado <i>in situ</i> en frío	50
4.4.9 Tramos de ensayo	52
4.5 Protección ambiental	53
4.6 Comparación de costes	53
4.6.1 Coste de construcción inicial	53
4.6.2 Costes de conservación, de reparaciones y de reconstrucción	53
4.6.3 Actualización de costes	54
4.7 Evacuación del agua superficial	54
4.8 Drenaje profundo	54
4.9 Drenaje de las capas del firme	57
4.9.1 Capas drenantes	57
4.9.2 Zanjas drenantes	58
4.10 Drenaje en ensanches y cambios de trazado	59
4.10.1 Ensanches de calzada	60
4.10.2 Cambios de trazado	60
CAPÍTULO 5. DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES	61
5.1 Fases de dimensionamiento	63
5.2 Modelos de cálculo	64
5.2.1 Modelo elástico multicapa	64
5.2.2 Modelo de Westergaard	65
5.3 Dimensionamiento del cimientado del firme	65
5.3.1 Caracterización de materiales utilizables en el cimientado del firme	66
5.3.2 Cálculo de la capacidad de soporte del cimientado	67
5.3.3 Definición de los parámetros característicos del cimientado	70
5.4 Dimensionamiento de firmes con pavimentos bituminosos	70
5.4.1 Caracterización de materiales utilizables en la estructura de firmes con pavimentos bituminosos	71
5.4.2 Definición de parámetros críticos y criterios de fallo	72
5.4.3 Dimensionamiento de la estructura del firme	75
5.5 Dimensionamiento de firmes con pavimentos de hormigón	77
5.5.1 Caracterización de materiales utilizables en la estructura del firme	78
5.5.2 Definición de criterios de fallo	78
5.5.3 Dimensionamiento de la estructura del firme	79
CAPÍTULO 6. PAVIMENTOS SOBRE TABLEROS DE OBRAS DE PASO	85
6.1 Condicionantes de proyecto	87
6.1.1 Tráfico	87
6.1.2 Características de la obra de paso	87
6.1.3 Condiciones ambientales	87
6.2 Sistemas de pavimentación	87
6.2.1 Pavimentos asfálticos	87
6.2.2 Pavimentos de hormigón	90
6.3 Evacuación de agua	91
6.3.1 Evacuación transversal	91
6.3.2 Evacuación longitudinal	91
6.4 Juntas para obras de paso	91

CAPÍTULO 7. SECCIONES DE FIRME EN ARCENES	93
7.1 Condicionantes de proyecto	95
7.2 Catálogo de secciones para arcén	96
7.2.1 Categorías de tráfico pesado T0 y T1	96
7.2.2 Categoría de tráfico pesado T2	97
7.2.3 Categorías de tráfico pesado T3 o T4	97
CAPÍTULO 8. MATERIALES PARA CAPAS DE FIRME	105
8.1 Áridos	107
8.2 Materiales bituminosos	108
8.2.1 Ligantes para mezclas bituminosas en caliente	109
8.2.2 Ligantes para mezclas bituminosas en frío	110
8.2.3 Ligantes para tramientos superficiales	111
8.3 Hormigón vibrado	114
8.3.1 Juntas longitudinales	114
8.3.2 Juntas transversales	114
8.4 Hormigón magro	115
8.5 Hormigón compactado	115
8.6 Suelocemento	115
8.7 Gravacemento	116
8.8 Zahorras	116
8.9 Macadam	116
8.10 Riegos de imprimación y de adherencia	117
8.11 Riegos de curado	117
8.12 Materiales reciclados en frío <i>in situ</i> con emulsión bituminosa	117
ANEJOS	
1. Definiciones	121
2. Datos sobre producciones agrarias en Andalucía	125
3. Tipos de secciones para estructuras de firmes	127
4. Escenarios de conservación	129
5. Ejemplo del cálculo del tráfico del proyecto	135
6. Ejemplo de cálculo del cimiento del firme	145
7. Ejemplos de cálculo de firmes con pavimento bituminoso	159
8. Ejemplos de cálculo de firmes con pavimento de hormigón	169
9. Referencias y Bibliografía	171

OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

1.1 OBJETO

El objeto de este documento es el de establecer criterios y procedimientos para el dimensionamiento de firmes de las carreteras y viales urbanos pertenecientes a la Red de Carreteras de Andalucía, red que incluye tanto las carreteras de titularidad autonómica como las de titularidad provincial.

Se establece un método de dimensionamiento para los firmes de las carreteras andaluzas, que permite facilitar la labor del proyectista y unificar los criterios de dimensionamiento, de manera que se haga también posible una mejora continua del proceso de diseño de firmes.

Se ha recogido la experiencia adquirida sobre el comportamiento de firmes en Andalucía, acentuando en el documento los aspectos que se consideran críticos en el dimensionamiento de firmes. Se tratan especialmente los aspectos relativos a explanadas (de ahora en adelante Cimiento del Firme) que en Andalucía presentan problemas especiales.

El dimensionamiento se presenta en forma de cálculo analítico, para secciones de firmes flexibles y semirígidos, y semiempírico, para firmes rígidos. El proyectista debe adaptar el diseño del firme a las características de los materiales y de los suelos de la zona, y a las condiciones climáticas y de tráfico. También debe comprobar distintas soluciones para lo cual se incluyen los criterios a seguir en el correspondiente análisis comparativo y de rentabilidad. Se debe conseguir así un diseño de firmes ajustado a cada situación con el consiguiente ahorro de recursos económicos frente a las soluciones generales de catálogos de secciones de firmes.

Junto con las recomendaciones de proyecto se incluyen prescripciones que deben cumplir los materiales y unidades de obra y recomendaciones sobre su empleo, todo ello teniendo en cuenta las peculiaridades de los mismos en Andalucía.

1.2 ÁMBITO DE APLICACIÓN

El ámbito de aplicación de esta Instrucción abarca los proyectos de construcción y las obras de nuevas carreteras, de acondicionamientos y de mejoras de las carreteras de la Red de Carreteras de Andalucía, según se establece en el artículo 1 del Anteproyecto Ley de Carreteras de Andalucía 1998.

También será de aplicación la presente Instrucción al diseño de los firmes de las actuaciones en carreteras de los tramos urbanos, las redes arteriales y las vías urbanas de la Red de Carreteras de Andalucía.

No se contempla la construcción por etapas de los firmes, salvo en los casos de obras provisionales en las cuales la construcción por etapas del firme esté contemplada en el diseño del mismo.



En este documento se presenta el método de diseño de firmes de la *Red de Carreteras de Andalucía*. El método propuesto se basa en el cálculo analítico, partiendo de un modelo matemático que obtiene las tensiones y deformaciones debidas a las sollicitaciones estimadas; posteriormente, las tensiones o deformaciones consideradas críticas se comparan con los valores límite, para determinar la vida teórica de servicio; repitiendo el proceso para el mismo tipo de firme, pero con varias disposiciones y espesores de los materiales, se ajusta el diseño de manera que la vida de servicio teórica del firme coincida con la de proyecto o la supere.

2.1 GUÍA DE USO

En el **Capítulo 3** se definen las variables necesarias para el análisis: tráfico de proyecto, categoría del cimiento y zona climática. Para definir debe contarse al menos con los datos de las últimas campañas de aforo, un estudio geotécnico y geológico de los suelos de la traza y los datos climáticos de la zona.

Se reconocerá el terreno natural de la traza con objeto de definir **Subtramos del terreno natural subyacente** homogéneos. Estos subtramos estarán formados por terrenos de características similares y, a efectos de cálculo, quedarán caracterizados por el suelo de menor capacidad portante que los constituya.

En el **Capítulo 4** se definen los criterios de proyecto que deben considerarse en el diseño tanto del cimiento como de la propia estructura del firme. Entre otros los relativos a la tramificación del proyecto, la selección de los materiales y de los espesores, la disposición de capas, la comparación económica de secciones, drenaje y protección ambiental.

En función de los criterios de proyecto previamente hallados, se dividirá la traza en **Tramos de Proyecto**, de forma que en cada uno de los tramos definidos se mantengan constantes sus factores de diseño (tráfico, clima y categoría del cimiento). En general, cada tramo de proyecto incluirá varios de los subtramos definidos por el terreno natural subyacente.

En el **Capítulo 5** se describe el procedimiento para el dimensionamiento de secciones, tanto para el dimensionamiento del cimiento como para la estructura del firme, diferenciando en este último caso entre firmes con pavimento bituminoso o de hormigón.

Con respecto al cimiento, se dimensionará una sección tipo por subtramo homogéneo con la condicionante de que se mantenga la categoría del cimiento durante todo el tramo del proyecto. Ésta sección tipo estará formada, en general, por el terreno natural subyacente, los suelos de aportación al núcleo del terraplén y las capas de asiento necesarias hasta conseguir la capacidad portante requerida. Posteriormente, el proyectista podrá optar por agrupar aquellas secciones de tipo que considere oportunas dentro de cada tramo de proyecto, con el fin de optimizar los trabajos de construcción.

En cuanto a la estructura del firme, se calculará una sección tipo por tramo de proyecto. El cálculo deberá repetirse para varias tipologías de firme, al menos tres, de manera que se comparen costes de los distintos tipos y se determine la estructura más económica, según los criterios fijados en la Instrucción. Para el estudio de los firmes debe disponerse de datos sobre los materiales disponibles, comportamiento de firmes analógicos a los estudiados en la zona, etc.

En el **Capítulo 6** se dan las directrices para el proyecto de firmes sobre tableros de obras de paso, que, debido a sus condiciones especiales, presentan tipologías y características que difieren de las las soluciones generales.

En el **Capítulo 7** se presentan diversas soluciones para firmes en arcenes, que no necesitan de cálculo estructural.

En el **Capítulo 8** se dan prescripciones sobre materiales para su utilización en la estructura del firme, y que deben incluirse con el resto de prescripciones en los Pliegos de prescripciones técnicas Particulares (PPTP).

Se han incluido una serie de anejos como ayuda y para la mejor comprensión de los conceptos desarrollados en el texto general de la Instrucción. En el anejo 1, se presenta un glosario de definiciones relativas a la Instrucción.

En el **Anejo 2** se proporcionan diversos datos de ayuda para el cálculo de los factores de diseño, como son datos a cerca de la producciones de los principales cultivos en Andalucía.

En el **Anejo 3** se presentan algunos de los tipos de secciones más frecuentes para estructuras de firme.

En el **Anejo 4** se dan los escenarios de conservación para el cálculo de los costes de conservación, reparación y reconstrucción de las diversas secciones de firme durante el período para el cual han sido diseñadas.

El resto de los anejos son ejemplos de cálculo. En el **Anejo 5** se describe el cálculo del tráfico de proyecto. Se desarrolla un ejemplo concreto que incluye el cálculo, sus diferentes factores: intensidades de tráfico con limitación por capacidad, factores de crecimiento con tasas constante y variable, y coeficiente de equivalencia.

Los **Anejos 6, 7 y 8** son, respectivamente, ejemplos de cálculo del cimiento, de estructuras de firmes con pavimento bituminoso y de estructuras de firme con pavimento de hormigón.

En los **Anejos 9 y 10** se incluyen las referencias del texto y bibliografía general de dimensionamiento de firmes.

Por último, en el **Anejo 11** se presenta el programa de cálculos ICAFIR cuyos resultados deberán presentarse entre la documentación técnica del proyecto de construcción.

2.2 CONSIDERACIONES GENERALES

En los proyectos de firmes se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones generales:

2.2.1 PERÍODO DE PROYECTO

Tanto para firmes de nueva construcción como para firmes de ampliación de calzada existentes en la Red Principal se adoptará como período de proyecto 20 años, excepto para pavimentos de hormigón que se adoptará 30 años. Tanto para firmes de nueva construcción como para firmes de ampliación de calzada en la red secundaria se podrán considerar justificadamente períodos de proyecto inferiores, pero en cualquier caso no menores de 10 años.

2.2.2 CARRIL DE PROYECTO

Se dimensionará el firme de la calzada para aquel de sus carriles, denominado carril de proyecto, que soporte mayores cargas de tráfico, es decir, para el que se prevea un mayor tráfico de proyecto.

En carreteras de calzada única, dos carriles y doble sentido de circulación puede tomarse como carril de proyecto cualquiera de los dos, si no existe un desequilibrio manifiesto de las cargas por sentido de circulación. En carreteras con más de un carril por sentido puede tomarse como carril más cargado el exterior

2.2.3 VIDA DE SERVICIO

El método de diseño considera que el firme ha llegado al final de su vida de servicio cuando se cumpla alguna de las situaciones siguientes:

- Se encuentra agrietada más del 20% de la superficie del tramo en firmes con pavimento bituminoso, o más del 20% del total de las losas del tramo en firmes de hormigón.
- La regularidad superficial presenta un índice de regularidad internacional (IRI) superior a cinco en más del 50% de los hectómetros del tramo.

2.2.4 FIRME DEL ESPESOR VARIABLE

Cuando en una calzada con dos o más carriles por sentido de circulación se obtenga para el carril que no sea de proyecto una categoría de tráfico inferior a la de éste, puede considerarse en toda la calzada la misma sección que la correspondiente al tráfico de proyecto o utilizarse una sección variable de firme a lo ancho de la misma, teniendo en cuenta los criterios fijados en el capítulo 4.

FACTORES DE DISEÑO

El diseño del firme de una carretera será función del tráfico que vaya a circular por la vía, del cimiento sobre el que se asiente, y de la climatología de la zona.

3.1 TRÁFICO

3.1.1 TRÁFICO DE PROYECTO

Se considerará como tráfico de proyecto, TE, el número acumulado de ejes equivalentes de 13 t que se prevea para el carril de proyecto durante el período de proyecto.

Para la determinación del tráfico de proyecto (TE) debe partirse de los siguientes datos:

- Intensidad Media Diaria (IMD) de vehículos que circulan por el tramo en proyecto, su distribución por calzadas, en su caso, y por calzada.
- Proporción de vehículos pesados respecto al total de vehículos.
- Distribución de cargas por eje de los vehículos.
- Previsiones de aumento del tráfico a lo largo del tiempo.
- Fecha de puesta en servicio del tramo.
Período de proyecto.

El tráfico de proyecto se obtendrá a partir de la expresión:

$$TE = IMD_{PA} \times CE \times 365 \times F \times \gamma_t \quad [3.1]$$

IMD_{PA}: *Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto considerado, en el año de apertura al tráfico.*

CE: *Coefficiente de equivalencia de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje tipo, obtenido mediante la distribución de cargas por eje.*

F: *Factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados.*

γ_t : *Coefficiente de seguridad en cargas.*

Para la determinación de la IMD_{PA} y de los valores CE y F, siempre que sea posible se atenderá a lo siguiente:

- Para vías de nueva construcción, la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto, en el año de apertura al tráfico, habrá de estimarse a partir de los obtenidos en otras vías del corredor, encuestas de origen y destino, y de casos similares en el ámbito territorial considerado.
- El coeficiente de mayoración de las cargas γ_t se determinará en función de la categoría de tráfico de proyecto aplicando los siguientes criterios:

Carreteras de tráfico T4, $\gamma_t=1,06$

Carreteras de tráfico T3 y T2, $\gamma_t=1,12$

Carreteras de tráfico T1 y T0, $\gamma_t=1,15$

- Para acondicionamientos mejoras de carreteras podrán utilizarse también los aforos manuales o automáticos pertinentes. Se tendrán en cuenta los datos del *Plan General de Aforos de Andalucía*, recogidos en sus informes anuales [Ref. 1], elaborados por la Dirección General de Carreteras de la Junta de Andalucía. Para determinar la IMD en el año de apertura al tráfico deberán realizarse las estimaciones correspondientes a partir del año del aforo.
- En ambos casos, se estudiará especialmente el tráfico inducido y generado después de la puesta en servicio, que puede modificar sensiblemente las estimaciones de tráfico. Si de los estudios de tráfico pertinentes se deduce que la apertura del tramo inducirá un tráfico superior al calculado según el procedimiento descrito, se adoptará el valor del tráfico inducido.

El valor de CE dependerá del tipo de firme que se esté proyectando (flexible, semirrígido o rígido). Se adoptarán los valores CE=0,5 para firmes con pavimento bituminoso y CE=1 para firmes con pavimento de hormigón, salvo que se disponga de datos acerca de la distribución de ejes por intervalos de carga obtenidos, por ejemplo, en campañas de pesaje.

El factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados se obtendrá mediante la suma de los incrementos acumulados de este tráfico, respecto al año origen del proyecto, a lo largo del período de cálculo. Depende por tanto de la tasa de crecimiento del tráfico de vehículos pesados y del período de proyecto. La tasa de crecimiento anual del tráfico de vehículos pesados debe estimarse a partir de un estudio de tráfico específico. La tasa de crecimiento será variable.

El incremento de la IMD de vehículos pesados a lo largo del período de proyecto vendrá limitado, en cada caso, por la capacidad asociada a cada tramo del proyecto, de forma que a partir del momento en que la IMD_{PA} alcance el valor máximo correspondiente al tipo de vía y tramo, se considerará constantemente igual a este valor hasta el final del período de cálculo. El valor de esta capacidad, en términos de IMD, deberá justificarse convenientemente en el correspondiente estudio de tráfico.

En esta Instrucción se considerarán las categorías de tráfico de proyecto definidas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Categorías de tráfico de proyecto

Categoría	IMD_{PA}
T0	2.000 – 4.000
T1	800 – 2.000
T2A	400 – 800
T2B	200 – 400
T2B	200 – 400
T3B	50 – 100
T4A	25 – 50
T4B	< 25

Los tráficos con IMD_{PA} superior a 4.000 quedan fuera del ámbito de ésta Instrucción y requerirán estudios especiales

El tráfico de proyecto debe definirse mediante el par de valores dado por el número de ejes equivalentes acumulados y la categoría del tráfico de proyecto. Los estudios y análisis realizados para el cálculo de estos valores deberán ir incluidos en el anejo nº 6 "Planeamiento y tráfico" del Proyecto de Construcción (Normas para la Redacción de Proyectos - O.C 6/95) [Ref. 4]

En el **Anejo 5** de esta Instrucción "Ejemplo de cálculo del tráfico de proyecto" se presenta un ejemplo de cálculo del tráfico de proyecto con tasas anuales de crecimiento constante y variable, en el cual se incluye la determinación del valor de CE a partir de la distribución de ejes por intervalos de cargas, y del factor de crecimiento del tráfico.

Cálculo de IMD_{PA}

Para calcular el valor de la IMD_{PA} a partir de los resultados de aforos existentes o estudios específicos se pueden seguir los siguientes pasos:

- Se determina el valor de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto (IMD_p) en la fecha del aforo o estudios específicos más recientes.
- Se determina el valor de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en la fecha de redacción del proyecto (IMD_{PB}). Para ello, una vez obtenida la IMD_p , se actualiza teniendo en cuenta el crecimiento experimentado por el tráfico pesado durante el período comprendido entre la fecha del aforo y la fecha de redacción del proyecto.
- Se determina el valor de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en la fecha de puesta en servicio del tramo (IMD_{PA}). Para ello, una vez obtenida la IMD_{PB} , se actualiza a la fecha de entrada en servicio del tramo* suponiendo una tasa de crecimiento dada por la media de los valores de crecimiento del tráfico, para la carretera donde se proyecta la obra, recogidos en la serie histórica del *Informe Anual de Aforos*.

En particular, considerando constantes las tasas de crecimiento del tráfico entre ambos períodos, la IMD_{PA} se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$IMD_{PA} = (1 + r_{23})^{n^2} \times IMD_{PB} = (1 + r_{23})^{n^2} \times (1 + r_{12})^{n1} \times IMD_p \quad [C3.1]$$

Donde r_{12} y r_{23} son las tasas de crecimiento del tráfico de vehículos pesados en tanto por uno entre la fecha de aforo y la de redacción del proyecto y entre la fecha de redacción del proyecto y la de puesta en servicio respectivamente, y donde $n1$ y $n2$ son los años transcurridos entre estas fechas.

Estimación de IMD_p

Para la obtención de la IMD_p en el carril de proyecto, salvo que se disponga de datos específicos, puede partirse de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados de los *Informes Anuales del Plan General de Aforos de Andalucía* en la fecha más cercana a la redacción del proyecto.

Cuando en un tramo con una IMD_p estimada superior a 50 no se disponga de datos de aforos, es conveniente realizar estudios específicos para su determinación.

En carreteras con una IMD_p estimada menor de 50, si no se dispone de datos de aforos, se pueden realizar estudios específicos o adoptarse las siguientes hipótesis:

En carreteras de zonas agrícolas (en general, carreteras con tráficos ligeros) se pueden seguir los criterios definidos en el apartado 3.1.3.

En carreteras que comuniquen aglomeraciones urbanas se recomienda adoptar las siguientes IMD_p :

- La IMD_p se considera inferior a 20, siempre que ninguna de las aglomeraciones urbanas que atraviese o conecte el tramo de proyecto tenga un número de habitantes superior a 1.000. La IMD_p se considera comprendida entre 20 y 50 cuando alguna de las aglomeraciones

*Si se desconoce esta fecha puede suponerse una diferencia de 3 años desde la redacción del proyecto.

urbanas que atraviese o conecte el tramo de proyecto tenga un número de habitantes superior a 1.000.

Si no se dispone de datos de la distribución por carriles del paso de los vehículos pesados, se puede suponer que:

En carreteras de dos carriles y doble sentido de la circulación:

- Si el ancho de la calzada es superior a 6 m, sobre el carril de proyecto circula la mitad del total de vehículos pesados.
- Si el ancho de la calzada esta comprendido entre 5 y 6 m, sobre el carril de proyecto circulan las tres cuartas partes del total de vehículos pesados
Si el ancho de la calzada es inferior a 5 m, sobre el carril de proyecto circula la totalidad de vehículos pesados.

En carreteras de dos carriles por cada sentido de circulación, sobre el carril de proyecto circula la totalidad de vehículos pesados que circulan en el sentido considerado.

En carreteras con tres o más carriles por sentido de circulación, sin contar los carriles adicionales (carriles lentos, de aceleración o deceleración, ramales, etc.), sobre el carril de proyecto circula el 85% de la totalidad de vehículos pesados que circulan en el sentido considerado.

En carreteras con IMD inferior a 1.000, si se desconoce el porcentaje de vehículos pesados, puede optarse por realizar estudios específicos para su determinación, o adoptar la hipótesis de que dicho porcentaje es del 8%.

Estimación del coeficiente de equivalencia

La equivalencia de un eje pesado en número de ejes tipo viene dada por la relación entre los deterioros producidos por cada uno de ellos, que se define como daño del eje determinado. Para el cálculo del daño de un eje, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\text{Daño producido por el eje} = \{ k_1 \times k_2 \times k_3 \times (P_{as}/P_0) \}^\alpha \quad [C3.2]$$

Donde, P_0 , es el eje tipo de referencia que tomará el valor de 13 t y, P_{as} , es la magnitud del eje pesado. Los coeficientes k_1 , k_2 , k_3 y α tomarán los valores indicados en la tabla C3.1.

Tabla C 3.1. Valores de los coeficientes k_1, k_2, k_3 y α

Coefficiente	Tipo	Valor
α	Firme flexible	4
	Firme semirrígido	8
	Firme rígido	12
k_1	Eje simple	1.0
	Eje doble	0,6
	Eje triple	0,45
k_2	Ruedas gemelas normales	1.0
	Ruedas simples normales	1,3
	Ruedas simples de base ancha	1,2
k_3	Suspensión tradicional	1,0
	Suspensión de aire o similar	0,95

Estimación del factor de crecimiento

En caso de no contar con estudios específicos para la estimación del factor de crecimiento se puede extrapolar a partir de series históricas completas del Plan General de Aforos de Andalucía, las cuáles deberían tener datos de, al menos, seis años.

Estimación de la capacidad de las secciones

Si no se dispone de un estudio específico para carreteras de calzada única, dos carriles y doble sentido de circulación, se puede estimar su capacidad siguiendo las directrices que se dan a continuación y siempre que las características del tramo se aproximen lo suficiente a las hipótesis consideradas.

La capacidad de un tramo en términos de IMD de vehículos pesados en toda la calzada puede tomarse de la tabla C3.2. Para un estudio más específico se puede utilizar el *Manual de Capacidad de Carreteras* [Ref. 1].

Tabla C 3.2 Máximo IMD de vehículos pesados en toda la calzada (capacidad) por tipo de vía y tramo. (*)

Tipo de vía	Tipo de tramo		
	Llano	Ondulado	Montañoso
Red principal (2)	9.000	4.000	2.000
Red secundaria (3)	7.000	3.000	1.500
Red secundaria (4)	5.000	2.000	

*La capacidad se ha obtenido basándose en el MANUAL DE CAPACIDAD DE CARRETERAS [Ref. 1]

Se han adoptado las siguientes hipótesis:

- 50% camiones.
- FHP=1; K (factor de la hora de proyecto)=0,10
- Reparto por carriles: 60/40
- ⁽²⁾ Calzada de 7 m y arcén \geq 1,5 m.
- ⁽³⁾ Calzada de 6 m y arcén \geq 0,5 m.
- ⁽⁴⁾ Calzada de 5 m y sin arcén.

3.1.2 TRÁFICOS ESPECIALES

Se entiende como tráfico especial el formado en una proporción significativa por vehículos pesados con carga media muy elevada, próxima a la máxima legal y por tanto especialmente agresivo. El tráfico especial puede producirse durante todo el año, por ejemplo en tramos de acceso a puertos o a zonas mineras o industriales, o temporalmente durante algunos meses al año, por ejemplo en zonas agrícolas o madereras.

Cuando se den estas circunstancias u otras que hicieran pensar que el tráfico pudiera presentar estas características, siempre que sea posible se efectuarán campañas de pesaje con el fin de deducir el coeficiente de equivalencia de los vehículos pesados.

Comentario **Coeficiente de equivalencia para tráficos especiales**

Si sólo se dispone de información para obtener el coeficiente de equivalencia del tráfico considerado como especial se puede suponer que el resto del tráfico tiene un coeficiente de equivalencia CE=0,5 para firmes con pavimento bituminoso y CE=1 para firmes con

pavimento de hormigón, componiendo después los resultados. Para la determinación del coeficiente de equivalencia del tráfico especial es conveniente realizar un estudio específico sobre este tráfico. En el anejo 5 "Distribución media de pesos por ejes en vehículos pesados", se proporciona una tabla de distribución media de pesos por ejes en vehículos pesados que el proyectista podrá utilizar para la realización de dicho estudio (Tabla 3).

Si no se dispone de datos para determinar el coeficiente de equivalencia del total de vehículos pesados, se puede corregir el coeficiente de equivalencia aplicando los criterios indicados en la tabla C3.3. En este caso, se considerará tráfico especialmente agresivo el compuesto por los vehículos pesados cargados procedentes del centro de producción específico.

Tabla C 3.3 Coeficientes de equivalencia para tráfico especial

% Tráfico especialmente agresivo sobre tráfico pesado	Coefficiente de equivalencia corregido
> 30 %	2 x CE
15-30 %	1,5 x CE
< 15 %	CE

En aquellos tramos donde exista un tráfico especial concentrado en M meses al año, se puede llevar a cabo la composición correspondiente de intensidades medias diarias y coeficientes de equivalencia.

3.1.3 TRÁFICO EN CARRETERAS DE ZONAS AGRÍCOLAS

Se incluyen aquí las carreteras de baja intensidad de tráfico y con trasiego de vehículos industriales para labores agrícolas, en la mayoría de los casos, de dimensiones no normalizadas. En general, se trata de un tráfico poco agresivo formado por vehículos pesados con cargas medias bajas, sin embargo, en ciertas situaciones puede clasificarse como tráfico especial, en cuyo caso se atenderá a lo indicado en el apartado 3.1.2.

Además, este tráfico se caracteriza por su estacionalidad, de acuerdo con los cultivos y épocas de recolección y siembra, siendo de menor intensidad en áreas alejadas de los centros de mayor actividad (núcleos urbanos, centros de entrega y recepción de productos, etc.), y de mayor intensidad en las cercanas. En el Anejo 2 "Tablas de datos agrarios", se proporcionan datos de producciones y rendimientos agrarios que podrán usarse en ausencia de otros más específicos de la zona.

Para la determinación de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en toda la calzada (IMD_p), se recomienda la siguiente fórmula empírica:

$$IMD_p = Q \times S \times \eta^{0.5} \times \xi / 500 \quad [3.3]$$

Siendo,

- Q** Producción anual bruta en la zona (t/ha)
- S** Superficie total servida (ha)
- η** Número de explotaciones diferentes servidas
- IMD_p** Número de vehículos pesados en toda la calzada durante el año de producción Q.
- ξ** Coeficiente obtenido de la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores del coeficiente ξ

Características de la carretera	ξ
Carretera de cola o terminal cuyo final no enlaza con otra carretera	1
Carreteras que enlazan otras dos entre sí	1,3
Carreteras que enlazan con un núcleo de población	1,5

Comentario **Tráfico en zonas agrícolas**

Corrientes principales de tráfico

Tráfico de explotación: Originado por el parque de máquinas agrícolas (autopropulsadas y arrastradas) y por los medios de transporte que utilizan los agricultores en las relaciones hombre-tierra. El parque de máquinas agrícolas es muy variado, existiendo gran diversidad de potencias y dimensiones. La velocidad de estas máquinas no excede de 20 km/h, y la carga media de los remolques es de 3 t/eje.

Tráfico comercial: Originado por vehículos (camiones y camionetas) destinados a distribuir y transportar los productos. Se estima como velocidad de circulación de estos vehículos 70 km/h, y como carga media de los camiones 8 t/eje.

Estimación de la IMD_p

Para la estimación de la intensidad de tráfico en este tipo de zonas se podrán realizar estudios específicos analizando el tráfico en carreteras de características similares a la que se vaya a proyectar. Este análisis se debe realizar entre las 6 y las 22 horas de los días que registren mayor intensidad de tráfico (generalmente durante la recolección de los productos).

En carreteras concretas de una explotación determinada. Conviene estudiar todas las variables que influyen en el tráfico, es decir:

- Extensión de la zona (Ha)
- Intensidad de utilización de la tierra
- Producción bruta anual (t)
- Número de explotaciones servidas por la carretera
- Materias primas a emplear en las explotaciones
- Transporte de material mecánico (tractores, etc.)
- Servicios agrotécnicos exteriores
- Tránsito de otros vehículos
- Tráfico inducido.

En cualquier caso es conveniente tener en cuenta una serie de características típicas del tráfico agrícola, como son:

- Variación a lo largo del año reflejo de los ciclos de producción.
- Intensidad de tráfico inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al centro de atracción.
- Variación transversal del tráfico. En carriles de doble circulación habrá más deterioro en el sentido de vuelta, con los vehículos cargados.

Coeficiente de equivalencia para tráficos ligeros

Si no se dispone de datos para la obtención del coeficiente de equivalencia, en aquellas situaciones con tráfico poco agresivo pueden aplicarse los factores correctores indicados en la tabla C3.3, sobre los valores definidos por defecto para tráfico pesado. Se considera que el tráfico poco agresivo es aquél formado por los vehículos agrícolas con las características descritas anteriormente.

Tabla C 3.3 Coeficientes de equivalencia para tráficos ligeros

% Estimado de tráfico pesado sobre tráfico poco agresivo	Corrección de CE
> 30 %	CE
20-30 %	0,80 x CE
10-20 %	0,60 x CE
0-10 %	0,40 x CE

3.2 CIMIENTO DEL FIRME

3.2.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende como *Cimiento del Firme* (ver figura 1) el conjunto formado por capas de suelos u otros materiales que se encuentran bajo el firme. El *Plano de Explanada* constituye la superficie superior del cimiento, sobre la que se apoya el firme.

El cimiento del firme está constituido a su vez por el *Terreno Natural Subyacente* en fondo de desmonte, los suelos o materiales de aportación en núcleo de terraplenes o pedraplenes, y ambas formaciones en las secciones a media ladera, y generalmente por las *Capas de Asiento* del firme.

Las capas de asiento están formadas por capas de suelos o materiales de aportación, o por la estabilización de los existentes, cuya finalidad es facilitar las labores de construcción, mejorar y homogeneizar la capacidad soporte del cimiento del firme, proteger los suelos susceptibles al agua mediante impermeabilización o evacuación, y obtener las superficies geométricas precisas.

Figura 1. Esquema del cimiento del firme

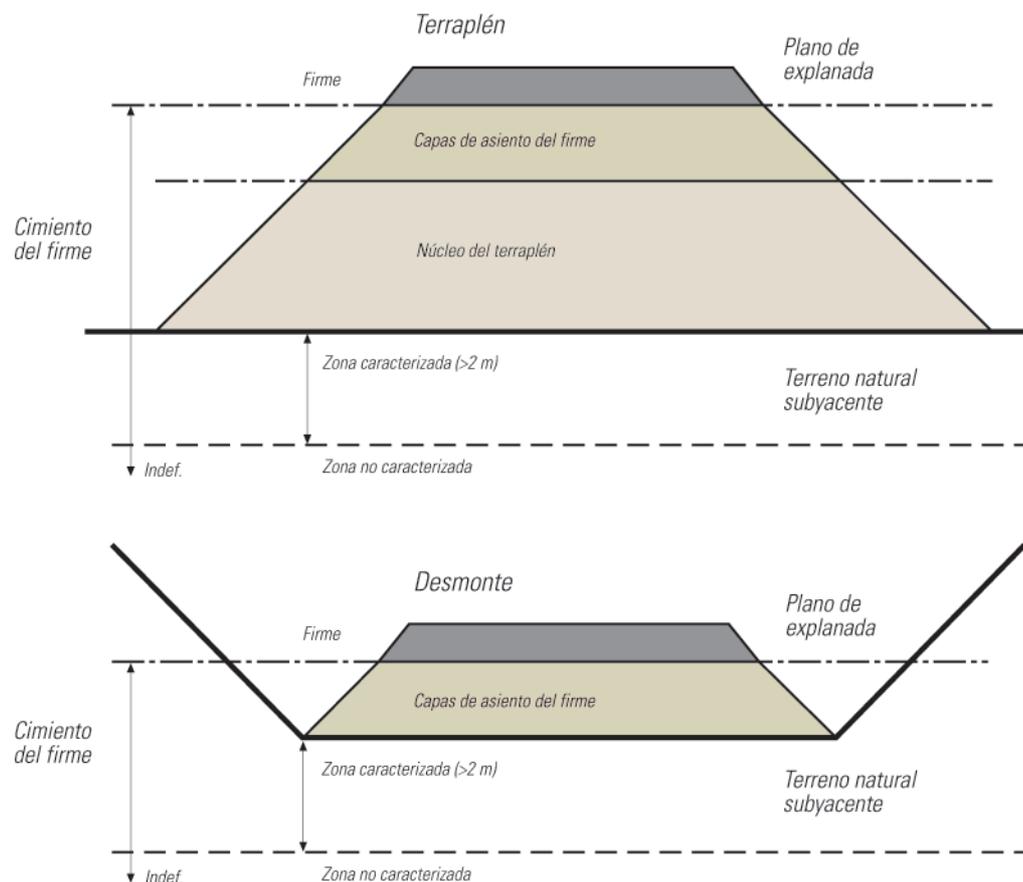
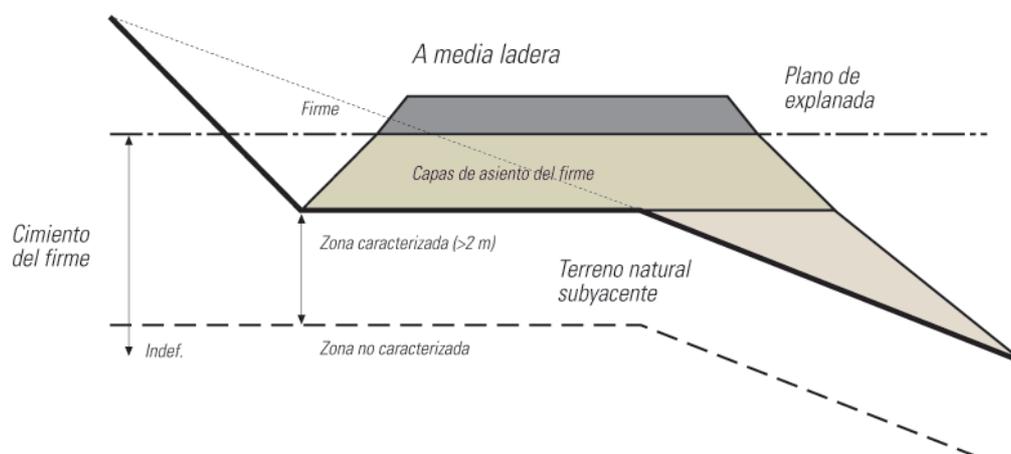


Figura 1. Esquema del cimiento del firme (cont.)



3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE SUELOS Y MATERIALES

En la tabla 3.3 se establecen la clasificación de suelos y materiales así como las características exigibles para su utilización en la formación del cimiento del firme que deberán reflejarse en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto de construcción, junto con los símbolos empleados en esta Instrucción.

Tabla 3.3 Suelos y materiales para el cimiento del firme

Símbolo	Designación del material	Características	Prescripciones complementarias para su empleo en núcleo de terraplenes	Prescripciones complementarias para su empleo en capas de asiento
SIN	Suelo inadecuado	No cumple las condiciones de los demás tipos de suelos	No utilizable	No utilizable
S00	Suelo marginal (*)	75% < 15 cm LL < 90 {o si LL ≥ 90 IP < 0,73 (LL-20)} M.O. < 5% S.S. < 20%	Estudio especial (colapso, hinchamiento, erosionabilidad) no utilizable en zonas inundables	No utilizable
S0	Suelo tolerable (*)	75% < 15 cm LL < 30 {ó si 30 < LL ≤ 65 IP ≥ 0,73 (LL-20)} M.O. < 2% S.S. < 5%	CBR ≥ 3 Hinchamiento < 3% no utilizable en zonas inundables	No utilizable
S1	Suelo adecuado (*)	100 % < 10 cm pasa # 0,08 < 35% LL < 30 {o si 30 < LL ≤ 40 IP ≥ 0,73 (LL-20)} M.O. < 1% S.S. < 0,2%	(1) CBR ≥ 3 Hinchamiento < 3%	CBR ≥ 5 Hinchamiento < 3% solo utilizable sobre suelo inadecuado, marginal o tolerable
S2	Suelo seleccionado tipo 2 (**)	100% < 10 cm pasa # 20 > 70% pasa # 2 < 80% pasa # 0,080 < 25% LL < 30 M.O. < 0.2% S.S. < 0.2%	(2) CBR ≥ 3 Hinchamiento < 1%	CBR ≥ 10 Hinchamiento < 1%

S3	Suelo seleccionado tipo 3 (**)	100% < 8 cm pasa # 20 > 70% pasa # 2 < 75% pasa # 0,08 < 20 LL < 30 M.O. < 0,2% S.S. < 0,2%	CBR ≥ 3 Hinchamiento < 1%	CBR ≥ 20 Hinchamiento < 1%
S4	Suelo seleccionado tipo 4 (**) (3)	100% < 6 cm pasa # 2 < 45% pasa # 0,08 < 15% LL < 30 M.O. < 0,2% S.S. < 0,2%	CBR ≥ 3 Hinchamiento < 1%	CBR ≥ 40 Hinchamiento < 1%
SC-1	Suelo estabilizado con cal o cemento tipo 1	100% < 10 cm Cal o cemento >2%		CBR a los 7 días ≥ 5
SC-2	Suelo estabilizado con cal o cemento tipo 1	100% < 8 cm cal o cemento >3%		CBR A LOS 7 días ≥ 10
SC-3	Suelo estabilizado con cemento tipo 3	100% < 8 cm		Resistencia a compresión simple a 7 días 1,5 MPa
Z	Zahorras	Art. 501 del PPTGCA	Art. 501 del PPTGCA	Art. 501 del PG3
ROCA	Desmonte en roca	Art. 320 del PG3		Regulación con hormigón H-50
P	Pedraplén	Art. 331 del PG3	Art. 331 del PG3	No utilizable en capas de asiento
T.U.	Todo uno	Art. 333 del PG3	Art. 333 del PG3	No utilizable en capas de asiento

(*) si pasa # 0.4 < 10% no tener en cuenta prescripciones de plasticidad
(**) si pasa # 0.4 < 5% no tener en cuenta la prescripción de plasticidad
M.O. = Materia orgánica
S.S. = Total sales solubles incluyendo el yeso
Hinchamiento en edómetro según Norma UNE 103.601
(1) Sobre suelos inadecuados, o marginales, si no se utiliza capa filtro, se ha de cumplir 100% < 5 cm y # 0,080 > 20%
(2) Sobre suelos inadecuados, marginales, o tolerables, si no se utiliza capa filtro, se ha de cumplir 100% < 5 cm y # 0,080 > 20%
(3) Podrán clasificarse dentro de este grupo los alberos y alberizas que no cumpliendo el criterio de desgaste Los Ángeles presenten las siguientes características: IP < 5; hinchamiento 0%; equivalente de arena >25; retiene #25 < 25%; #0,080 < 20%.
(4) A efectos de clasificación, el CBR debe obtenerse con los suelos compactados al 95% del Proctor Normal

3.2.3 RECONOCIMIENTO DEL TERRENO NATURAL SUBYACENTE

Se analizará el terreno natural subyacente al firme en una profundidad de al menos 2 m. El reconocimiento y estudio del terreno natural como cimiento de terraplenes o pedraplenes así como el estudio de la estabilidad de los desmontes quedan fuera del ámbito de la presente Instrucción.

El reconocimiento del terreno natural subyacente, desde el punto de vista del dimensionamiento de firmes, se efectuará de acuerdo con los siguientes criterios mínimos:

FASE 0. Se utilizará como información de partida la procedente de estudios previos y la recogida en la bibliografía existente (mapa geotécnico general a escala 1:200.000 y mapas geológicos a escalas 1:200.000 y 1:50.000 publicados por el Instituto Tecnológico y Geominero de España, estudios previos de corredores ya realizados, etc.).

Se efectuará un estudio geológico de detalle que permita efectuar una primera tramificación del trazado tomando en consideración las formaciones afectadas. En proyectos de trazado y construcción, el estudio geológico se realizará a escala 1:5.000.

FASE 1. Se efectuará una calicata por cada cambio de material y al menos una cada 300 m en categorías de tráfico T2 o superiores y una calicata cada 500 m en categorías de tráfico inferiores. En las calicatas se tomarán muestras de las distintas formaciones afectadas determinándose la humedad a diferentes profundidades, para su análisis en laboratorio.

En los tramos de desmonte en los que no sea posible reconocer el terreno natural de cimiento del firme con calicatas, se efectuarán, salvo que se realice un estudio alternativo debidamente justificado, al menos un sondeo mecánico cada 500 m. En cualquier caso, siempre se realizará al menos 1 sondeo mecánico por desmonte. Los sondeos alcanzarán una profundidad de al menos 2 m bajo las capas previstas de asiento del firme.

Los trabajos de reconocimiento definirán la presencia o ausencia del nivel freático en los 2 m situados bajo las capas previstas de asiento del firme.

FASE 2. Las muestras procedentes de las calicatas y los sondeos mecánicos se caracterizarán mediante ensayos de identificación (granulometría, límites de Atterberg, humedad natural), y ensayos químicos (sulfatos, sales solubles, materia orgánica).

Se realizará una identificación previa conforme a la tabla 3.3 y se definirán grupos homogéneos entendiendo como tales los suelos contiguos a lo largo de la traza y que, según los ensayos anteriores pertenecen al mismo tipo.

Sobre muestras representativas de cada grupo homogéneo se determinarán la densidad máxima Proctor e índice CBR. Se seleccionará como CBR de proyecto de cada grupo homogéneo el que corresponda a un nivel de confianza del 95%, salvo en el caso en que el número de ensayos sea inferior a 5, para el cual el CBR de proyecto será el menor de los obtenidos. El número de ensayos a realizar por grupo homogéneo de suelo será el indicado en la tabla 3.4, exceptuando el caso en que únicamente se cuente con muestras procedentes de sondeos, sobre los que se realizarán los ensayos que permitan las cantidades disponibles de muestra.

Tabla 3.4 Número mínimo de ensayos de CBR en función de la categoría del tráfico

Categoría de tráfico	Nº de ensayos de CBR
T2 o superior	6 a 8
T3	4 a 6
T4	1 a 2

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto (PPTP) definirá el ensayo de compactación de referencia (Proctor Normal o Modificado) para la definición de la densidad a alcanzar en obra. A efectos de la clasificación de suelos y para la estimación de valores para el cálculo, el ensayo CBR se realizará con la humedad óptima del ensayo Proctor Normal y una densidad del 95% de la máxima Proctor Normal para suelos de inadecuados, marginales, tolerables o adecuados, y con la humedad óptima del ensayo Proctor Modificado y una densidad del 95% de la máxima Proctor Modificado para suelos seleccionados y estabilizados.

FASE 3. La consistencia del terreno natural subyacente se determinará mediante su CBR de laboratorio realizado sobre muestras recompactadas, con los criterios señalados anteriormente, o con las técnicas habituales de reconocimiento geotécnico, entre las que se admiten:

- Ensayos de penetración dinámica.
- SPT.
- Ensayos presiométricos.

Estos ensayos de campo se realizarán, salvo ineludible necesidad, en período húmedo, con la frecuencia necesaria para caracterizar las distintas formaciones afectadas y, al menos, un ensayo por kilómetro, cuidando que la extrapolación de la información obtenida en estos ensayos se realice mediante procedimientos geológicos o geofísicos debidamente justificados.

A estos efectos se considerará período húmedo aquél en el que el mes anterior a las medidas, en la estación meteorológica más próxima a la zona de estudio, se haya producido una precipitación mensual superior a 30 mm, y período intermedio cuando éstas sean superiores a 20 mm. A título orientativo, para la programación de los trabajos, se pueden incluir en el período húmedo los meses de diciembre a abril, ambos inclusive, y en el período seco, los meses de julio, agosto y septiembre. En caso de realizar los ensayos en período seco se dividirán los valores obtenidos por dos, y en período intermedio por 1,5.

A efectos de dimensionamiento del firme, cada grupo homogéneo del terreno natural se clasificará con los criterios definidos en la tabla 3.3, determinando el índice CBR en laboratorio, o bien, estimándolo mediante correlaciones con otros ensayos geotécnicos. En este sentido, el índice CBR podrá estimarse a partir de los resultados de los ensayos SPT utilizando las correlaciones de la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Correlación CBR-SPT

Categoría	N _{SPT}	
	Material angular	Material cohesivo
0,2	< 5	< 2
2	10	5
3	12	7
5	15	10
10	20	15
20	25	17
30	30	20

Cuando el terreno natural subyacente esté constituido por suelos tolerables o inadecuados con valores del índice de plasticidad mayores de 18, será necesario realizar un estudio especial en el que al menos se determinen los posibles procesos de hinchamiento o retracción que afecten al terreno del cimiento, el espesor de la capa activa, y el potencial de hinchamiento del suelo. Para tráfico T3 o superiores, este estudio especial incluirá al menos los siguientes análisis:

- Determinación de la expansividad del suelo en el aparato Lambe.
- Hinchamiento libre del suelo en edómetro, sobre muestras inalteradas, y en su defecto, remoldeadas y compactadas con la densidad y humedad *in situ*, con una presión vertical igual a la prevista bajo la calzada, al nivel de la muestra.

Para tráfico T4, se determinarán, al menos, los hinchamientos en el ensayo CBR.

Cuando del estudio especial se deduzca que el terreno es susceptible de presentar procesos de hinchamiento o retracción (hinchamiento libre en edómetro superior al 3%) se llevará a cabo un estudio complementario para analizar la alteración de las condiciones de equilibrio natural de la humedad introducida por las obras:

- Si el cimiento del firme queda situado en la capa activa (afectada por cambios cíclicos de humedad), deberá estudiarse la posible repercusión de efectuar las obras en período seco o húmedo.
- Si el firme se proyecta en desmante o trinchera, deberán estudiarse asimismo los posibles levantamientos asociados a la descarga que sufre el terreno, que puede potenciar el proceso de inestabilidad volumétrica.

- Se estudiará el efecto de protección provocado por el firme en terrenos sensibles a los cambios de humedad, ya que puede dar lugar a un efecto de borde con movimientos horizontales, transversales al eje.
- Deberá considerarse el efecto de las filtraciones de agua a través del firme o procedentes de fugas de las obras de drenaje proyectadas, planteando los medios para que éstas no afecten al terreno natural subyacente.

FASE 4. El Anejo 7 del proyecto incluirá un perfil geológico-geotécnico en el que se definan los límites del terreno reconocido, los grupos homogéneos de suelo encontrados, la correspondiente tramificación del terreno natural subyacente en subtramos de al menos 500 m, salvo excepciones debidamente justificadas, junto con las características que definen cada subtramo, la situación del nivel freático, y en su caso, los estudios especiales y complementarios que se tendrán en cuenta para la redacción de los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares de los proyectos de construcción.

3.2.4 CLASIFICACIÓN DEL CIMIENTO

Se consideran las tres categorías de cimiento del firme que se indican en la tabla 3.6, según su capacidad de soporte, definida por su módulo de Young equivalente E_e , calculado según el procedimiento descrito en el capítulo 5 "Dimensionamiento de firmes". Además, deberán cumplirse todos los criterios definidos en el capítulo 4 "Criterios de proyecto", relativos al cimiento del firme.

Tabla 3.6 Categorías del cimiento del firme

Categoría	Módulo de Young E_e (MPa)
Baja	> 60
Media	> 100
Alta	> 160

La categoría necesaria del cimiento del firme será función del tráfico del proyecto, según se define en la tabla 4.1. Si el terreno natural subyacente no cumple los criterios señalados para la categoría correspondiente del cimiento del firme, deberán proyectarse las correspondientes capas de asiento.

3.3 CLIMA

3.3.1 ZONAS TÉRMICAS

A efectos del proyecto de firmes con pavimento bituminoso se definen cuatro zonas térmicas¹, en función de las temperaturas ambientales máxima y mínima, con los criterios mostrados en la tabla 3.7, siendo:

TM : Temperatura ambiente máxima anual de las medias mensuales máximas diarias, en °C, para un período de medida de 20 años.

Tm : Temperatura mínima anual absoluta, en °C, en la estación meteorológica más próxima a la zona por la que transcurre la carretera, para un período de medida de 20 años

Tabla 3.7 Zonas térmicas

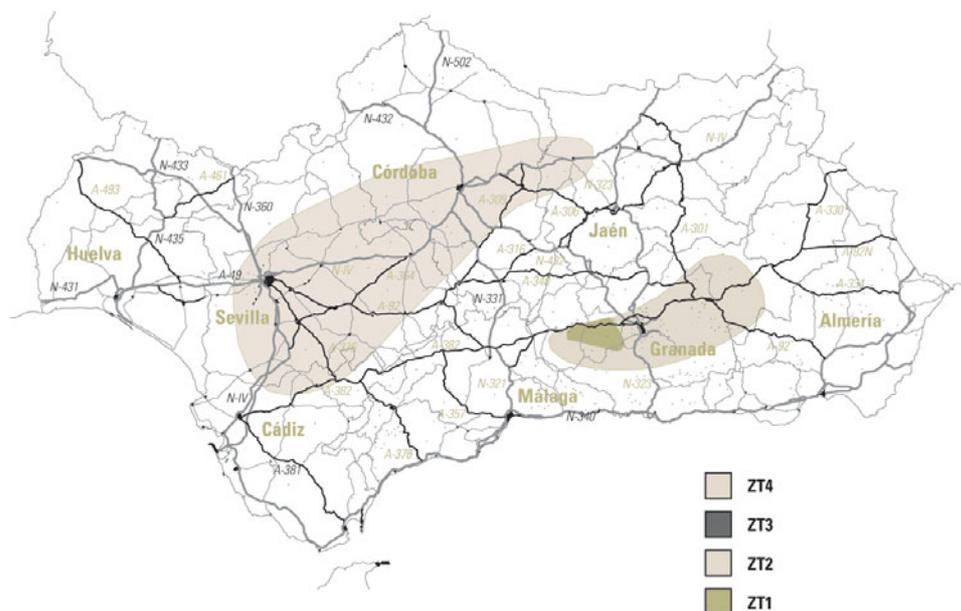
Zona térmica	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Temperatura máxima (°C)	$TM \leq 30$	$TM < 35$	$30 < TM \leq 35$	$TM > 35$
Temperatura mínima (°C)	$Tm \leq -8$	$Tm > -8$	$Tm \leq -8$	-

¹ La zona térmica influye en la selección del tipo de mezcla bituminosa a utilizar en el firme proyectado y, especialmente en la determinación del tipo de ligante.

² La zona pluviométrica influye en la selección del tipo de mezcla bituminosa a utilizar en el firme proyectado y en el tipo de pavimento sobre las obras de paso.

Si no se dispone de series de los datos correspondientes a las estaciones meteorológicas más próximas a la zona, o si los datos disponibles no abarcan un período de 20 años, puede hacerse la clasificación de la zona térmica mediante el mapa de la figura 2.

Figura 2. Mapa de zonas térmicas



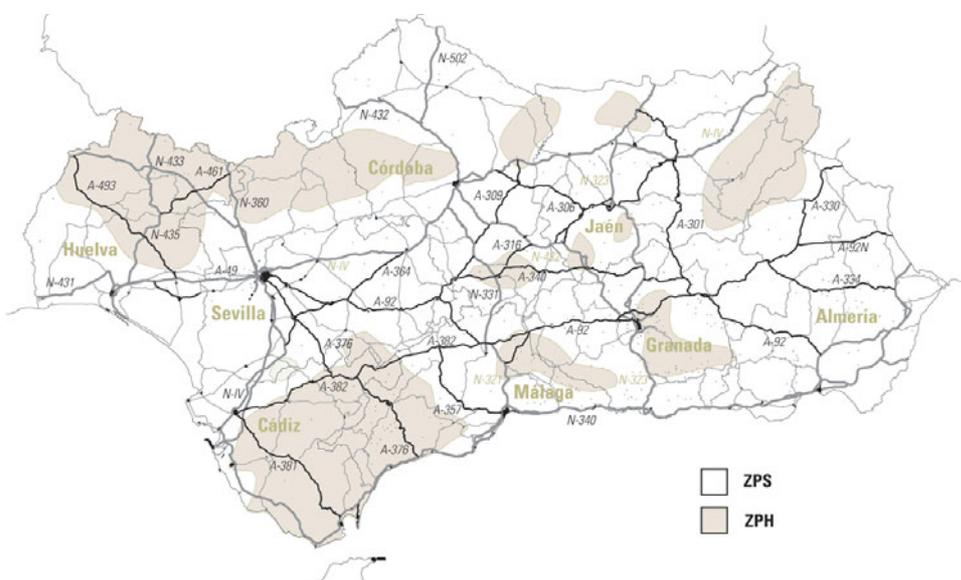
3.3.2 ZONAS PLUVIOMÉTRICAS

Se definen dos zonas pluviométricas² en función de la precipitación, con los criterios mostrados en la tabla 3.8, siendo P la precipitación media anual en un período de 20 años. En caso de no disponerse de datos de precipitaciones, puede utilizarse el mapa de la figura 3.

Tabla 3.8 Zonas pluviométricas

Zona pluviométrica	ZPS	ZPH
P (mm)	≤ 700	>700

Figura 3. Mapa de zonas pluviométricas





4.1 INTRODUCCIÓN

En el diseño del firme se tendrán en cuenta los criterios de proyecto que con carácter general se definen en este capítulo. Para ello, se procederá a la realización de un estudio que se incluirá en el anejo nº 10 "Estudio de Firmes y Pavimentos" del Proyecto de Construcción (Normas para la Redacción de Proyectos - O.C 6/95) y cuyo contenido se estructurará en los siguientes epígrafes:

1. Datos existentes de los firmes adyacentes (evolución del comportamiento, características de textura superficial, deflexiones e Índice de Regularidad Internacional).
2. Materiales para las capas del firme disponibles en la zona mediante su caracterización, inventario y valoración de adquisición, transporte y puesta en obra.
3. Utilización de residuos o subproductos de la industria o la agricultura que favorezcan la solución de problemas medioambientales.
4. Tramificación del proyecto, caracterizando geotécnicamente los terrenos atravesados, realizando el perfil geológico-geotécnico de la traza.
5. Dimensionamiento del firme, tanto la estructura como el cimiento, incluyendo los pavimentos sobre las obras de paso, mediante el programa ICAFIR
6. Programación para la correcta ejecución del firme.
7. Selección de la capa de rodadura, teniendo en cuenta que la selección del mismo tipo de pavimento que los firmes adyacentes simplifica las tareas de conservación, y la comodidad y seguridad en la circulación.
8. Comparación de costes de las diferentes soluciones viables técnicamente (al menos tres), incluyendo los costes de construcción inicial, conservación, reparaciones y reconstrucción al final de la vida de servicio.
9. Estudio de posibles tramos de ensayo, con la propuesta de medidas de auscultación y parámetros de seguimiento.

4.2 DEFINICIÓN DE TRAMOS DE PROYECTO

Dentro del ámbito de la presente Instrucción, la carretera objeto del proyecto se dividirá en **tramos de proyecto** de longitud mínima 5 km, o la correspondiente al proyecto de construcción si es de menor longitud, medidos sobre el eje de la vía, en los cuáles deben mantenerse fijos los factores de diseño considerados y, por tanto, la sección de firme de proyecto. En casos específicos, debidamente justificados, se podrán considerar tramos menores de 5 km. La definición de los tramos se realizará en función de los condicionantes que presenten los factores de diseño, es decir, las características del terreno natural de la traza, posibles variaciones del tráfico de proyecto, los materiales disponibles, las características geométricas, etc. Se elegirá como **tráfico de proyecto del tramo** el de mayor categoría que se presente dentro de él.

4.3 CRITERIOS DE PROYECTO PARA EL CIMIENTO DEL FIRME

Una vez definidos los tramos de proyecto, se establecerá para cada uno de ellos la categoría del cimiento del firme a emplear en función del tráfico de proyecto del tramo, atendiendo a los criterios establecidos en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Categorías mínimas del cimiento del firme

Categoría del cimiento	Suelos admisibles en capas de asiento
Baja	T4
Media	T3 y T4
Alta	T0, T1, T2, T3 y T4

La selección de la categoría de cimiento del firme, para aquellos tráficos en los que sea posible utilizar varias categorías, se realizará en función del terreno natural subyacente, de los suelos disponibles, y del coste total de la solución. El diseño del cimiento del firme debe tener como objeto conseguir las capacidades de soporte exigidas y aprovechar al máximo los suelos procedentes de las excavaciones realizadas en la propia obra.

En general, cada tramo de proyecto definido, incluirá a su vez varios *subtramos homogéneos*³ del terreno natural subyacente. Para cada uno de ellos, se dimensionará una *sección tipo* mínima según el procedimiento descrito en el apartado 5.3.2. La sección tipo mínima de cimiento se entenderá formada por las capas de asiento mínimas necesarias para conseguir la categoría de cimiento deseada.

En cada subtramo se debe disponer al menos la sección mínima del cimiento calculada. Para ello, en desmonte, deberá excavar hasta la profundidad necesaria para la colocación de la sección mínima, y en el núcleo del terraplén, deberán colocarse bajo ésta los suelos de aportación necesarios para alcanzar la cota del plano de explanada.

Una vez dimensionada la sección tipo de cada subtramo el proyectista podrá optar por agrupar aquellos que considere oportunos tomando como sección tipo común del grupo aquella que permita conseguir la categoría del cimiento del firme en el grupo de subtramos, lo cual deberá justificarse mediante su cálculo⁴ como estructura multicapa.

4.3.1 DISPOSICIÓN DE SUELOS

La disposición de suelos para la formación del cimiento, tanto en capas de asiento como en núcleo de terraplenes, debe adecuarse a los siguientes criterios:

- La zona superior de las capas de asiento debe ejecutarse con suelos de calidad o con suelos estabilizados (ver tabla 4.2).

Tabla 4.2. Suelos admisibles en capas de asiento

Categoría	Suelos admisibles en los 50 cm superiores	Profundidad mínima en desmonte de los suelos inadecuados marginales no estabilizados respecto al plano de explanada (CM)
Baja	S1, S2, S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	50
Media	S2, S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	75
Alta	S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	100

³ Se entiende que la división del terreno natural en subtramos homogéneos es previa a la definición de los tramos del proyecto. Para ello, se seguirán las fases descritas en el apartado 3.2.3 "Reconocimiento del terreno natural subyacente".

⁴ Esto llevará necesariamente a la realización del cálculo de la capacidad de soporte del cimiento, de cada una de las secciones tipo, sobre el terreno natural subyacente de menor capacidad portante de los subtramos que vayan a agruparse.

- Los suelos deben disponerse con una gradación adecuada de calidades para evitar contaminaciones y aprovechar al máximo su capacidad de soporte, que depende del apoyo.
- Los suelos inadecuados, marginales, o muy susceptibles al agua si no están tratados con conglomerantes, necesitan sobre ellos suelos impermeables, tipo S0 ó S1, membranas impermeables, o suelos estabilizados, para evitar la entrada de agua.
- Con suelos tolerables o adecuados, el aumento del espesor de capa reduce las tensiones en los suelos subyacentes pero apenas produce un aumento de la capacidad de soporte del cimiento del firme.
- En general, para facilitar la construcción, es conveniente buscar disposiciones sencillas, con un reducido número de suelos distintos.
- El diseño de las capas de asiento debe tratar de aprovechar al máximo los suelos procedentes de las excavaciones realizadas en la propia obra.
- Si se utilizan suelos de préstamo, debe indicarse claramente su localización y los volúmenes disponibles.
- Si sobre un suelo estabilizado tipo SC-3 se coloca una capa granular permeable, debe estudiarse especialmente el drenaje de agua infiltrada a través del firme.
- En secciones a media ladera se adoptará, para las capas de asiento del desmonte, la misma solución que para el terraplén.
- Los espesores de las tongadas de construcción de las capas de asiento se definirán iguales a los de cálculo con los valores definidos en el apartado 5.3.2.2.
- En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares se exigirá que, antes de colocar el firme definitivo, se estabilicen los asientos diferenciales posteriores a la construcción de rellenos. Se considera que dichos asientos diferenciales se han estabilizado cuando la diferencia entre los asientos absolutos de dos puntos del plano de explanada que disten 20 m, medidos en un intervalo de tres meses, sea inferior a los límites indicados en la tabla 4.3. Como mínimo deberá comprobarse que se cumplen estos criterios en los siguientes casos:
 - Terraplenes de más de 15 m de altura.
 - Transición de obras de fábrica a terraplenes de más de 5 m de altura.
 - Transición de desmonte a terraplenes de más de 10 m de altura.
 - Terraplenes sobre suelos blandos.

En las transiciones de desmonte a terraplén, o de obra de fábrica a terraplén, deberá considerarse la necesidad de ejecutar cuñas de transición con material de menor deformabilidad. En el primer caso se escalonará el cimiento del terraplén.

Tabla 4.3. Asiento diferenciales máximos postconstructivos para tramos de 20 m en la coronación de terraplenes

Velocidad de proyecto	Máxima diferencia entre los asientos absolutos en tres meses de dos puntos que disten 3 m entre sí (cm)
120	1,0
100	1,5
80 – 60	3,0

La estabilización de suelos consiste en la mezcla de suelo con aditivos para mejorar sus características. Los aditivos más usuales son la cal y el cemento, aunque pueden utilizarse otros (emulsiones o betún, cenizas volantes, escorias, etc.). La estabilización puede realizarse en planta o *in situ*, aunque por razones económicas suele ser preferible ésta última.

Sus principales campos de aplicación son:

- Tratamiento de suelos plásticos en los fondos de desmonte y en las capas de asiento de los terraplenes.
- Aumento de la capacidad de soporte de las capas de asiento, o disminución de sus espesores.

Deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones para el análisis de la estabilización más adecuada a cada tipo de suelo.

La estabilización con cal es generalmente adecuada con suelos que cumplan las siguientes condiciones:

- Suelos con una cantidad suficiente de partículas finas (pasa 80 μm) para que se pueda producir la reacción con las arcillas. Se recomienda un valor no inferior al 35%, y un límite mínimo del 15%.
- Suelos muy plásticos; ya que con los suelos de plasticidad baja la cal suele ser inactiva. Este tratamiento se recomienda para suelos con un $IP > 18$.

En los suelos muy plásticos, si además de disminuir la sensibilidad al agua, se pretende mejorar notablemente la capacidad de soporte, un tratamiento muy adecuado es el mixto con cal y cemento. Mediante un tratamiento inicial con una dotación reducida de cal (1%), el suelo adquiere una condición arenosa, adecuada para el tratamiento con el cemento, consiguiéndose además una buena homogeneidad en la estabilización final.

Para las estabilizaciones con cal se utilizará cal apagada. En el caso de suelos muy secos la utilización de lechadas de cal puede presentar ventajas.

Para la estabilización con cemento generalmente los suelos más adecuados son los siguientes:

- Suelos de granulometría continua, con más de un 50% de material que pasa por el tamiz 5 mm, y con un contenido entre el 10% y el 35% que pasa por el tamiz 630 μm . Estos suelos se pulverizan y se mezclan con una cierta facilidad.
- Suelos de plasticidad moderada ($10 < IP < 18$) o baja ($IP < 10$).

En general puede utilizarse cualquier tipo de cemento, aunque es conveniente que sea de resistencia relativamente baja. En suelos muy arcillosos es conveniente comparar distintos tipos para ver cual es más adecuado para la arcilla de que se trate.

En cualquier caso, deben realizarse los ensayos de laboratorio pertinentes con el fin de comprobar cual es la estabilización más conveniente en cada caso concreto.

La presencia de materia orgánica en el suelo ($> 2\%$) puede eliminar el efecto de la estabilización, tanto con cal como con cemento. Los suelos con sulfatos deben estabilizarse, en el caso del cemento, con conglomerantes resistentes a su efecto.

4.3.2 AGUA EN EL TERRENO

El sistema de drenaje se diseñará de forma que se garantice que la superficie del plano de explanada queda por encima del nivel de la capa freática. La profundidad mínima del nivel freático respecto al plano de explanada será la definida en la tabla 4.4, en función del tipo de suelo que caracteriza el terreno natural subyacente de cada subtramo homogéneo.

Tabla 4.4. Profundidad mínima del nivel freático respecto al plano de explanada

Terreno natural subyacente	Profundidad del nivel freático
Inadecuado o marginal	160
Tolerable	140
Adecuado	120
Seleccionado	100

A tal fin, se adoptarán medidas tales como la elevación de la rasante del plano de explanada, la colocación de drenes subterráneos, la interposición de una capa drenante, etc. Por otro lado, se asegurará la evacuación del agua infiltrada a través del firme de la calzada y arcenes, y proveniente de los terrenos próximos. La evacuación de agua debe preverse también para la fase de construcción del cimiento del firme, proyectando la red provisional correspondiente de cunetas y bajantes, adecuada para esta fase (ver también apartado 4.8).

En desmonte en roca, se evitará la retención del agua en el plano de explanada mediante los drenajes adecuados, y se rellenarán las depresiones que retengan agua con hormigón tipo H-50.

4.3.3 PENDIENTES TRANSVERSALES

Siendo p la pendiente transversal de la coronación del núcleo del terraplén, fondo de desmonte o plano de explanada, y p' la pendiente transversal de la superficie del pavimento, se cumplirá lo siguiente:

- En las fases constructivas del núcleo del terraplén o fondo de desmonte en tierra,

$$|p| \geq 4\%$$

En rampas puede admitirse que esta pendiente se obtenga hasta con un ángulo de 60 grados con el eje.

- En el plano de explanada,

$$p = p'$$

4.3.4 CAPAS ANTICONTAMINANTES

Con el fin de evitar contaminaciones, se estudiará la conveniencia de colocar capas filtro o geotextiles separadores entre suelos seleccionados tipo S3 o superiores y la capa inferior, cuando ésta esté constituida por suelos tolerables, marginales o inadecuados con abundantes finos plásticos. Las capas anticontaminantes estarán constituidas por alguno de los siguientes materiales:

- Arena o albero⁵ en espesor no inferior a 10 cm.
- Geotextiles de separación.

La utilización de geotextiles, aunque se prevean con una función de refuerzo, no conllevará la disminución del espesor de los suelos de las capas de asiento.

⁵ Con las especificaciones de la tabla 3.3.

4.3.5 TRATAMIENTOS SOBRE SUELOS DE GRAN PLASTICIDAD

Son suelos de gran plasticidad los suelos tolerables, marginales o inadecuados cuyo índice de plasticidad (IP) sea superior a 18.

Este tipo de suelos puede tener un comportamiento que se vea muy afectado por la humedad, por lo que deben cuidarse especialmente los drenajes superficiales y profundos. En estado de saturación pueden reblandecerse disminuyendo drásticamente su capacidad de soporte. Con los cambios de humedad, el resultado puede ser una pérdida de regularidad de la superficie del firme por hinchamientos o reblandecimientos diferenciales, la rotura de las mezclas bituminosas, especialmente de las más rígidas por falta de capacidad de soporte y el agrietamiento del firme por retracción del cimientado en épocas de sequía. Una vez identificado el potencial de hinchamiento de este tipo de suelos, tal y como se indica en el apartado 3.2.3, en el caso de que resulten peligrosos (hinchamiento libre en edómetro > 3%) pueden plantearse los siguientes tratamientos:

- Estabilización con cal, o en su caso, mixta con cal y cemento.
- Sustitución por material inerte destinado a reducir la magnitud del hinchamiento y los asentamientos diferenciales.
- Impermeabilización del firme. El planteamiento de un firme impermeable debe tener en cuenta la formación de fisuras por envejecimiento del firme y prever los trabajos de mantenimiento y refuerzo necesarios. La impermeabilización del firme debe prolongarse al menos a la zona cubierta por los arcones, cuidando especialmente la unión entre la calzada y los arcones.
- Impermeabilización del cimientado. Pueden emplearse láminas impermeables o disponer una capa de suelo suficientemente impermeable bajo las capas de asiento del firme.

Es importante evitar la acumulación de agua en el contacto entre el terreno de aportación y el terreno natural potencialmente expansivo. En este sentido, el terreno de aportación situado en contacto con el terreno natural debe ser suficientemente impermeable o, en caso contrario, la superficie del terreno natural debe tener una pendiente suficiente, no inferior al 4%, para evacuar el agua infiltrada. En cualquier caso, con este tipo de suelos deben proyectarse sistemas de drenaje superficial y profundo adecuados.

Además, no se utilizarán firmes con capas tratadas con cemento en aquellos tramos cuyo terreno natural subyacente se haya caracterizado como suelo inadecuado o marginal. En estos casos tampoco se utilizarán firmes con pavimento de hormigón, excepto cuando el tráfico sea de categoría T4. Esta limitación no se extiende a las capas de asiento, en las cuáles sí son convenientes las estabilizaciones.

Si se utilizan en terraplenes, su humedad debe estar próxima al óptimo del ensayo Proctor Normal, la densidad alcanzada no debe ser excesiva (entre el 95% y el 100% de la máxima Proctor Normal), y se deben utilizar preferentemente, para su compactación, rodillos de pata de cabra. Si se utilizan en desmontes, deben trabajarse lo menos posible, ya que si se escarifican y recompactan aumentan los riesgos de hinchamiento.

4.3.6 ACTUACIONES SOBRE SUELOS COMPRESIBLES

Se incluyen aquí los suelos de elevada deformabilidad que pueden dar lugar a asentamientos de entidad de los rellenos que se cimientan sobre ellos, provocando deformaciones en los firmes.

Son depósitos de capas muy compresibles, generalmente de baja densidad. Suelen encontrarse en zonas bajas y frecuentemente se encuentran saturados. La presencia de materia orgánica en estos depósitos incrementa su deformabilidad y modifica la evolución con el tiempo de las deformaciones.

Los depósitos muy compresibles suelen presentar resistencias bajas, especialmente a corto plazo. En estas condiciones, antes de proceder al dimensionamiento del firme, debe llevarse a cabo un estudio geotécnico de detalle en el que se cuantifiquen los asentamientos previsibles, su evolución con el tiempo y las condiciones de estabilidad del

relleno sobre el que se sitúa el firme. En los casos en los que los asentos previsibles no sean admisibles por el firme o las condiciones de estabilidad no sean adecuadas, el estudio geotécnico deberá estudiar las posibles medidas correctoras entre las que pueden citarse:

- Tratamiento de sustitución. Consiste en la retirada del suelo deformable y su sustitución por material adecuado, convenientemente compactado, de forma que las condiciones de estabilidad y los asentos postconstructivos sean admisibles para el firme. Debe tomarse en consideración el hecho de que en determinadas ocasiones, en zonas en las que el espesor de suelo blando es importante, el nivel superior de suelo puede presentar un comportamiento resistente superior al de los materiales infrayacentes (deseccación, presencia de raíces con un efecto de armado,...) y su retirada puede ser desfavorable, especialmente en relación con la transitabilidad de la zona.
- Modificación de la geometría del relleno, suavizando los taludes o disponiendo bermas intermedias destinadas a mejorar sus condiciones de estabilidad.
- Consolidación de los suelos mediante precarga. El tratamiento de precarga puede acelerarse en determinadas situaciones mediante el empleo de drenes verticales o mechas drenantes.
- Tratamiento mediante columnas de grava.
- Disposición de inclusiones resistentes en el cimiento, entre las que pueden citarse la hinca de pilotes y los tratamientos mediante jet-grouting.
- Refuerzo del terraplén mediante geotextiles.
- Consolidación dinámica.
- Estabilización del suelo mediante técnicas de inyección.

En estas situaciones, los terraplenes de altura superior a los 3 m requerirán un estudio especial.

En las zonas donde sea previsible el desarrollo de asentos significativos, deben utilizarse exclusivamente firmes flexibles.

4.4 CRITERIOS DE PROYECTO PARA LA ESTRUCTURA DEL FIRME

Una vez diseñada la sección del cimiento en cada tramo de proyecto, se diseñará la estructura del firme teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

- El diseño del firme debe realizarse de manera que se mantenga la misma sección, al menos en cada uno de los tramos de proyecto definidos y, a ser posible, en todos aquellos con idéntica categoría de cimiento.
- El objetivo del diseño será seleccionar, entre los posibles materiales y espesores, los más adecuados técnica y económicamente, teniendo en cuenta el cimiento del firme definido, el tráfico previsto, el clima de la zona, las necesidades de drenaje, las disponibilidades de materiales para ejecutar las distintas unidades de obra y su coste de construcción y conservación.

Los espesores mínimos de proyecto serán al menos los obtenidos en el dimensionamiento, y deberán exigirse en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares para cada una de las unidades de obra.

4.4.1 FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO Y CAPAS INFERIORES NO TRATADAS CON CEMENTO

En el diseño de firmes con capas bituminosas, o granulares y bituminosas, se tendrá en cuenta, además de lo indicado en el capítulo 8 "Materiales para capas de firme", lo siguiente:

- El espesor mínimo de las capas granulares será de 20 cm para la zahorra y 15 cm para el macadam, en tongada única, o de 15 cm en varias. El espesor máximo de tongada será de 25 cm en todos los casos.
- El espesor mínimo de las capas de mezcla bituminosa será de 18 cm para tráfico T0 y T1, y de 12 para tráfico T2.
- Los espesores de las distintas capas de las mezclas bituminosas (rodadura, intermedia y base), serán crecientes de las capas superiores a las inferiores, y se seguirán los criterios del capítulo 8 para su definición. Las capas bituminosas más inferiores deberán tener en general el mayor espesor que sea posible desde el punto de vista constructivo, a fin de minimizar el número de superficies de contacto.

4.4.2 FIRMES CON PAVIMENTO BITUMINOSO Y CAPAS INFERIORES TRATADAS CON CEMENTO

En el diseño de firmes con capas inferiores tratadas con cemento se tendrá en cuenta, además de lo indicado en el capítulo 8 "Materiales para capas de firme", lo siguiente:

- De entre las posibles secciones con materiales tratados con cemento se utilizarán preferentemente aquellas con capas inferiores de suelocemento y capas superiores de materiales bituminosos.
- El hormigón compactado podrá utilizarse únicamente para tráfico T3 o T4.
- El espesor mínimo de tongada de las capas tratadas con cemento será de 20 cm para tráfico T3 o superiores, y de 18 cm para los tráfico T4. El espesor máximo de tongada será de 25 cm.
- El espesor mínimo del conjunto de capas bituminosas sobre las capas tratadas con cemento, será de 12 cm para tráfico T2 y T3, y de 15 cm para tráfico T0 y T1. En las zonas climáticas ZT4, el espesor mínimo será de 15 cm en todos los casos. Con tráfico T4 podrán utilizarse menores espesores e incluso tratamientos superficiales para cualquier zona climática.
- Cuando se utilicen rodaduras de mezcla bituminosa drenante, las exigencias de espesores mínimos del conjunto de mezclas bituminosas se incrementarán en la mitad del espesor de la mezcla drenante.
- Los espesores de las distintas capas de las mezclas bituminosas (rodadura, intermedia y base en su caso), serán crecientes de las capas superiores a las inferiores, y se seguirán los criterios del capítulo 8 para su definición. Las capas bituminosas más inferiores deberán tener en general el mayor espesor que sea posible desde el punto de vista constructivo, a fin de minimizar el número de superficies de contacto.
- Las capas de base de gravacemento para tráfico T2 o superiores, deben apoyarse en otras capas de firme o de asiento tratadas con cemento.
- Las capas de gravacemento y hormigón compactado deberán siempre prefisurarse en fresco. Además, para tráfico T2 o superiores, y zonas térmicas ZT1, ZT2 y ZT4, se dispondrá un sistema "antifisuras" del tipo arena-betún o geotextil impregnado. Las capas de suelocemento se prefisurarán únicamente para tráfico T2 o superiores. En todos los casos, la fisuración se realizará transversalmente cada 3 ó 4 m, y longitudinalmente, a las mismas distancias, si la anchura de la calzada es superior a 7 m.
- Se tendrá en cuenta que los firmes con capas tratadas con cemento se comportan mejor sobre cimientos de firme cuya capa de asiento superior esté estabilizada con cemento.

4.4.3 FIRMES CON PAVIMENTO DE HORMIGÓN

En el diseño de firmes con pavimento de hormigón se tendrá en cuenta, además de lo indicado en el capítulo 8 "Materiales para capas de firme", lo siguiente:

- Para las categorías de tráfico pesado T0 y T1 se utilizarán pavimentos de hormigón en masa con juntas, provistos de pasadores. Si se justificase su conveniencia podrán ser también de hormigón armado sin pasadores.
- Si se utilizasen pavimentos de hormigón armado se pueden reducir en 4 cm los espesores del pavimento obtenidos para firmes de hormigón en masa. La cuantía geométrica de cada una de las armaduras longitudinales y transversales será del 0,7% para hormigones HP-45 y del 0,6% para hormigones HP-40. Se dispondrán anclajes al terreno en las extremidades de los pavimentos continuos de hormigón armado y en las secciones especiales que lo requieran.
- El espesor mínimo del pavimento de hormigón en masa será de 20 cm para tráficos T2 o superiores, de 18 cm para tráfico T3, y de 15 cm para tráfico T4.
- Bajo el pavimento de hormigón se dispondrá, para tráficos T2 o superiores, una capa de espesor mínimo de 15 cm de hormigón magro o gravacemento resistente a la erosión, o bien, una capa drenante bituminosa o una capa tratada con cemento. En el caso de tráfico T4, el pavimento de hormigón podrá disponerse directamente sobre el cimientado del firme.

4.4.4 DISPOSICIÓN TRANSVERSAL

En la disposición de las distintas capas del firme en la sección transversal se cumplirán las siguientes prescripciones:

- La anchura de la capa de rodadura será al menos igual a la teórica de la calzada entre líneas de borde, incluido el sobreebanco en curva, más 20 cm por cada borde.

Tabla 4.5. Valores de los sobreebanco (cm)

Tipo	Material	cm
Por derrames	Hormigón	0
	Otros materiales	e_s
Por criterios constructivos	Bajo hormigón	e_s
	Bajo otros materiales	e_s
	Mezclas bituminosas	5
	Capas tratadas con conglomerantes hidráulicos	6 a 10
	Capas granulares	10 a 15

- Cada capa del firme tendrá una anchura, a , en su cara superior, igual a la de la capa inmediatamente superior, a_s , más la suma de los sobreebanco d y s indicados en la tabla 4.5 (ver figura 4). El sobreebanco podrá aumentarse si así lo exigiera el disponer de un apoyo para la extensión de la capa superior.
- La anchura extendida y compactada será siempre igual o superior a la teórica y comprenderá las anchuras teóricas de la calzada y/o arceles más los sobreebanco mínimos fijados en los planos. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará las anchuras máximas y mínimas de extendido, así como la situación de las juntas longitudinales y transversales necesarias.
- Se eliminarán los excesos laterales sin la compactación adecuada, excepto si forman parte del borde exterior de la plataforma. Se considerarán, salvo para categoría de tráfico pesado T4, secciones de firme distintas entre carriles de una misma calzada cuando disponga de dos o más carriles por sentido de circulación, con las siguientes prescripciones:

- La máxima diferencia de categoría de tráfico pesado entre carriles será de una⁶.
- La categoría del pavimento será la misma.
- Se utilizará la misma tipología de sección de firme.
- Las variaciones de espesor se harán en la capa más resistente, entendiéndose por tal aquella que tenga el mayor módulo de Young, sin incumplir las limitaciones de espesor contenidas en la presente Instrucción. Además, podrá variarse el espesor en esta capa en las secciones con pavimento de hormigón .
- Las variaciones de espesor serán transversalmente lineales, debiendo mantenerse los espesores mínimos correspondientes en el borde izquierdo (según el sentido de circulación) de cada carril (ver figura 5).

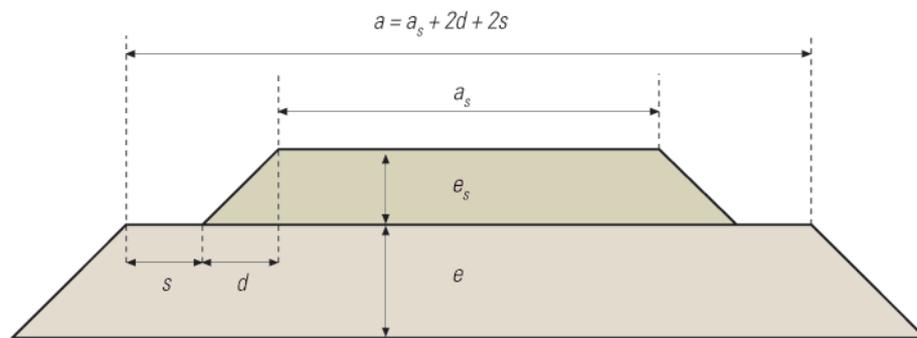


Figura 4. Esquema de sobreechanos para la sección del firme

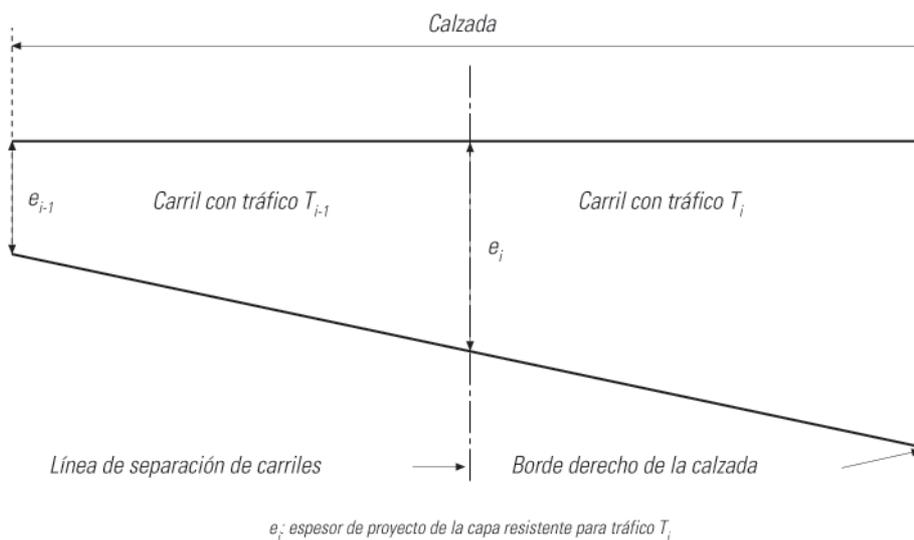


Figura 5. Variación de espesores de capas en la sección del firme

- La compensación de las variaciones de espesor para mantener las pendientes transversales mínimas en el pavimento del firme, se harán en la capa inferior del firme o en la superior de las capas de asiento.

⁶ A estos efectos se entenderá como una diferencia entre categorías, en los casos en que viene representada por un número y una letra (T2A, por ejemplo), la que sea una cifra inferior y termine en la misma letra T3A, en el ejemplo). En el caso T1, se considerará como una categoría inferior a T2A.

4.4.5 SECCIONES ESPECIALES PARA TRAVESÍAS URBANAS

En travesías urbanas es conveniente disponer firmes que aseguren una larga duración sin rehabilitaciones importantes, para disminuir las molestias originadas por las obras y evitar el recrecido y por tanto la disminución de la altura de los bordillos. Por otro lado, en muchas ocasiones discurren bajo la calzada conducciones de servicios que son objeto de frecuentes actuaciones de mantenimiento, lo que aconseja el uso de materiales de fácil reparación.

Por estas razones resultan muy adecuados los pavimentos de hormigón o los firmes mixtos con base de hormigón y pavimento bituminoso. En este último caso pueden disminuirse las exigencias de espesores mínimos de capas bituminosas a 8 cm para tráfico T3, 10 cm para tráfico T2 y 12 cm para tráfico superiores, ya que debido a la baja velocidad de los vehículos que atraviesan las poblaciones las juntas de retracción que inevitablemente aparecen en superficie no sufren grandes deterioros.

4.4.6 SECCIONES DE FIRMES PROVISIONALES

Se entiende por firmes provisionales aquellos proyectados para un período de tiempo limitado. En general, serán necesarios en alguna de las siguientes situaciones:

- a. Cuando se esperen asientos considerables en los terraplenes.
- b. Cuando sea necesaria la construcción de desvíos provisionales.
- c. Cuando el clima sea desfavorable para la construcción de la capas superiores del firme.

Una vez transcurrido el período de tiempo, deberá construirse dentro del mismo contrato el firme definitivo.

La realización del firme definitivo deberá estar obligatoriamente contemplada en el proyecto del firme provisional, y por tanto, no podrá considerarse el firme provisional como parte de una estrategia de construcción por etapas a medio o largo plazo. En el caso de que se esperen asientos en el terraplén, no podrán emplearse secciones de firme con capas inferiores tratadas con cemento, debiéndose proyectar firmes formados por capas granulares y bituminosas. Cuando sea necesaria la construcción de firmes para desvíos provisionales se justificará su sección mediante su dimensionamiento siguiendo los criterios generales del capítulo 5 "Dimensionamiento de firmes".

Los firmes provisionales se proyectarán siempre con todo el espesor de las capas granulares que correspondan al firme definitivo y un pavimento formado por:

- En tráfico T2 y superiores, una capa de mezcla abierta en frío sellada con una lechada, o una capa de gravae-mulsión, de 6 cm de espesor, sellada con tratamiento superficial.
- En tráfico T3 e inferiores, un triple tratamiento superficial.

4.4.7 ENSANCHES DE CALZADA

Cuando se proyecte un ensanche de calzada, deberá comprender la rehabilitación o refuerzo del firme antiguo, con el mismo período de proyecto para ambas actuaciones. Deberá acompañarse por tanto de una evaluación detallada del estado del firme existente, en cuanto a deterioros superficiales, capacidad de soporte (deflexiones) y condiciones de drenaje, junto con la descripción de los espesores y materiales que lo constituyen. En función de estos datos, junto con aquellos otros que se consideren necesarios, se proyectará el refuerzo para el firme existente de acuerdo con la Norma 6.3.- I.C. del Ministerio de Fomento [Ref. 9].

El diseño del firme del ensanche deberá cumplir lo indicado en esta Instrucción para firmes de nueva construcción. El diseño del firme nuevo se realizará de manera que se enrase su plano de explanada con el del firme existente. En el diseño del cimiento del firme se podrá disminuir la categoría exigida, permitiendo la categoría media para tráfico T2 o inferiores y la baja para tráfico T3 o inferiores. En general, se utilizarán suelos

estabilizados con cemento en la formación de las capas de asiento para no aumentar de manera innecesaria la profundidad del escalón lateral.

En la selección de materiales se tendrán en cuenta los criterios señalados en el apartado 4.10.1 de esta Instrucción, así como las posibles limitaciones en su extensión y compactación. Deberá estudiarse detalladamente la forma de dotar al firme de las pendientes transversales necesarias.

Si la obra se proyecta de manera que no se interrumpa el tráfico, se utilizarán materiales que minimicen las molestias derivadas de su construcción. No será necesario mantener los mismos materiales del firme antiguo. En algunas situaciones y, especialmente, en ensanches que requieran un incremento importante de la capacidad de soporte, puede ser conveniente proyectar secciones con capas tratadas con cemento o mezclas de alto módulo.

Las capas del firme existente deberán cortarse verticalmente y retranquearse, de manera que no coincidan las distintas juntas longitudinales. Así mismo, deberá prestarse especial atención a que la junta de la capa superior del ensanche con el pavimento existente no coincida en el mismo plano vertical con las nuevas zonas de rodada (puede situarse en el centro de los carriles, o en todo caso, muy próxima a la línea de separación de carriles).

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto de construcción deberán figurar las especificaciones necesarias para que no se produzcan situaciones de peligro para el tráfico por la existencia de escalones laterales durante la construcción (señalización adecuada, balizamiento, construcción con varios equipos para evitar el escalón, etc.). También figurarán las condiciones necesarias para que se permita el paso del tráfico sobre las unidades construidas (temperatura de las mezclas bituminosas, tiempos de fraguado en materiales tratados con cemento, etc.)

4.4.8 RECICLADO *IN SITU* EN FRÍO

En general, podrán reciclarse capas de mezclas bituminosas, de materiales granulares o tratados con cemento, o conjuntos de capas en la que existan estos materiales. La anchura mínima del tratamiento será la correspondiente a un carril o al arcén, salvo en situaciones muy justificadas, como por ejemplo ensanches deteriorados uniformemente a lo largo de un tramo. En estos casos, podrá contemplarse el reciclado de parte de un carril.

El reciclado *in situ* en frío se realizará añadiendo emulsión, o una mezcla de emulsión y un ligante hidráulico (cemento o cal), o bien cemento, a los materiales previamente fresados. En los dos primeros casos, se trata de una técnica de rehabilitación estructural, y en el último, de reconstrucción. Aunque en el objeto de esta Instrucción sólo entraría el segundo caso, se dan aquí criterios para ambos tipos de reciclado, hasta que se desarrolle la correspondiente normativa de refuerzos de la red de carreteras de Andalucía.

El reciclado *in situ* en frío es una técnica alternativa al fresado y reposición de firmes, o a la reconstrucción, actuaciones con las que deberá compararse su coste. Si como resultado de esa comparación en las que se incluirá el coste de la contaminación por transporte de los materiales, el coste del reciclado es análogo ($\pm 5\%$) o más económico, deberá llevarse a cabo la rehabilitación mediante reciclado *in situ* siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que antes de iniciarse los trabajos, se hayan llevado a cabo los estudios previos establecidos en 4.4.8.1.
- Que el pavimento a reciclar presente alguno de los condicionantes señalados en 4.4.8.2.

4.4.8.1 Estudios previos de la carretera

Antes de iniciarse los trabajos deberá llevarse a cabo un reconocimiento de la carretera con el fin de caracterizar adecuadamente el firme existente. Deberán definirse el tipo y espesor de las capas que la componen, las características de los materiales y su humedad *in situ*, la contaminación, en su caso, con arcilla de las capas granulares, la existencia de bordillos, obras de fábrica o ensanches, etc.

Para ello la campaña de reconocimiento comprenderá al menos una inspección visual del tramo, la medida de deflexiones y la toma de muestras representativas (al menos dos testigos por perfil y un perfil cada 500 m en tramos homogéneos, complementado con una cata por zona homogénea). Además, deberán analizarse los datos históricos de la carreteras que facilite la administración titular de la vía.

4.4.8.2 Condicionantes necesarios para el reciclado

La solución de reciclado *in situ* en frío se considerará cuando los firmes a reciclar presenten alguno de los siguientes condicionantes:

- Pavimentos agrietados por fatiga.
- Pavimentos sobre capas tratadas con cemento en los que aparezcan grietas transversales reflejadas de las de retracción, con una frecuencia de aparición importante y estando un elevado porcentaje de las mismas muy deterioradas en superficie (grietas ramificadas y/o con pérdidas graves de materiales).
- Firmes con superficies no agrietadas pero sobre las que no sea conveniente la aplicación directa de nuevas capas. En general, se trata de superficies con numerosos baches, bacheos, saneos, heterogéneas transversalmente, con casos evidentes de despegue de capas o de defectos en mezclas, que puedan corregirse mediante la técnica del reciclado.
- Firmes básicamente granulares, con recubrimientos bituminosos inferiores a 6 cm, en los que se quiera estabilizar el material granular existente; bien para aumentar su capacidad de soporte, o para disminuir su susceptibilidad al agua.

4.4.8.3 Reciclado *in situ* con emulsión bituminosa

En los reciclados con emulsión se distinguirán dos tipos. Se denominarán de tipo I a aquellos tratamientos que afecten única o fundamentalmente a capas bituminosas, y de tipo II, a aquellos otros que se realicen sobre capas granulares con recubrimientos bituminosos de pequeño espesor. Para su clasificación se atenderá a lo indicado en el apartado 8.12 "Materiales reciclados en frío *in situ* con emulsión bituminosa".

Además de lo indicado en el capítulo 8 "Materiales para capas de firme", se tendrá en cuenta lo siguiente:

- En todos los casos los criterios a emplear para la determinación de espesores serán los señalados en la Orden Circular 323/97 "Recomendaciones para el proyecto de actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso" del Ministerio de Fomento [Ref. 6], para las soluciones de fresado y reposición del firme existente. Para ello, se tomará la siguiente equivalencia de espesores: 1 cm de mezcla reciclada en frío tipo I equivaldrá a 0,75 cm de mezcla convencional, y de tipo II, a 0,5 cm de mezcla convencional.
- El espesor mínimo del tratamiento vendrá dado por el mayor de los dos valores siguientes: 6 cm, o el espesor de la capa o capas a reciclar más 1 cm. La primera limitación es un mínimo de compactación, dados los tamaños máximos usuales en los fragmentos de mezcla fresada. La segunda limitación va dirigida a evitar que queden pequeñas porciones de capa entre lo reciclado y el firme antiguo.
- El espesor máximo del tratamiento será de 15 cm, siendo sin embargo recomendable no superar los 12 cm. En caso de hacerlo, deberá considerarse la adición de cal o cemento. Con espesores mayores de los señalados es muy difícil conseguir la eliminación del agua, y por tanto una adecuada cohesión en el fondo de la capa.
- Para cualquier volumen de obra con tráfico T0, y en aquellas obras en las que se reciclen más de 60.000 m² con tráfico T1 o T2, deberá trabajarse con dos máquinas en paralelo o con una que permita reciclar un carril de una sola vez. Podrá obviarse esta exigencia si se demuestra en el tramo de prueba, que las irregularidades transversales, medidas con transversoperfilógrafo o regla de 3 m, son inferiores a 8 mm.
- Deberá considerarse en el proyecto la posibilidad de recurrir a riegos de protección en situaciones desfavorables.

- A efectos de conseguir una regularidad adecuada, con tráfico T2 y superiores, deberá colocarse sobre la capa reciclada un espesor mínimo de 10 cm de mezcla bituminosa en dos capas. Dentro de éste podrá incluirse el espesor medio de la regularización precisada. Con tráfico menores, se podrá disponer una única capa de rodadura sobre el material reciclado, bien de mezcla bituminosa en caliente, de mezcla abierta en frío, una lechada, o un simple tratamiento superficial. La necesidad de colocar dos capas podrá obviarse si en el tramo de prueba se demuestra que con una única se obtiene la regularidad requerida. En este caso, la longitud del tramo de prueba será como mínimo de 1 km.
- Las mezclas a utilizar sobre las capas recicladas serán del tipo semidenso (S) o denso (D). En la capa de rodadura sobre mezclas densas o semidensas, podrán también utilizarse mezclas discontinuas para capas finas o mezclas drenantes.
- Se considerará expresamente el drenaje del agua que pueda infiltrarse en la capa reciclada.

Deberá hacerse un estudio detallado de posibles medidas correctoras a aplicar siempre que se dé alguna de las situaciones siguientes:

- Cuando existan roderas por deformación plástica de la mezcla bituminosa.
- Cuando haya pérdida de adhesividad entre el árido y el ligante. En cuyo caso, deberá estudiarse qué tipo de emulsión o aditivo es el más adecuado.
- Cuando en el firme a reciclar aparezcan mezclas drenantes o abiertas, macadam o macadam por penetración, o capas sucesivas de lechadas. En este caso, si es necesario, se estudiará la posibilidad de reciclar capas inferiores en el espesor preciso, o de incorporar árido de aportación, para que el conjunto tenga la granulometría adecuada.

4.4.8.4 Reciclado *in situ* con cemento

Se trata de una técnica adecuada para firmes que necesiten una reconstrucción total o un refuerzo importante. En su aplicación, además de lo indicado en el capítulo 8 “Materiales para capas de firme”, se atenderá a lo siguiente:

- Para la determinación de espesores se considerará que el material reciclado con cemento es análogo estructuralmente a un suelocemento. Se debe llegar, mediante el procedimiento de cálculo analítico descrito en el capítulo 5, a estructuras de firme formadas por una base de suelocemento y un pavimento de mezcla bituminosa. En el dimensionamiento de estas secciones se considerarán los módulos del cemento indicados en la tabla 5.5.
- El espesor mínimo del tratamiento será de 20 cm. Para espesores menores las capas de materiales tratados con cemento pudieran presentar roturas prematuras.
- El espesor máximo del tratamiento será de 35 cm, no siendo recomendable superar los 30 cm. Estas limitaciones están impuestas sobre la base de las posibilidades de compactación de los equipos actuales.
- Deberá considerarse en el proyecto el riego de protección y curado correspondiente.
- En lo referente a la prefisuración de las capas y la colocación de sistemas “antifisuras”, se atenderá a lo indicado en este capítulo para el suelocemento.

4.4.9 TRAMOS DE ENSAYO

Podrá preverse en el proyecto la ejecución de tramos experimentales. La longitud total del tramo experimental no será superior a un kilómetro o al diez por ciento (lo que sea menor) de la longitud del tramo de proyecto. El diseño de los tramos experimentales deberá ser aprobado por la Dirección General de Carreteras de la Junta de Andalucía, que señalará los firmes o materiales a ensayar.

4.5 PROTECCIÓN AMBIENTAL

Todo proyecto de carreteras deberá incluir, dentro del anejo nº 10 “Estudio de Firmes y Pavimentos” del Proyecto de Construcción, un análisis de incidencias ambientales que analizará la utilización, dentro de las zonas en que resulte viable económicamente según el estudio comparado de costes de determinados residuos o subproductos. Entre otros: escorias, estériles de mina, cenizas volantes, plásticos reciclados, neumáticos usados, aceites usados de motor, materiales reciclados de firmes o materiales procedentes de demolición. Asimismo, cuando vayan a emplearse mezclas bituminosas, se estudiará la utilización de betunes modificados con productos reciclados de la industria o de la agricultura. Además, en aquellos proyectos de acondicionamiento o mejora de carreteras, se estudiará el reciclado del firme existente (ver apartado 4.4.8).

4.6 COMPARACIÓN DE COSTES

En cada proyecto se comparará el coste de al menos tres secciones de firme, cada una de ellas, a su vez, con tres secciones de capas de asiento del mismo entre varias de distintas tipologías, todas ellas válidas desde el punto de vista técnico.

La comparación de costes debe incluir en primer lugar la del *coste de construcción inicial*. Para diferencias de costes de construcción iniciales inferiores al 30%, se deberá realizar una comparación de costes a largo plazo para elegir la sección más adecuada. Si son superiores al 30%, la decisión puede basarse, junto a consideraciones técnicas y de disponibilidad de materiales, en el menor coste de construcción inicial.

La comparación de *costes a largo plazo* debe incluir el cálculo de los siguientes costes:

- Coste de construcción inicial.
- Coste de conservación.
- Coste de las reparaciones necesarias a lo largo del período de análisis.
- Coste de reconstrucción al final de la vida de servicio.

4.6.1 COSTE DE CONSTRUCCIÓN INICIAL

Los costes de construcción inicial de una determinada sección de firme se obtendrán como suma de los correspondientes a cada una de las unidades de obra que componen la sección, incluyendo los arcenes y drenes de firme en el caso de que difieran entre secciones.

Esta valoración se realizará con la base de datos del “Banco Oficial de Precios para Obras de Carreteras de la Junta de Andalucía” [Ref. 3].

4.6.2 COSTES DE CONSERVACIÓN, DE REPARACIONES Y DE RECONSTRUCCIÓN

Se incluirán aquí los costes de las operaciones ordinarias de conservación de los firmes, de rehabilitaciones superficiales o estructurales a lo largo del período de análisis y de reconstrucción al final de la vida de servicio. Para poder realizar la evaluación de costes, deben definirse *a priori* unos “escenarios de conservación” tomando el modelo que se presenta en el anejo 3 “Escenarios de conservación”, donde se incluyen tablas con las operaciones ordinarias de conservación, rehabilitaciones superficiales o estructurales a lo largo del período de análisis, y de reconstrucción del firme al final de la vida de servicio.

Los análisis deben referirse a un período de 20 años, para valorar también la incidencia de una reconstrucción o rehabilitación importante en los costes totales, y deben realizarse en unidades monetarias comparables actualizadas al año de origen.

4.6.3 ACTUALIZACIÓN DE COSTES

El análisis comparativo se realizará actualizando los costes de las operaciones de conservación al año de construcción. La tasa de actualización recomendada es del 4%. En consecuencia, el coste de una operación realizada en el año t , se obtendrá mediante la expresión:

$$\text{actualizado} = C \times (1 + r)^t \quad [4.1]$$

4.7 EVACUACIÓN DEL AGUA SUPERFICIAL

En esta Instrucción se considera que los firmes se proyectan con los sistemas de drenaje adecuados de manera que los materiales no estén saturados durante largos períodos de tiempo. El sistema de evacuación del agua superficial comprenderá la recogida de aguas procedentes de la plataforma y sus márgenes, la evacuación de las aguas recogidas a través de sumideros, arquetas y colectores longitudinales, y la restitución de la continuidad de los cauces naturales interceptados por la carretera.

Los elementos del desagüe se elegirán teniendo en cuenta las soluciones técnicamente disponibles, la facilidad de su obtención, sus precios, las posibilidades y coste de su construcción y conservación, y los costes de reparación de los daños que su presencia pueda producir como consecuencia de un funcionamiento inadecuado.

Para ello se deben evacuar rápidamente las aguas pluviales de la superficie del pavimento. Para el proyecto de los sistemas de evacuación de aguas se aplicará la "Norma 5.2. IC. Drenaje superficial" del Ministerio de Fomento [Ref.11].

Durante la construcción de las obras se debe prestar especial atención a la disposición y ejecución de los desagües y drenajes, de forma que no se formen acumulaciones de agua en la superficie de la capa o de la tongada de asiento en ejecución y el nivel freático se mantenga al menos a 50 cm por debajo de ésta; asimismo, se tomarán las medidas para evitar la contaminación de los cauces naturales.

4.8 DRENAJE PROFUNDO

El objetivo del drenaje profundo es controlar la posición del nivel freático respecto del plano de la explanada (ver apartado 4.3.2).

En el caso de que haya una capa freática de una extensión considerable, como ocurre en algunos terrenos llanos e inundables, la mejor solución es la elevación de la rasante de manera que se respete la distancia mínima entre el más alto nivel previsible de dicha capa y el plano de la explanada (tabla 4.4), pues en estos casos, las soluciones que se describen a continuación para zonas más localizadas suelen presentar la dificultad de no disponer de un punto suficientemente bajo para desaguar a él.

En zonas llanas de extensión más reducida y que dispongan de un desagüe independiente a una distancia corta se puede rebajar el nivel freático bajo la carretera por medio de zanjas drenantes longitudinales, paralelas a la carretera y de suficiente profundidad. Estas zanjas drenantes deben tener un dren en su parte inferior, estar rellenas de un material filtrante en correspondencia con el caudal a desaguar de la capa freática, e ir selladas en su parte superior para evitar la contaminación de dicho material por la infiltración de la escorrentía (ver figura 6).

En las carreteras con calzadas de más de tres carriles o con calzadas separadas, a fin de controlar el rebajamiento del nivel freático junto a la mediana, se dispondrá bajo ésta una zanja drenante adicional (ver figura 7).

En las laderas en las que haya un nivel freático que quede interceptado por las explanaciones de una carretera de manera que su distancia al plano de la explanada sea inferior a la mínima exigida, es conveniente disponer una sola zanja drenante para interceptar la capa freática (ver figura 8).

Figura 6. Drenes longitudinales en secciones en desmonte para rebajar el nivel freático

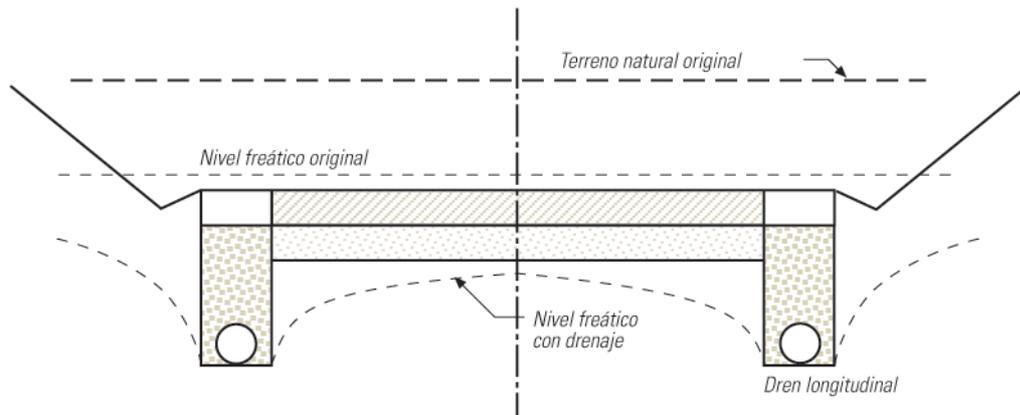


Figura 7. Drenes longitudinales para rebajar el nivel freático en carreteras de calzada doble

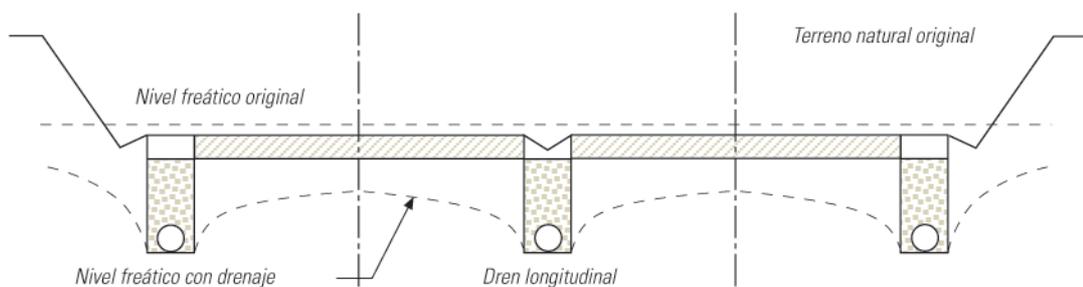
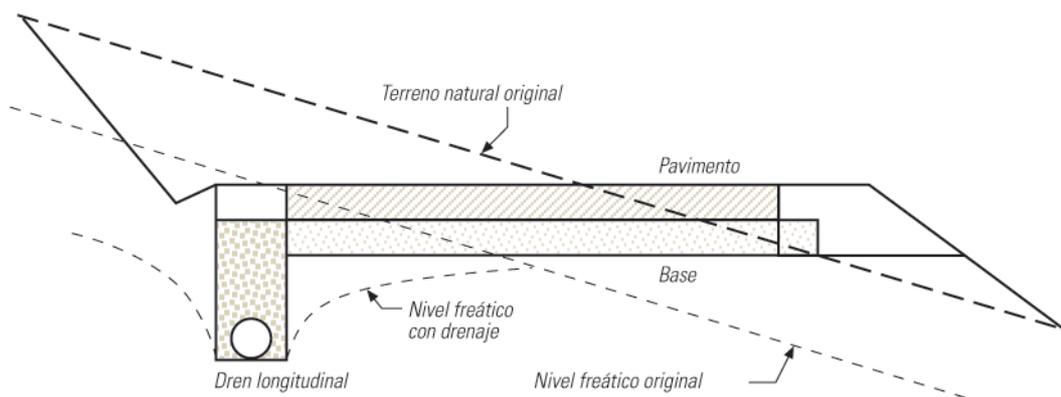


Figura 8. Dren longitudinal en secciones a media ladera para rebajar el nivel freático

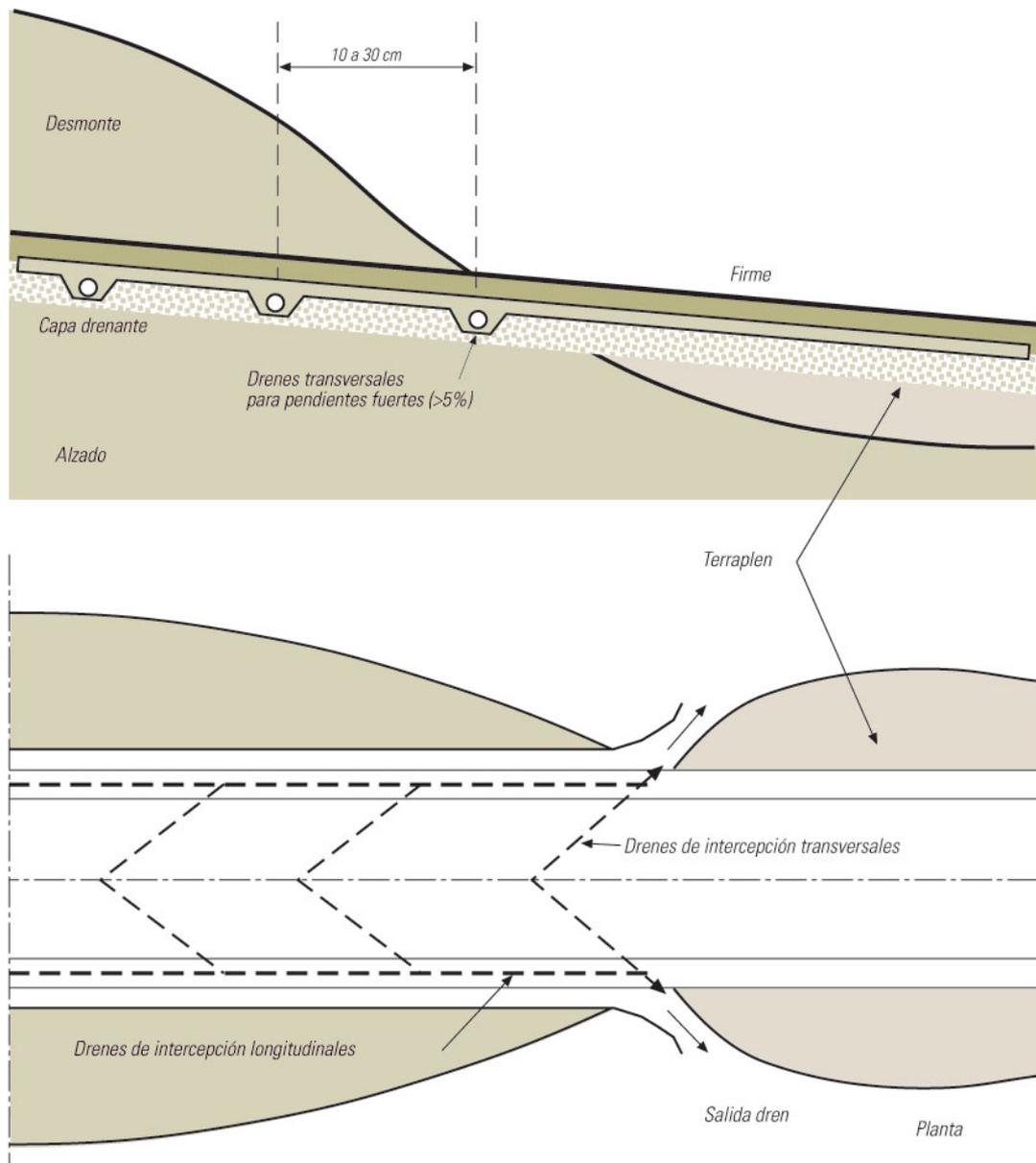


En todo caso, el dren de la zanja drenante debe tener un diámetro y una pendiente suficientes, y estar provisto de unas arquetas de registro que permitan comprobar su funcionamiento, situadas a intervalos no superiores a 50 m.

El proyecto debe contemplar y definir la ubicación y diseño de conducciones accesorias (postes SOS, telecomunicaciones, etc) con objeto de impedir que actúen como drenes o colectores de agua.

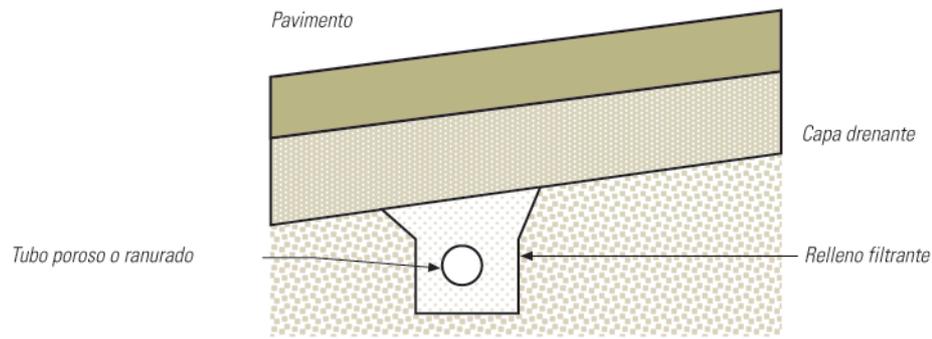
En las zonas de paso de un desmonte a un relleno, en las cercanías de los puntos bajos de la rasante, y en las carreteras de pendiente superior al 5 %, se recomienda disponer bajo el plano de explanada unas zanjas drenantes transversales de poca profundidad, generalmente a 45° del eje de la carretera y a intervalos de 15 a 30 m, más juntas cuanto mayor sea la pendiente de la rasante: las cuáles pueden desaguar a las zanjas drenantes longitudinales (si las hay) por medio de una arqueta, o tener un desagüe independiente al talud del relleno (ver figura 9).

Figura 9. Disposición de drenes de intercepción longitudinales y transversales



Tanto las zanjas drenantes longitudinales como, sobre todo, las transversales pueden recoger el desagüe de las capas drenantes situadas bajo el firme (ver figura 10), si están dispuestas para ello.

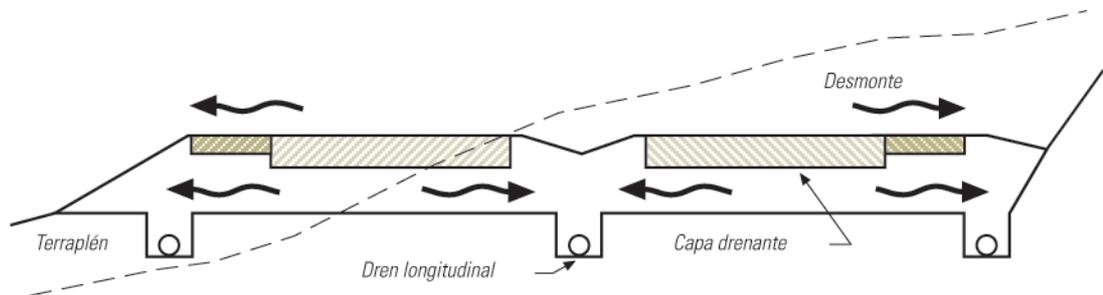
Figura 10. Sección transversal de capa drenante por eje de dren transversal



4.9 DRENAJE DE LAS CAPAS DEL FIRME

El agua que penetra a través de la superficie del firme procede de las precipitaciones de la zona. Esta agua se infiltra a través de las fisuras, juntas o huecos de la capa de rodadura (en especial en capas drenantes) y se mueve por el interior de la estructura del firme por efecto de la gravedad. Para evacuar el caudal de infiltración podrán utilizarse capas drenantes que conduzcan el agua hacia zanjas drenantes dotadas de una tubería porosa o ranurada que capte el caudal y lo conduzca hacia los desagües o los tubos colectores encargados de evacuar el agua hacia el exterior del firme (ver figura 11).

Figura 11. Disposición de capas y zanjas drenantes



4.9.1 CAPAS DRENANTES

En los casos en que sean necesarias (siempre con tráfico T2 o superiores y en zonas húmedas), las capas drenantes deberán proyectarse para evacuar la parte del agua infiltrada a través de la superficie del firme. En las zonas más críticas se analizará la trayectoria del agua a través de la capa drenante; disponiendo zanjas transversales de intercepción en función de las pendientes de la explanada y para limitar el recorrido máximo del agua y el tiempo de saturación.

Cuando sea previsible la contaminación de la capa drenante con finos procedentes del cemento se intercalará entre ambas una capa anticontaminante de tipo geotextil.

Las capas drenantes desaguarán a zanjas drenantes longitudinales (ver figura 12) o drenes alveolares, nunca directamente a los bordes del pavimento: taludes de terraplén o cunetas de zonas en trincheras (ver figura 13).

Figura 12. **Desagüe de capa drenante a dren longitudinal**

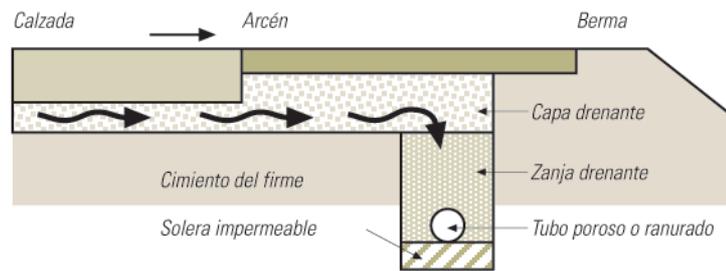
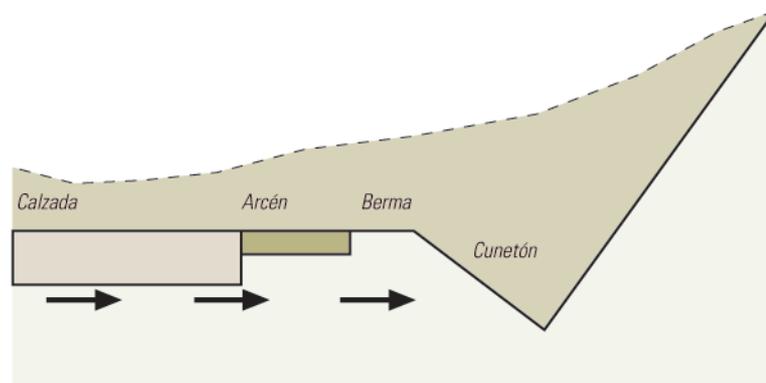


Figura 13. **Ejemplo de solución incorrecta de desagüe de capa drenante**



Las capas drenantes podrán estar formadas por materiales granulares, mezclas bituminosas, suelos estabilizados con cemento u hormigones porosos, siempre que cumplan las especificaciones complementarias necesarias para este cometido. El espesor de la capa drenante no debe ser inferior a 15 cm. Si está tratada con ligantes hidrocarbonatados, se puede bajar a 8 cm. Si la capa drenante sólo se dispone bajo la calzada, conviene que rebase a la inmediatamente superior entre 30 y 100 cm, conectando con el sistema de desagüe. La capa drenante conservará la misma pendiente transversal que la del pavimento.

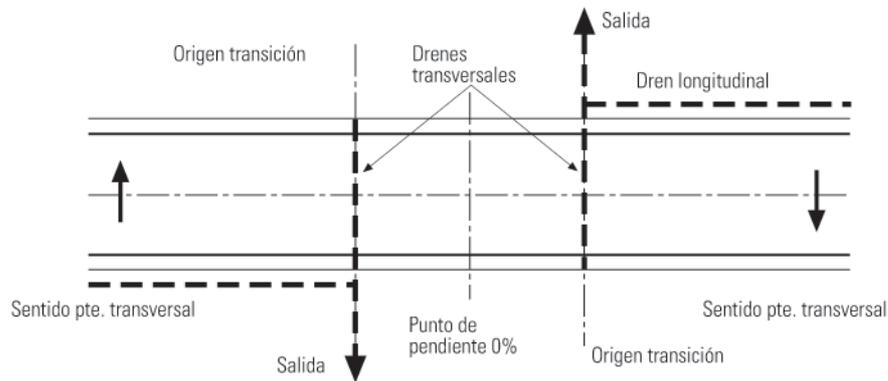
Las capas granulares drenantes no tratadas deben ir sobre una capa no drenante, que evite su contaminación desde las capas superiores de asiento del firme superior si esta no fuera estabilizada y su índice de plasticidad fuera superior a 10. Otra solución será el empleo de capas anticontaminantes o geotextiles. Las capas tratadas pueden ir directamente sobre un riego de imprimación de dotación elevada (1,5 Kg/m² de ligante residual).

4.9.2 ZANJAS DRENANTES

Se pueden utilizar dos tipos fundamentales de zanjas drenantes que son:

- **Zanjas drenantes longitudinales:** conviene ubicarlas en los laterales del firme, al borde de la capa drenante y bajo los arcenes.
- **Zanjas drenantes transversales:** se dispondrán siempre en puntos determinados, tales como transiciones de peralte (ver figura 14), puntos bajos del trazado, transiciones de desmonte a terraplén y viceversa, o carreteras de fuerte pendiente (> 5%). En general, se situarán a una distancia comprendida entre 0,7 y 2 veces la anchura de la calzada.

Figura 14. Disposición de drenes en zonas de transición de peralte



La anchura de la zanja será, como mínimo, el diámetro exterior de la tubería drenante más un resguardo a cada lado. En el caso de emplearse zanjadoras automáticas esta anchura debe aumentarse hasta hacerse compatible con el uso de la maquinaria. La profundidad será la mínima requerida para la correcta puesta en obra de todos los materiales.

Se utilizarán filtros anticontaminantes en las capas drenantes para protegerlas de colmatación y contaminación por finos procedentes de otras capas del firme o del cimientó, y en las zanjas drenantes para proteger el relleno y la tubería de la colmatación y contaminación por finos procedentes de las capas del firme que la rodean.

Las distancias máximas entre las arquetas de desagüe serán las mostradas en la tabla 4.6. Las arquetas de conexión de drenaje se dispondrán con carácter general a una distancia máxima de 50 m. En todo caso, en los drenes longitudinales se dispondrán arquetas en los cambios bruscos de alineación o de pendientes, en los puntos de unión de varios drenes y de tuberías de desagüe, en los casos de drenes transversales, y en los puntos de unión con drenes longitudinales o con tuberías de desagüe.

Tabla 4.6. Distancia máxima entre arquetas (m)

Tráfico	Tipo de terreno		
	Montañoso	Ondulado	LLano
TO, T1, T2	100	80	60
T3, T4	120	100	80

4.10 DRENAJE EN ENSANCHES Y CAMBIOS DE TRAZADO

Muchos de los problemas de deterioro de firmes originados por el agua, se deben a la inexistencia de un drenaje subterráneo adecuado o al incorrecto funcionamiento del mismo. En los casos en que esto ocurra, es necesario implantar o adecuar el drenaje antes de proceder a las actuaciones de acondicionamiento o mejora del firme.

Por otra parte, obras tales como ensanches de la calzada o acondicionamientos en el trazado afectan al drenaje subterráneo pues cambian las condiciones geométricas de la carretera, con lo que se hace indispensable la adecuación del sistema a la nueva geometría y el análisis de las conexiones con el sistema de drenaje existente.

4.10.1 ENSANCHES DE CALZADA

Cuando exista una capa permeable en el firme existente (por ejemplo, macadam), el ensanche se construirá con capas de base con capacidad portante suficiente y con una permeabilidad adecuada que en ningún caso será menor que la de las capas adyacentes del firme existente. Se compactarán de forma que no haya asientos posteriores que produzcan escalonamientos en el firme debido a la discontinuidad que representan.

El sistema se complementará con zanjas drenantes longitudinales y transversales, tuberías colectoras y de desagüe y todos los elementos que sean necesarios para asegurar el correcto funcionamiento del drenaje subterráneo.

4.10.2 CAMBIOS DE TRAZADO

En todos los casos en los que se produzcan cambios en el trazado, tales como rectificaciones en curvas, construcción de variantes, etc., se estudiarán detenidamente las características del terreno por el que va a discurrir el nuevo trazado y se proyectará el sistema de drenaje subterráneo teniendo en cuenta todo lo indicado en esta Instrucción.

Se tendrá un cuidado especial al conectar este nuevo sistema con el existente, para que no se produzcan obstrucciones, roturas o daños.

Se realizarán las pruebas de funcionamiento del sistema de drenaje de la carretera existente, en el tramo que no se va a modificar, para asegurar que puede conducir el caudal que le llegue desde aguas arriba procedente del nuevo sistema. En caso de no ser así, se modificarán los elementos del sistema de drenaje existente para poder evacuar todo el agua que le llegue de aguas arriba.

DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES

El dimensionamiento de firmes se realizará mediante modelos matemáticos de análisis a partir de los cuales se obtendrán los parámetros críticos de dimensionamiento (tensiones, deformaciones o deflexiones) debidos a las solicitaciones impuestas.

Posteriormente, estos parámetros se contrastarán con los criterios de fallo para determinar la capacidad de soporte del cimiento o la vida teórica de servicio del firme.

5.1 FASES DE DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento del firme consta de dos fases. En la primera, se dimensiona el cimiento, y en la segunda, la propia estructura del firme, distinguiendo entre firmes con pavimento bituminoso y firmes con pavimento de hormigón.

Fase 1: Dimensionamiento del firme

En esta primera fase, se definen las capas de asiento que deben disponerse sobre el terraplén o el terreno natural subyacente para que, cumpliendo con los criterios de proyecto, se consiga la capacidad de soporte mínima definida en función del tráfico de proyecto.

Para el dimensionamiento del cimiento del firme se utilizará el *modelo elástico multicapa* definido en el apartado 5.2.1.

Fase 2: Dimensionamiento de la estructura del firme

En esta segunda fase, se definen los materiales y espesores de las distintas capas del firme, colocadas sobre un cimiento considerado como tipo, de manera que la vida teórica de servicio coincida o supere al tráfico de proyecto calculado o estimado. La *vida teórica de servicio* vendrá dada por el número máximo de repeticiones de la carga tipo, N , que soporta el modelo del firme.

El modelo para el dimensionamiento de la estructura del firme se elegirá en función del material utilizado en su pavimento. Se distinguen dos tipos de estructuras de firme:

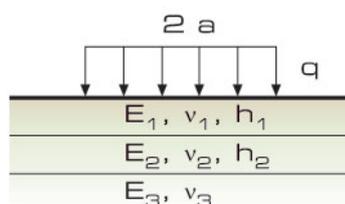
a. Firmes con pavimentos bituminosos: cuyo pavimento está compuesto por mezclas bituminosas apoyadas sobre capas granulares, sobre capas tratadas con ligantes bituminosos o sobre capas tratadas con cemento, o directamente sobre el cimiento del firme. Se incluyen dentro de este tipo los firmes para tráficos de baja intensidad (T4) con estructuras formadas por tratamientos superficiales sobre bases de materiales granulares, de suelocemento o de gravaemulsión. Este tipo de estructuras se calcularán utilizando el *modelo elástico multicapa* definido en el apartado 5.2.1.

b. Firmes con pavimento de hormigón: cuyo pavimento está formado por hormigón vibrado. Para su dimensionamiento se utilizará el *modelo de Westergaard* definido en el apartado 5.2.2.

5.2 MODELOS DE CÁLCULO

5.2.1 MODELO ELÁSTICO MULTICAPA

Para el cálculo, tanto del cimiento como de la estructura de firmes con pavimento bituminoso, se utilizará este modelo matemático que permite obtener la respuesta en tensiones y deformaciones en las capas del firme o de su cimiento, sometidas a las solicitaciones fijadas.



El modelo de respuesta elástico multicapa de Burmister se basa en las siguientes hipótesis:

- 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.
- Cada capa y el macizo semiinfinito son un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo. Se caracterizan mecánicamente por su módulo de Young, (E), y su coeficiente de Poisson (ν).
- Existe un apoyo continuo entre capas con adherencia total, parcial o nula.
- Las fuerzas de inercia y los efectos térmicos son despreciables. Las solicitaciones térmicas no se tienen en cuenta por sí mismas sino únicamente al fijar el módulo de elasticidad de los materiales tratados con ligantes bituminosos.
- Las deformaciones del sistema son suficientemente pequeñas como para no alterar las hipótesis anteriores.
- Los esfuerzos cortantes son despreciables en el contacto rueda-pavimento.
- No se considera el peso propio del firme.

5.2.1.1 Caracterización de materiales

Para todos los materiales constituyentes del firme y del cimiento se supondrá un comportamiento elástico lineal. Por tanto, para definir la relación tensión-deformación del material, sólo serán necesarios dos parámetros:

Módulo de Young, (E)
Coeficiente de Poisson, (ν).

En la fase de proyecto para los materiales de las capas de firme se adoptarán los valores de los parámetros que se definen en esta Instrucción y para los materiales de cimiento se estimarán a partir de ensayos previos con los criterios que posteriormente se señalan⁷.

5.2.1.2 Adherencia entre capas

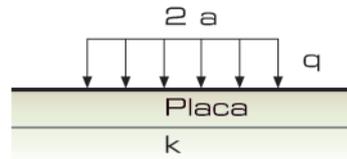
En los cálculos se considerará que las capas están totalmente adheridas o con adherencia parcial. Los resultados con adherencia parcial serán la media de los obtenidos con adherencia total y sin adherencia. La adherencia entre capas se considerará completa salvo entre dos capas tratadas con conglomerantes hidráulicos, que se considerará parcial.

⁷ Los materiales nuevos, no convencionales o los que en general no se contemplan en esta instrucción se solicitará a la Comisión Permanente de Seguimiento de la instrucción, la adscripción de nuevos valores, presentando la oportuna justificación técnica.

5.2.1.3 Cálculo numérico

El cálculo numérico se realizará con el programa de cálculo de firmes **ICAFIR**.

5.2.2 MODELO DE WESTERGAARD



Se utilizará este modelo matemático para el cálculo de estructuras de firmes con pavimento de hormigón vibrado.

Este modelo se basa en las siguientes hipótesis:

El firme se asimila a una capa rígida de espesor constante y caras horizontales paralelas entre sí, apoyadas sobre un macizo semiinfinito homogéneo.

- La placa o capa rígida se comporta de acuerdo a las hipótesis de Navier, es decir, que las secciones normales al plano medio de la capa antes de la aplicación de las cargas, continúan siendo normales al mismo después de haberse deformado.
- El comportamiento del cimiento del firme responde a la hipótesis de Winkler, es decir, que se trata de un líquido denso o que está compuesto por un conjunto de resortes, con lo que en cada punto de la superficie del mismo, la presión aplicada y la deformación que se origina son directamente proporcionales sin que además se produzcan esfuerzos tangenciales entre los distintos resortes. La constante de proporcionalidad, K , se denomina *coeficiente de balasto*.

5.2.2.1 Caracterización de materiales

Para caracterizar los materiales que aparecen en el modelo, se debe distinguir entre:

- Material constituyente del cimiento del firme: se caracteriza por su coeficiente de balasto, K
- Materiales constituyentes de las capas del firme: se caracterizan por su resistencia a flexotracción a largo plazo, R_{FLP}

5.2.2.2 Cálculo numérico

El cálculo numérico se realizará con la ayuda de unos gráficos preparados al efecto, basados tanto en el modelo teórico presentado, como en diversos estudios de comportamiento de firmes a escala real [Ref. 14].

5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL CIMIENTO DEL FIRME

El dimensionamiento del cimiento del firme persigue un doble objetivo. Por un lado, definir una disposición de capas de asiento, formadas por suelos, estabilizaciones o zahorras, que permitan obtener como mínimo la capacidad de soporte especificada para cada categoría de tráfico de proyecto (ver tabla 4.1). Por otro lado, una vez alcanzada la capacidad de soporte, definir sus parámetros característicos para su posterior introducción en el modelo utilizado para el cálculo de la estructura del firme. Estos parámetros son:

- *Para firmes con pavimento bituminoso*: el cimiento se considera en el modelo como un macizo elástico semiinfinito, por tanto, sus parámetros característicos serán su módulo de Young equivalente, E_e , y su coeficiente de Poisson equivalente, ν_e .
- *Para firmes con pavimento de hormigón*: el cimiento se considera en el modelo como un líquido denso, por tanto, su parámetro característico será su coeficiente de balasto, K_e , equivalente.

5.3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZABLES EN EL CIMIENTO DEL FIRME

La relación de materiales utilizables en las capas de asiento del cimiento del firme aparece reflejada en la tabla 3.3. En general, se utilizarán materiales granulares, suelos y estabilizaciones de suelos.

a. Suelos y materiales granulares

Se considera que el módulo de Young de las capas granulares y de las capas de suelos depende del módulo de las capas sobre las que se apoyan, aumentando con el de éstas hasta alcanzar su módulo máximo, que es el que corresponde a la capacidad de soporte propia del material. En consecuencia, el módulo de Young de cálculo de cada capa de material granular o de capa de suelo, adoptará un valor que será función del módulo de la capa o tongada subyacente según la expresión:

$$E_i = c \times E_{\text{sub},i-1} \quad [5.1]$$

donde:

- E_i Módulo de la capa o tongada "i"
 $E_{\text{sub},i-1}$ Módulo de la capa o tongada subyacente "i-1"
 c Coeficiente que se tomará de la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valor del coeficiente de proporcionalidad, c, entre módulos de suelos y materiales granulares

Material de la capa o tongada "i"	Coefficiente de proporcionalidad, c
Suelos S0, S1 y S	2
Suelos S3 y S4;	2,5
Zahorra >50% part.fract.	2,5

El módulo de cada capa estará acotado superiormente por la capacidad de soporte propia de su material constituyente según la tabla 5.2. El CBR se determinará en las condiciones señaladas en el apartado 3.2.3.

Tabla 5.2 Valor máximos de los módulos de Young para materiales granulares

Material granular	Modulo máximo (MPa) (el mínimo de los valores señalados)
Suelo tipo S0	10×CBR o 50
Suelo tipo S1	10×CBR o 100
Suelo tipo S2	10×CBR o 200
Suelo tipo S3	10×CBR o 300
Suelo tipo S4	10×CBR o 400
Zahorra con menos del 50% de partículas fracturadas	10×CBR o 500
Zahorra con más del 50% de partículas fracturadas	600
Macadam	1.000

Para todos ellos se adoptará un valor del coeficiente de Poisson de 0,35.

b. Suelos estabilizados

Los suelos estabilizados, con cal o cemento, tendrán unas características mecánicas fijas que no dependerán de las del material subyacente como en el caso de los materiales granulares. Estas características vienen definidas por los parámetros que aparecen en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Características mecánicas de suelos estabilizados

Materiales	E (MPa)	ν
Suelo estabilizado con cemento o cal, tipo SC-1	100	0,35
Suelo estabilizado con cemento o cal, tipo SC-2	200	0,35
Suelo estabilizado con cemento, tipo SC-3	1.000	0,25

5.3.2 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DEL CIMIENTO

Para hallar la capacidad de soporte del cimiento, definida mediante su *Módulo de Young Equivalente* E_e , se utilizará el cálculo analítico con el modelo elástico multicapa definido anteriormente.

El proceso a seguir será el siguiente:

1. Caracterización del terreno natural subyacente,
2. Definición y caracterización de las capas de asiento,
3. Cálculo del Módulo de Young equivalente del cimiento,
4. Análisis del resultado,
5. Definición de la sección tipo por subtramo homogéneo.

5.3.2.1 Caracterización del terreno natural subyacente

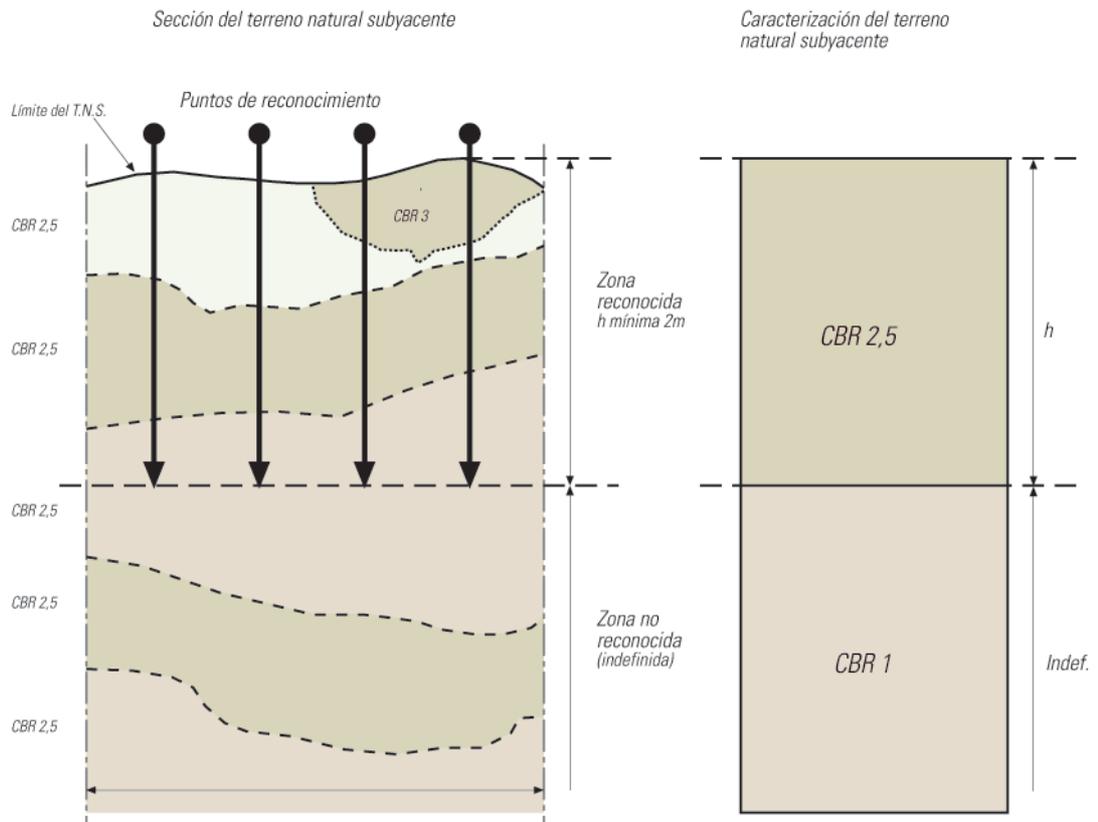
El Terreno Reconocido (ver apartado 3.2.3), a efectos de capacidad portante, se caracterizará en función del peor de los suelos representativos encontrados en cada subtramo homogéneo definido. Es decir, la capacidad de soporte del espesor reconocido vendrá dada por el mínimo CBR de los suelos que lo constituyen o que se consideren predominantes.

Por debajo de éste, el Terreno No Reconocido, se caracterizará como un macizo semiinfinito formado por un único material cuyo CBR será función del CBR definido para el terreno reconocido (ver figura 15), según se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Caracterización del terreno natural subyacente en suelos

CBR mínimo en la zona reconocida ($\geq 2m$)	CBR del macizo indefinido no reconocido
>5	3
>3 y <5	2
≤ 3	1

Figura 15. Ejemplo de caracterización del terreno natural subyacente, por tramos homogéneos



El módulo de Young, E, del terreno natural subyacente se obtendrá a partir del CBR mediante la relación:

$$E(\text{MPa}) = 10 \times \text{CBR} \quad [5.2]$$

Cuando el terreno natural subyacente esté constituido por un macizo rocoso se le asignará un módulo de Young de valor 10.000 MPa.

En reconstrucciones de firmes, cuando se considere la carretera existente como cimiento para el proyecto de una nueva estructura de firme, se le asignará un módulo de Young equivalente que será función de la deflexión de cálculo según se indica en la tabla 5.5, también se podrán utilizar los valores obtenidos por cálculo inverso de firmes mediante el programa ADAD de la Dirección General de Carreteras. Una vez definidos unos valores característicos de los módulos de los materiales del firme existente puede seguirse el procedimiento general.

Tabla 5.5. Módulos equivalentes en reconstrucción de firmes

Deflexión de cálculo dck	Categoría de cimiento	Módulo equivalente (MPa)
< 120	Alta	160
120 – 200	Media	100
200 – 300	Baja	60
> 300	Fuera de categoría	Requiere estudio especial

Macizos rocosos

Se habrá de prestar especial atención en aquellos casos de terrenos naturales subyacentes constituidos por macizos rocosos; ya que los terraplenes colocados sobre ellos forman estructuras tipo "sandwich" cuyo valor del módulo equivalente tiende a disminuir según se aumenta el espesor de los suelos de aportación, por lo que deberá proyectarse el espesor mínimo necesario para conseguir un apoyo de capacidad de soporte homogénea.

Profundidad de reconocimiento

Según se define en la Instrucción, para el cálculo del cimiento del firme, se caracterizará el terreno natural subyacente con el espesor en que se haya reconocido (con un mínimo de 2 m) y al resto del macizo se le asignarán, por seguridad, unos módulos inferiores a los obtenidos en el terreno reconocido. Por tanto, los incrementos de espesor de reconocimiento sobre los 2 m señalados como mínimos, llevarán a una mejor caracterización del terreno y en la mayoría de los casos a una reducción del espesor de las capas de asiento superiores.

5.3.2.2 Definición de las capas de asiento

Las capas de asiento se dividirán, a efectos de cálculo, en las tongadas de construcción. Las tongadas de los suelos en el cimiento del firme tendrán un espesor mínimo de 15 cm y máximo de 25 cm, según se establezca en el Pliego de Prescripciones Técnicas del Proyecto de Construcción.

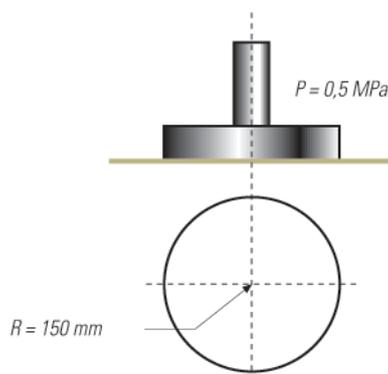
5.3.2.3 Cálculo del Módulo de Young equivalente del cimiento

El módulo de Young equivalente del cimiento, en cada subtramo, se obtendrá aplicando la siguiente expresión:

$$E_e(\text{MPa}) = 13.150 / d_0 (\text{mm}/100) \quad [5.3]$$

Siendo d_0 la deflexión superficial en el eje de la carga. La deflexión se obtendrá del cálculo analítico con el modelo elástico multicapa definido anteriormente aplicando la sollicitación tipo de una placa de carga con presión de 0,5 MPa.

PLACA DE CARGA (Presión=0,5 MPa y Diámetro de la placa= 300 mm)



La expresión 5.3 resulta de considerar el conjunto de suelos del cimiento del firme como un único macizo elástico, semiinfinito e isótropo de módulo E_e y coeficiente Poisson 0,35 tal que aplicándole la misma sollicitación tipo de la placa de carga se obtiene la misma deflexión superficial en el eje de carga.

5.3.2.4 Análisis del resultado

El cimiento del firme se considerará adecuado en cada subtramo únicamente cuando, cumpliendo los criterios de proyecto definidos, se logre superar la capacidad de soporte mínima, exigida en forma de módulo de Young equivalente, para cada categoría de tráfico de proyecto. En otro caso, se debe modificar la estructura de las capas de asiento, espesores o materiales, hasta que dicho objetivo se logre.

5.3.2.5 Secciones tipo por subtramo homogéneo

Una vez definida la sección tipo, de espesores mínimos según el cálculo analítico, deberán mantenerse constantes los espesores de las capas de asiento en todo el subtramo homogéneo.

Si para alcanzar la cota del plano de explanada se precisara la aportación de suelos entre las capas de asiento definidas y el terreno natural subyacente, estos podrán no tenerse en cuenta a efectos de cálculo siempre que sus características sean iguales o superiores a las del terreno natural subyacente. En cualquier caso, los suelos de aportación al núcleo del terraplén deberán cumplir las prescripciones complementarias de la tabla 3.3.

5.3.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL CIMIENTO

Se deben definir los parámetros característicos mecánicos del cimiento en función del modelo utilizado para el posterior cálculo de la estructura del firme en cada tramo de proyecto. Por tanto, estos parámetros diferirán según se trate de firmes con pavimentos bituminosos o de hormigón.

- *Firmes con pavimentos bituminosos*, en el cálculo de este tipo de estructuras de firme se utiliza el modelo elástico multicapa. El cimiento del firme se caracterizará como un macizo elástico semiinfinito de Boussinesq. Para el coeficiente de Poisson se adoptará el valor de 0,35. Como valor del módulo de Young se tomará el valor definido para cada categoría de tráfico según se determina en el apartado 5.3.2.4.
- *Firmes con pavimentos de hormigón*, en el cálculo de este tipo de estructuras de firme, se utilizará el modelo de Westergaard. El cimiento del firme se caracterizará como un líquido denso semiinfinito de Winkler. Como valor del coeficiente de balasto se tomará el mínimo exigido para la categoría de cimiento (ver tabla 5.17), calculada según el apartado 5.3.2.

5.4 DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES CON PAVIMENTOS BITUMINOSOS

El objeto del cálculo de la estructura de firmes con pavimentos bituminosos es la definición, en espesor y materiales, de las distintas capas que la componen de manera que se cumplan los dos objetivos siguientes:

- El cimiento del firme debe soportar las cargas debidas al tráfico transmitidas por el firme, sin experimentar excesivas deformaciones verticales.
- Los materiales bituminosos y/o los materiales tratados con cemento de las capas del firme no deben soportar tensiones o deformaciones de tracción excesivas por causa del tráfico, para el período de proyecto considerado. Se supone que a lo largo del servicio pueden ser necesarias renovaciones superficiales, pero éstas no se tendrán en cuenta en el cálculo.

Para la realización del dimensionamiento se debe partir de los siguientes datos:

- Tráfico de proyecto: número de ejes equivalentes estimados para el carril de proyecto durante el período de proyecto considerado, definiendo la correspondiente categoría de tráfico de proyecto.

- Zona climática: clasificación climática del tramo considerado, que afectará principalmente a la caracterización de los materiales bituminosos.
- Características mecánicas del cimient: Módulo de Young equivalente, E_e y coeficiente Poisson equivalente, ν_e , del cimiento considerado.

5.4.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZABLES EN LA ESTRUCTURA DE FIRMES CON PAVIMENTOS BITUMINOSOS

a. Materiales granulares

Podrán utilizarse zahorra para todo tipo de tráfico y macadam únicamente para tráficos de categoría T4. La caracterización tanto de la zahorra como del macadam aparece definida dentro de los materiales utilizables en el cimiento del firme (ver tabla 3.3).

b. Materiales tratados con conglomerantes hidráulicos

Para las capas con materiales tratados con conglomerantes hidráulicos se adoptarán las características mecánicas según establece la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Características mecánicas de materiales tratados con cemento

Materiales	E (MPa)	ν
Suelocemento, tipo SC-3	1.000	0,25
Suelocemento, tipo SC-4	8.000	0,25
Gravacemento	20.000	0,25
Hormigón magro	25.000	0,20
Hormigón compactado y hormigón vibrado en capa de base	30.000	0,20

c. Materiales bituminosos

Las capas bituminosas presentan comportamientos mecánicos que, dada su naturaleza viscoelástica, dependen básicamente de la temperatura y del tiempo de aplicación de las cargas. Para caracterizar los materiales bituminosos, se tendrá en cuenta la zona climática donde se encuentren.

1. Zonas climáticas ZT1, ZT2 y ZT3

Se realizará el cálculo diferenciando el módulo de las distintas capas, considerando los valores dados en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Características mecánicas de mezclas bituminosas (Para una temperatura equivalente de 20 °C)

Tipo de mezcla	E (MPa)	ν
Densas y semidensas	6.000	0,33
Gruesas	5.000	0,33
Drenantes y abiertas	4.000	0,35
Discontinua en capa fina	4.000	0,35
De alto módulo	12.000	0,30
Abiertas en frío	1.500	0,35
Grava-emulsión tráficos T3 y superiores	4.000	0,35
Grava-emulsión tráficos T4	2.500	0,35

2. Zona climática ZT4

Se realizará el cálculo considerando las variaciones de las características de los materiales propuestas en la tabla 5.8, respecto a los señalados anteriormente cada una de las capas con mezclas bituminosas.

Tabla 5.8 Características mecánicas medias de mezclas bituminosas en caliente

Época climática	Coefficiente aplicado a E	ν
Valor medio anual	1	0,33
Primavera-otoño	1	0,33
Verano	0,5	0,35
Invierno	1,5	0,30

La dependencia de la temperatura se introducirá en los cálculos por medio de las características mecánicas, es decir, variando éstas en función de la temperatura y aplicando la ley de Miner.

Según esta ley la capas de mezcla bituminosa van acumulando fatiga a lo largo de la vida de las mismas por aplicación de las cargas; por tanto, si en una situación con un módulo E_i , es capaz de soportar N_i aplicaciones de carga antes de agotarse, la fracción de fatiga producida por n_i aplicaciones de carga con el módulo E_i será :

$$f_i = n_i / N_i \quad [5.4]$$

El final de la vida de servicio se producirá cuando:

$$\sum f_i = 1 \quad [5.5]$$

En el anejo 7 "Ejemplos de dimensionamiento de firmes con pavimento bituminoso", se presentan varios ejemplos aclaratorios.

3. Carriles lentos

En carriles adicionales para vehículos lentos, o tramos con pendiente mayor o igual al 5% en longitudes iguales o superiores a 1.000 m, los módulos de Young señalados anteriormente para las mezclas bituminosas se disminuirán en un 20%, dado el efecto de aplicación de las cargas.

5.4.2 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS Y CRITERIOS DE FALLO

5.4.2.1 Parámetros críticos

Cimiento del firme: el parámetro crítico es la deformación vertical en la cara superior del mismo.

Firme: los parámetros críticos de la estructura de capas del firme son los expresados en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Parámetros críticos para el análisis de los resultados

Capa (*)	Parámetros
Bituminosa	Máxima deformación horizontal en su fibra inferior, ϵ_f
Tratada con conglomerantes hidráulicos	Máxima tensión horizontal de tracción en su fibra inferior, σ_f

(*) En las capas granulares no se considera criterio de fallo

5.4.2.2 Criterios de fallo

Cimiento del firme: se alcanza el fallo del cimiento del firme cuando el deterioro producido en el mismo, medido por la deformación vertical unitaria, supera los valores de las tablas 5.10 y 5.11.

Tabla 5.10. Deformación vertical unitaria máxima admisible en cimiento del firme (μd)

Categoría de tráfico	T0	T1	T2A	T2B	T3A	T3B
Deformación vertical máxima (μd)	230	275	350	425	500	600

En el caso de tráficos de baja intensidad⁸ (T4), la deformación vertical unitaria máxima se tramificará en función de las categorías de la tabla 5.11.

Tabla 5.11. Deformación vertical unitaria máxima admisible en el cimiento del firme E (μd) para tráficos T4

Tráfico	TE ($\times 10^6$)	Deformación vertical máxima (μd)
T4B	<0,03	1200
	0,06-0,03	1010
	0,09-0,06	910
	0,12-0,09	850
T4A	0,12-0,15	800
	0,15-0,18	760
	0,18-0,21	730
	0,21-0,25	700

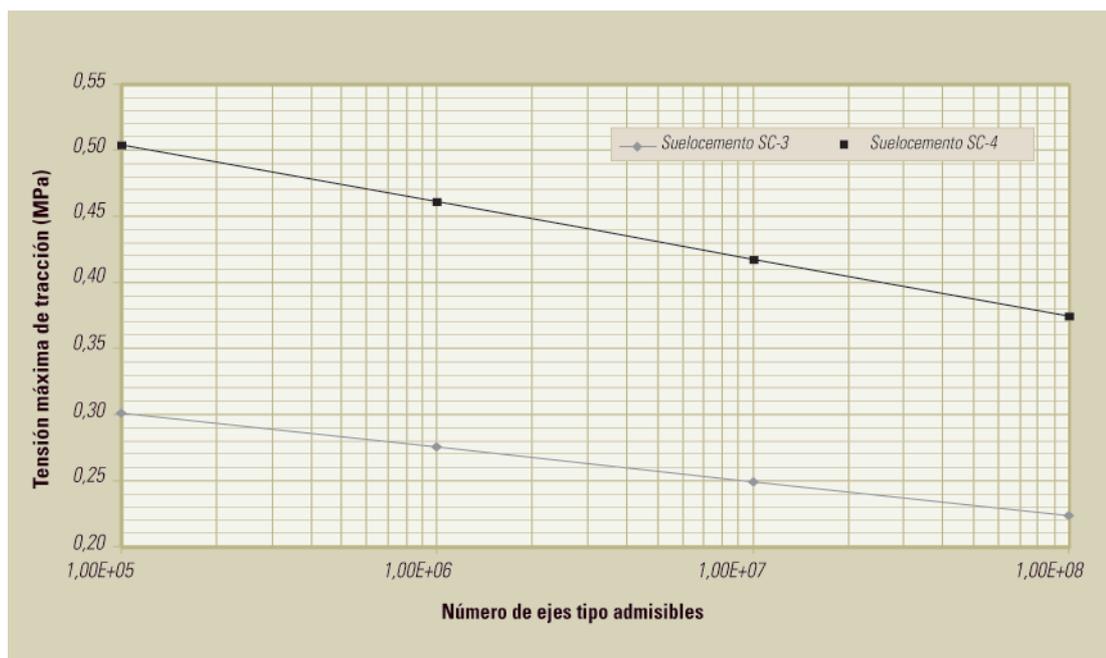
Firme: se alcanza el fallo del firme cuando se agota el mismo por fatiga de los materiales tras un número N de aplicaciones de la sollicitud tipo.

Para la determinación del número máximo de aplicaciones (N) de la sollicitación tipo, se considera el parámetro crítico de cada uno de los materiales constituyentes del firme, obteniendo para cada parámetro crítico (tensión o deformación) el valor de cálculo del mismo en la estructura de capas del firme diseñada, según el modelo de respuesta establecido en la presente Instrucción. Una vez obtenido el valor de cálculo del parámetro crítico de cada material según la estructura del firme diseñada, se obtiene el número máximo (N_m) de aplicaciones de la sollicitación tipo según las leyes de fatiga establecidas en los apartados siguientes según el tipo de material.

a. Leyes de fatiga para materiales tratados con conglomerantes hidráulicos

La causa más frecuente de fallo en las capas con estos materiales, es la existencia de tracciones elevadas en su fibra inferior. Para la estimación del número de ejes tipo admisibles por estos materiales se utilizarán la leyes de fatiga definidas en la tabla 5.12.

Figura 16. Leyes de fatiga de suelocemento



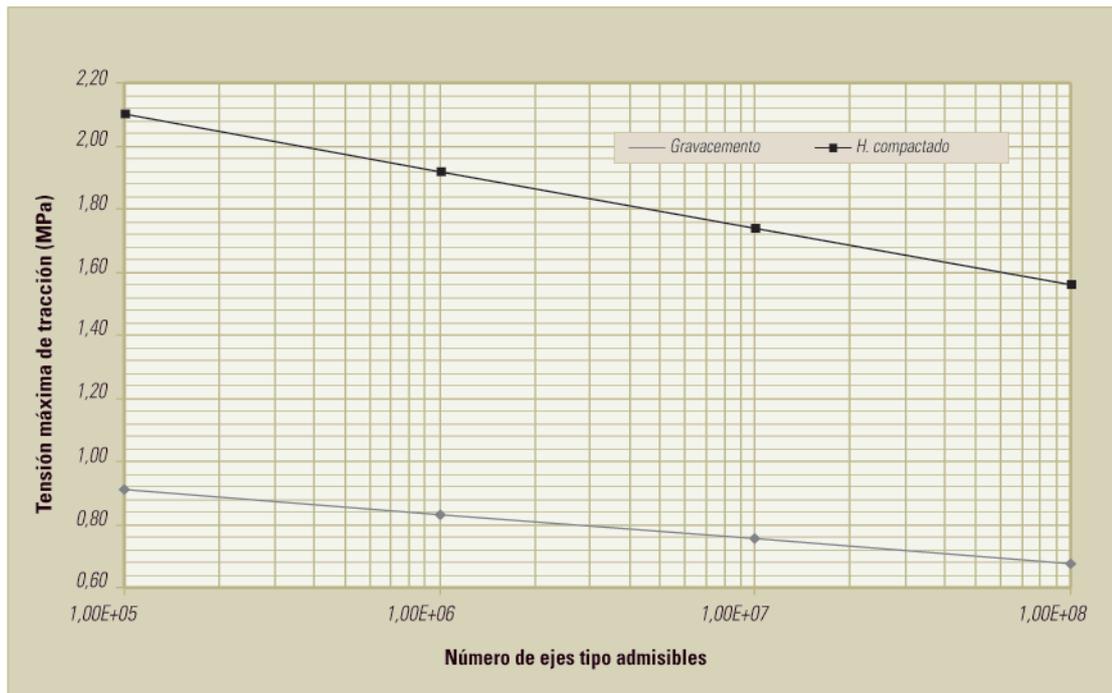
⁸ En firmes para tráficos de baja intensidad (T4), con pavimentos de mezcla bituminosa inferiores o iguales a 5 cm y capas inferiores granulares o de mezclas en frío únicamente se comprueba el criterio del cimiento, y por tanto, no se obtiene en el cálculo un número de ejes equivalentes soportados por la sección.

Tabla 5.12. Leyes de fatiga para capas tratadas con conglomerantes hidráulicos⁹

Material	Ley de fatiga
Suelocemento SC-3	σ_r (Mpa)=0,43 x (1-0,06 x Log N)
Suelocemento tipo SC-4	σ_r (Mpa)=0,72 x (1-0,06 x Log N)
Gravacemento	σ_r (Mpa)=1,3 x (1-0,06 x Log N)
Hormigón compactado y hormigón vibrado en capa de base	σ_r (Mpa)=3 x (1-0,06 x Log N)

Siendo σ_r la tensión horizontal máxima de tracción en la fibra inferior de la capa considerada y N el número máximo admisible de aplicaciones de carga.

Figura 17. Leyes de fatiga de gravacemento y hormigón compactado



b. Leyes de fatiga para capas bituminosas

La causa más frecuente de fallo de estas capas es la existencia de deformaciones elevadas en su fibra inferior. Se utilizará la siguiente ley de fatiga (Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX), que relaciona las deformaciones unitarias de tracción, ϵ_r , con el número, N , admisible de aplicaciones de carga tipo:

$$\text{Log } \epsilon_r = -2,19093 - 0,27243 \times \text{log } N \quad [5.6]$$

siendo:

ϵ_r Deformación unitaria máxima horizontal en el fondo de la capa bituminosa.

N Número máximo de aplicaciones de carga.

Cuando la mezcla colocada en el fondo de las capas bituminosas no sea del tipo grueso o abierto, se aplicarán los factores correctores de mayoración, mostrados en la tabla 5.13, sobre las vidas teóricas de servicio obtenidas.

⁹Debido a la enorme sensibilidad de los firmes semirrígidos frente a las variaciones de espesor de las capas que los constituyen, se han introducido en las leyes de fatiga de las capas tratadas con conglomerantes hidráulicos unos coeficientes de seguridad, consistentes en adoptar para cada material el 90% del valor de su resistencia a flexotracción a largo plazo.

Tabla 5.13. Coeficientes de mayoración k_1

Tipo de mezcla	K_1
Gruesa o abierta	1
Semidensa o densa	1,3
Con betún modificado en una dotación superior al 5%	1,5
De alto módulo	1,1

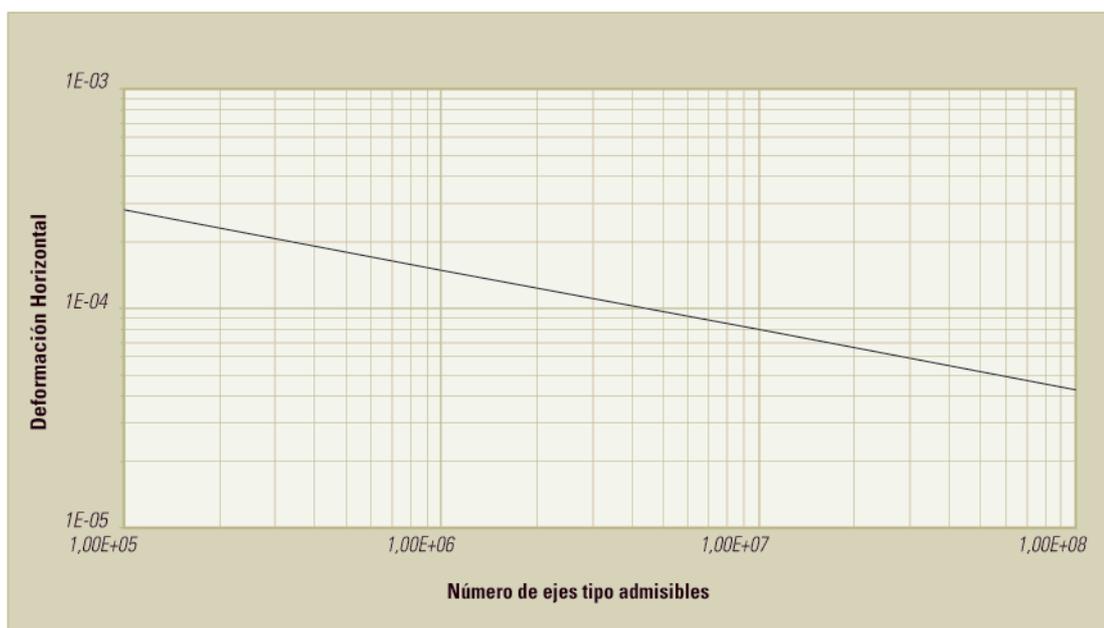


Figura 18. Leyes de fatiga de mezclas bituminosas

Si en el fondo de las capas bituminosas se proyecta un material en frío, el criterio del fallo se aplicará a la capa superior con mezcla bituminosa en caliente superior. Si todas las capas bituminosas son con mezclas en frío, no se aplicará el criterio de fallo de las mezclas bituminosas, dimensionándose el firme de acuerdo con los criterios de fallo del cemento del firme.

5.4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL FIRME

El cálculo se realizará utilizando el modelo elástico multicapa previamente definido. El proceso de cálculo seguirá los siguientes pasos:

- Caracterización del cemento del firme
- Definición de las capas del firme
- Cálculo de los valores de los parámetros críticos
- Análisis de resultados

5.4.3.1 Caracterización del cemento del firme

El cemento del firme se considerará como un macizo sólido elástico semiindefinido, con los parámetros característicos definidos anteriormente en el apartado 5.3.3, sobre el que se apoyan las capas del firme.

5.4.3.2 Definición de las capas del firme

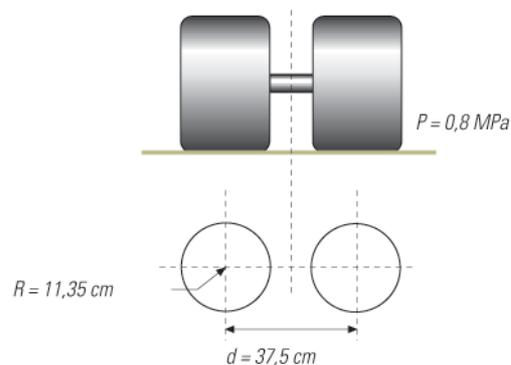
Se deben definir el espesor y el material constituyente de cada capa. En la definición de los espesores se atenderá a lo dispuesto en el capítulo 4 "Criterios de proyecto" y en la definición de los materiales a lo dispuesto en el capítulo 8 "Materiales para capas de firme".

Asimismo, deben definirse las condiciones de adherencia entre capas atendiendo a los criterios establecidos en el apartado 5.2.1.2.

5.4.3.3 Cálculo de los valores de los parámetros críticos

Los valores de los parámetros críticos se obtendrán del cálculo analítico basado en el modelo elástico multicapa aplicando la sollicitación siguiente:

RUEDA GEMELA DOBLE (presión=0,8 MPa; radio de huella de rueda=11,35 cm; distancia entre centros de ruedas gemelas=37,5 cm)



Se determinarán en cada caso los valores de cálculo de los parámetros críticos en aquellos puntos donde adquieran sus valores máximos, es decir, se estudiará si las máximas sollicitaciones se producen entre cargas o bajo ruedas, y en sentido del movimiento de los vehículos o en sentido transversal a éste.

Para cada capa y parámetro, se aplicarán los criterios de fallo que mediante la respectiva ley de fatiga (ver apartado 5.4.2.2), se determinará el número N_f máximo admisible de ejes equivalentes .

5.4.3.4 Análisis de resultados

En general, los criterios de análisis de resultados de la sección del firme, desde un punto de vista estructural, serán los siguientes:

- Valor máximo de deformación vertical unitaria del cimiento del firme.
- Número máximo de ejes equivalentes que es capaz de soportar la sección sin fatigarse.

En primer lugar, se comparará la deformación vertical en la cara superior del cimiento del firme con los valores críticos definidos en la tabla 5.9, ó 5.10 en su caso, en función de la categoría de tráfico de proyecto. En caso de no cumplir este criterio la sección no será válida. Se cambiarán espesores o materiales, y se volverá a calcular la nueva sección.

Posteriormente, si cumple el criterio del cimiento, se comparará el mínimo número de ejes equivalentes, N_c , de los N_i obtenidos en el cálculo para cada capa y parámetro crítico de análisis con el número de ejes equivalentes que solicitarán la sección durante el período de proyecto TE . Si N_c es mayor que TE , la sección será estructuralmente válida. En caso contrario, se cambiarán espesores o materiales, y se volverá a calcular la nueva sección. Los espesores de cálculo en la mezcla bituminosa se redondearán al centímetro por exceso, salvo para capas de rodadura que se podrán redondear al medio centímetro.

En general es conveniente representar gráficamente la relación entre el espesor de las capas y el número de ejes equivalentes admisible, de manera que pueda determinarse por interpolación el espesor más adecuado para las condiciones de proyecto.

En el caso de firmes con tráfico de baja intensidad (T4), en aquellas secciones en que se disponga un pavimento de mezcla bituminosa en caliente de espesor superior a 5 cm, o se dispongan capas inferiores tratadas con cemento o formadas por mezclas en caliente, se aplicarán los criterios señalados anteriormente; en caso contrario sólo se comprobará el criterio de fallo del cimiento del firme. En este caso, para un número de ejes dentro de cada categoría de tráfico T4, se pueden utilizar los valores de deformación vertical máxima mostrados en la tabla 5.10.

5.5 DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES CON PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

El objeto del cálculo es definir el espesor tanto del pavimento de hormigón como de las capas inferiores, en caso de que se consideren necesarias, para el tráfico de proyecto estimado de forma que los materiales utilizados cumplan las siguientes condiciones:

- Las losas de hormigón no deben soportar tensiones de tracción excesivas por causa del tráfico, para el período de proyecto considerado.
- Las deflexiones en el borde de losa deben ser suficientemente reducidas como para que no se produzca erosión del cimiento, bombeo de finos o escalonamiento de juntas.

El dimensionamiento, basado en el modelo de placa apoyada en un líquido denso definido en el apartado 5.2.2, se realizará utilizando los gráficos G. Se tendrá en cuenta lo indicado en el capítulo 4 "Criterios de proyecto". El procedimiento no considera los pavimentos de hormigón armado, aunque para su dimensionamiento pueden aplicarse los criterios señalados en el capítulo 4.

Antes de la realización del cálculo se debe partir de los siguientes datos:

- **Tráfico de proyecto:** número de ejes equivalentes estimados para el carril de proyecto durante el período de proyecto considerado. Así mismo, se debe definir la categoría de la carretera o tramo, en función del tráfico de proyecto según el criterio mostrado en la tabla 5.14.

Tabla 5.14. Categoría de la carretera en función del tráfico

Categoría de tráfico	Categoría de la carretera
T0, T1, T2	A
T3, T4	B

- **Capacidad de soporte del cimiento:** coeficiente de balasto, K, del cimiento considerado.
- **Tipo de arcén:** distinguiendo entre arcenes con pavimento de hormigón o de otro tipo.
- **Unión entre losas:** distinguiendo entre juntas con o sin pasadores.

5.5.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZABLES EN LA ESTRUCTURA DEL FIRME

Se usará hormigón vibrado para el pavimento, y magro o gravacemento para la capa de base. En caso de utilizar materiales granulares para base o subbase, a efectos de cálculo éstos se incorporarán en el cimiento del firme.

a. Hormigón vibrado

Se caracterizará por su resistencia a flexotracción a largo plazo. Se estimará dicha resistencia a partir de la de 28 días utilizando los valores mostrados en la tabla 5.15.

Tabla 5.15 Caracterización del hormigón vibrado

Hormigón	RF a 28 días (MPa)	RF a largo plazo (MPa)
HP-45	4,5	4,95
HP-40	4,0	4,40
HP-35	3,5	3,85

b. Hormigón magro y gravacemento

Se caracterizarán por su resistencia a flexotracción a largo plazo estimada a partir de la resistencia a compresión simple a 7 días utilizando los valores mostrados en la tabla 5.16.

Tabla 5.16. Caracterización de hormigón magro y gravacemento

Material	RC mínima a 7 días (MPa)	RF a largo plazo (MPa)
Material	RC mínima a 7 días (MPa)	RF a largo plazo (MPa)
Hormigón magro	8,0	2,5
Gravacemento (*)	8,0	2,5

(*) La gravacemento bajo pavimentos de hormigón tendrá un contenido de cemento superior a la utilizada bajo pavimentos bituminosos, y por tanto, su resistencia mínima a compresión será mayor.

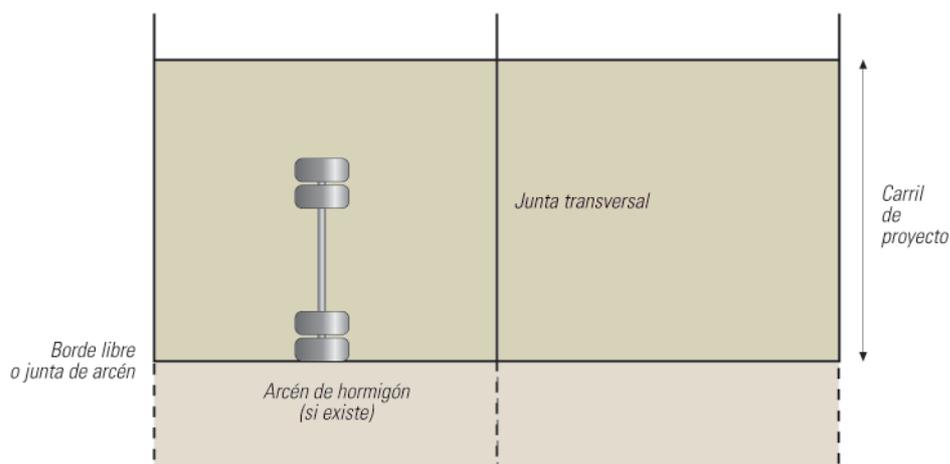
5.5.2 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE FALLO

En el dimensionamiento de firmes con pavimento de hormigón se realizan dos análisis de fallo, de fatiga y de erosión.

5.5.2.1 Criterio de fatiga

Este criterio se basa en el análisis de las máximas tensiones de flexotracción producidas por la carga en el borde en la mitad de la losa, que es la posición más crítica, a mitad de distancia de las juntas transversales según se muestra en la figura 19.

Figura 19. Posición crítica del eje tandem de carga para el análisis de fatiga



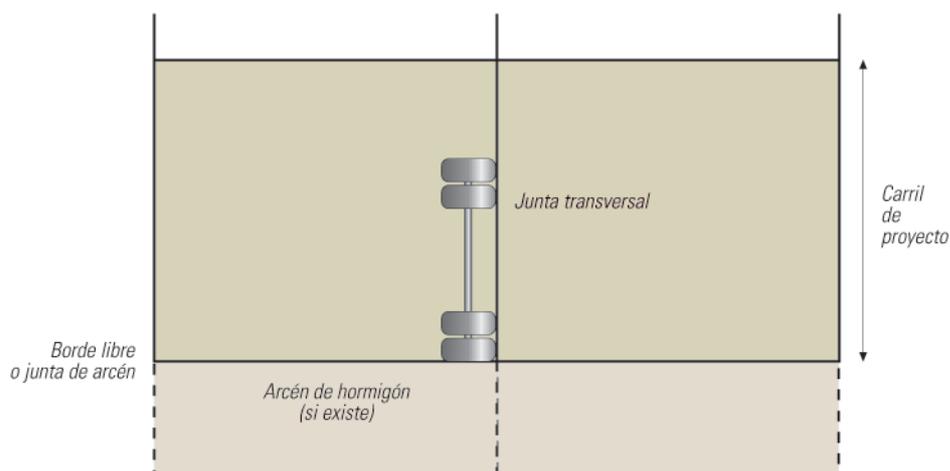
Debido a que la carga de borde está alejada de las juntas transversales, el espaciamiento de las juntas y la existencia o no de pasadores no tiene prácticamente ningún efecto sobre la tensión de borde de la losa. Sin embargo, cuando se disponen arceños de hormigón, la magnitud de la tensión de borde en la losa disminuye considerablemente.

Las leyes de fatiga utilizadas para la realización de los ábacos relacionan el número de repeticiones admisibles de carga con la "relación entre tensiones", definida como la existente entre la tensión crítica de tracción del hormigón debido a las cargas externas y la resistencia a flexotracción de dicho hormigón.

5.5.2.2 Criterio de erosión

Este criterio se basa en el análisis de los daños producidos en el firme debidos al bombeo de los finos de las capas inferiores, la erosión del cemento y el escalonamiento de las juntas, fenómenos relacionados con las deflexiones del firme. La deflexión más crítica se produce en la esquina de la losa cuando el eje de carga está situado en la junta transversal cerca de la esquina según se muestra en la figura 20.

Figura 20. Posición crítica del eje tandem de carga para el análisis de erosión



El resultado no se ve afectado por el espaciamiento de las juntas pero la existencia o no de pasadores influye en gran medida. Los arceños de hormigón reducen también considerablemente las tensiones.

Para analizar el comportamiento del firme hay que considerar los diferentes valores de la deflexión en función del espesor de la losa de hormigón y del coeficiente de balasto del cemento. Existe una correlación entre el comportamiento del firme y el "grado de trabajo", definido éste como el producto de la deflexión de esquina por la presión de la losa sobre el cemento, dividido por el radio de rigidez relativa (medida de la longitud del cuenco de deflexiones).

Para el dimensionamiento se utiliza la ecuación que relaciona el número de aplicaciones admisibles de la carga tipo con el grado de trabajo, que a su vez es función de la presión en el cemento bajo la esquina de la losa, del espesor de la losa y del coeficiente de balasto. A los resultados se les aplica un coeficiente corrector en función de la existencia o no de arceños de hormigón.

5.5.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL FIRME

Para el cálculo de la estructura del firme se seguirán los siguientes pasos:

- Caracterización del cemento del firme.
- Definición de las características del firme.
- Cálculo del espesor del pavimento de hormigón según el criterio de fatiga.

- Cálculo del espesor del pavimento de hormigón según el criterio de erosión.
- Análisis del resultado.

5.5.3.1 Caracterización del cimiento del firme

El cimiento del firme se considerará en el modelo como un líquido denso o conjunto de resortes sobre el que se apoyan las capas del firme y que vendrá definido por su coeficiente de balasto, K .

Se adoptarán los valores del coeficiente de balasto mostrados en la tabla 5.17, en función de la categoría del cimiento y del tipo de material empleado en la última capa de asiento.

Tabla 5.17. Valores de cálculo del coeficiente de balasto

Categoría de cimiento	Última capa de asiento	K (MPa/m)
Bajo	Suelo seleccionado o zahorra	50
	Suelo estabilizado tipo SC-2	60
	Suelo estabilizado tipo SC-3	70
Medio	Suelo seleccionado o zahorra	80
	Suelo estabilizado tipo SC-2	90
	Suelo estabilizado tipo SC-3	100
Alto	Suelo seleccionado o zahorra	110
	Suelo estabilizado tipo SC-2	120
	Suelo estabilizado tipo SC-3	140

5.5.3.2 Definición de las características del firme

Se definirán las características de los materiales utilizados, es decir la resistencia a flexotracción del hormigón vibrado en el pavimento y del hormigón magro o la gravacemento en la base. Así mismo, se definirán las características de las juntas, con o sin pasadores, y de los arcenes, de hormigón o de otro material. Se atenderá a lo dispuesto en el apartado 4.4.3 "Firmes con pavimento de hormigón" y a las prescripciones sobre materiales del capítulo 8 "Materiales para capas de firme".

5.5.3.3 Cálculo del espesor del pavimento de hormigón según el criterio de fatiga

El proceso de cálculo del espesor del pavimento comprenderá los siguientes pasos:

1. En función de la categoría de la carretera y del número de ejes equivalentes estimado como tráfico de proyecto, con la ayuda del gráfico GF.1, se halla la relación entre tensiones (RS).
2. A continuación se halla el valor de la tensión equivalente (SE), para un coeficiente de balasto $K=80$ MPa/m, a partir de la resistencia a flexotracción a largo plazo del hormigón del pavimento, mediante la expresión:

$$SE = R_{FLP} \times RS \quad [5.7]$$

3. Se corrige la tensión equivalente calculada (SEC) con el factor de corrección de tensiones (FCS) según el gráfico GF.2 en función del coeficiente de balasto definido en la tabla 5.7, por medio de la expresión:

$$SEC = SE / FCS \quad [5.8]$$

4. Se determina el espesor mínimo necesario de la losa de hormigón del pavimento. El gráfico permite elegir entre pavimento con o sin arcén de hormigón mediante la ayuda del gráfico GF.3. El espesor determinado (e_f) se redondeará al centímetro por exceso.

Gráficos GF.1 y GF.2

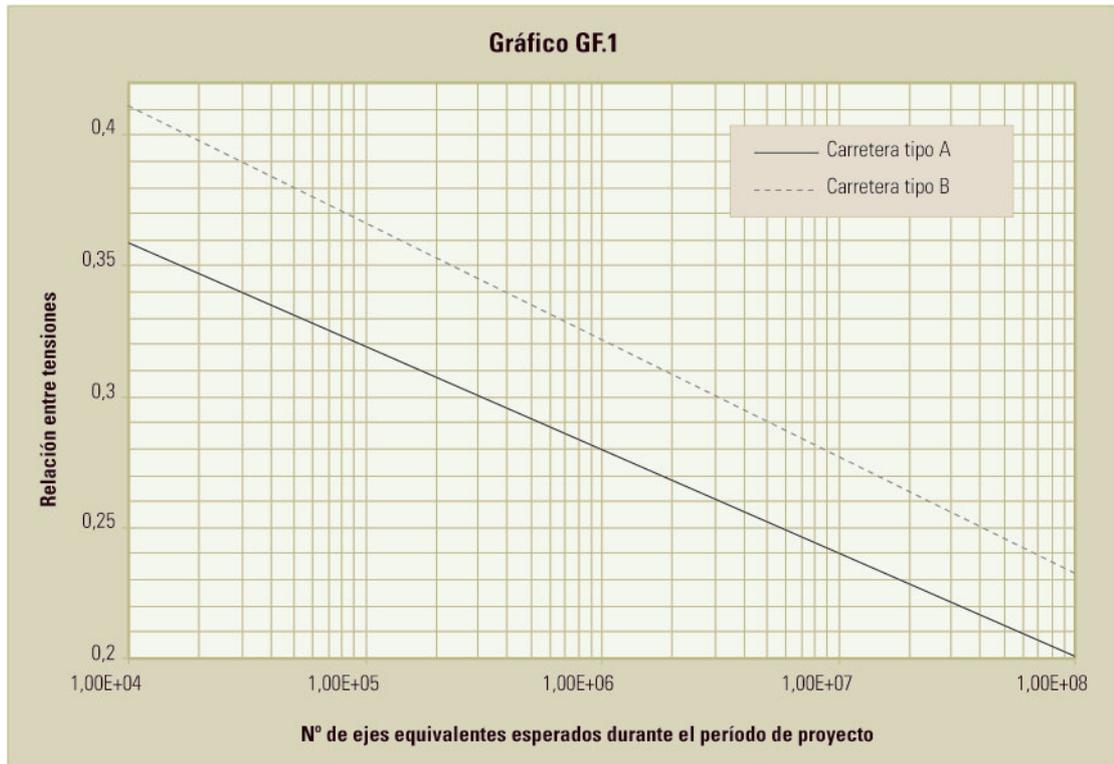
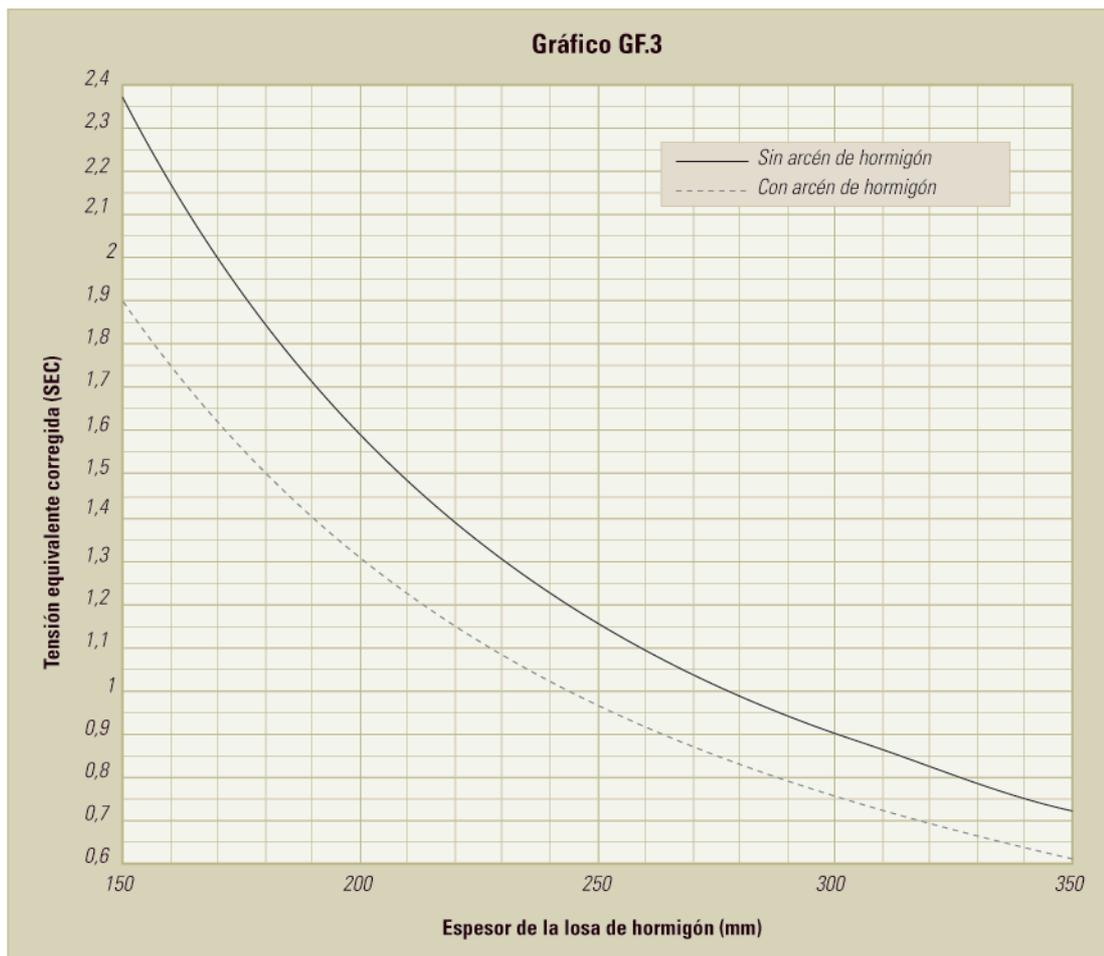


Gráfico GF.3



5.5.3.4 Cálculo del espesor del pavimento de hormigón según el criterio de erosión

El proceso de cálculo comprenderá los siguientes pasos:

1. En función de la categoría de la carretera, del tipo de arcén y del nº de ejes equivalentes estimado como tráfico de proyecto, con la ayuda del gráfico GE.1, se halla el factor de erosión (FE).
2. A continuación, se determinará el factor de erosión calculado (FEC) con el factor de corrección de erosión (FCE) mediante el gráfico GE.2 en función del coeficiente de balasto definido en la tabla 5.17, por medio de la expresión:

$$FEC = FE / FCE \quad [5.9].$$

3. Se determinará el espesor mínimo necesario de la losa de hormigón del pavimento mediante el gráfico GE.3. El gráfico permite elegir entre pavimento con o sin arcén de hormigón y con o sin pasadores en las juntas. El espesor determinado e_E hallado se redondeará al centímetro por exceso.

Gráfico GE.1

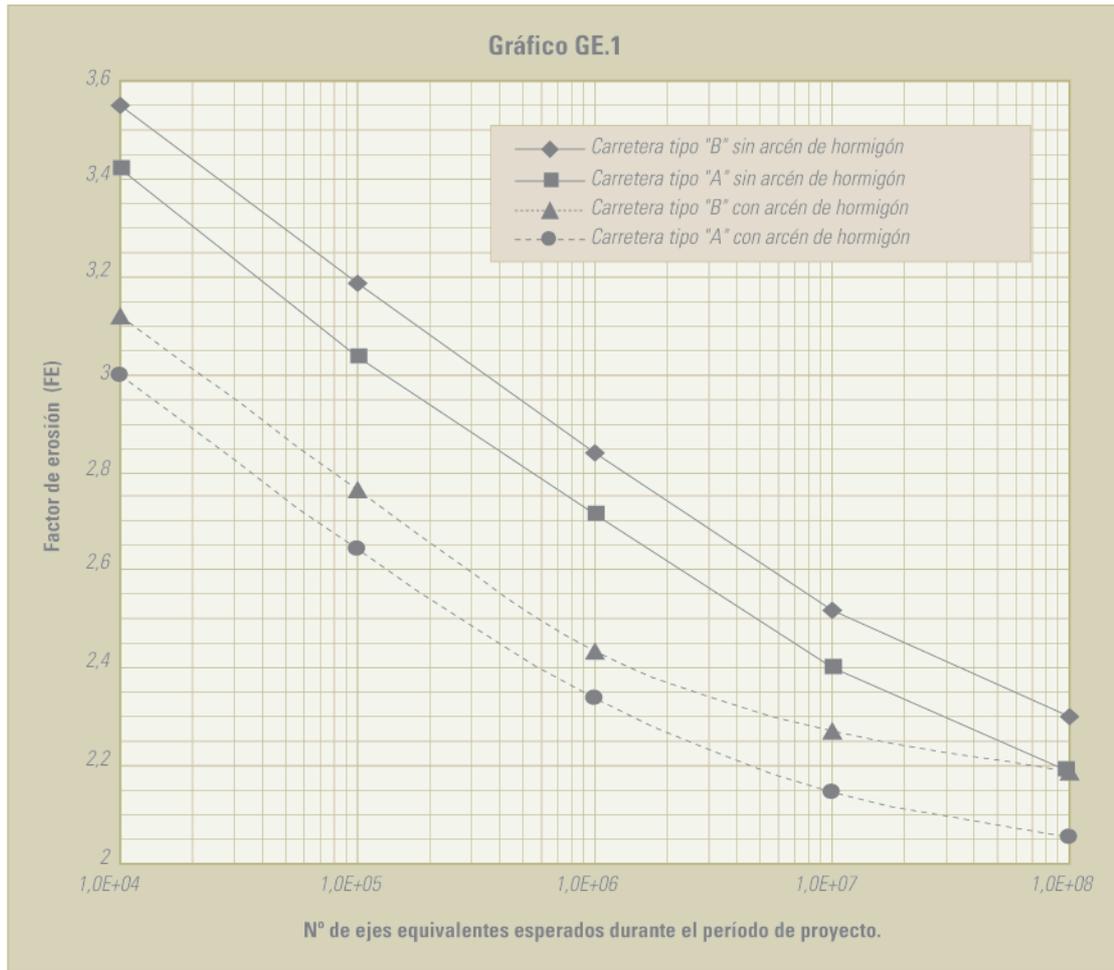


Gráfico GE.2

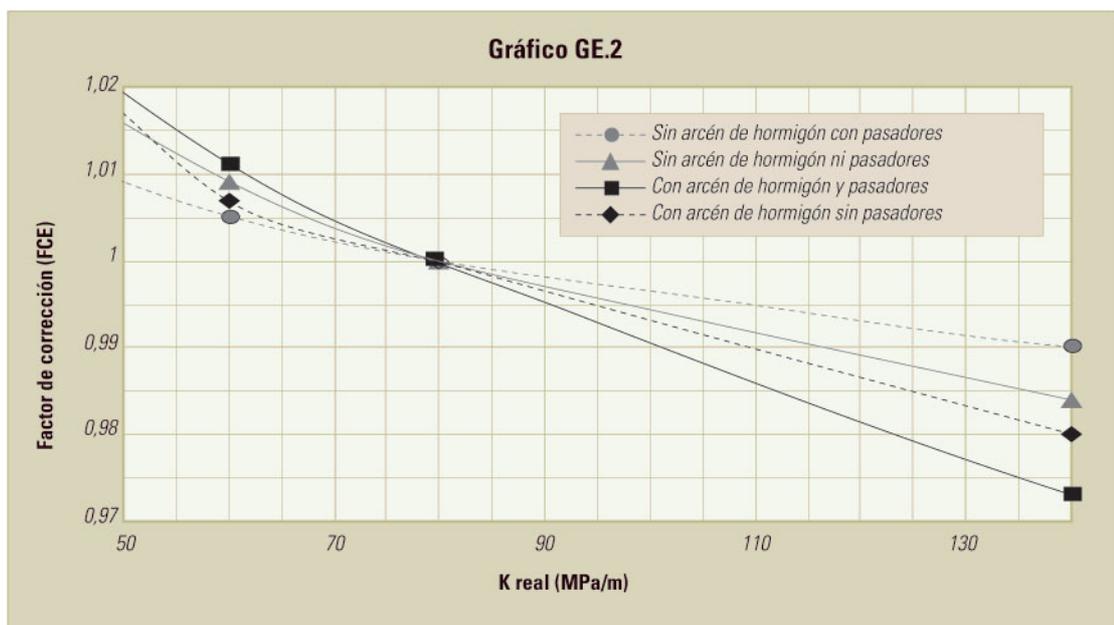
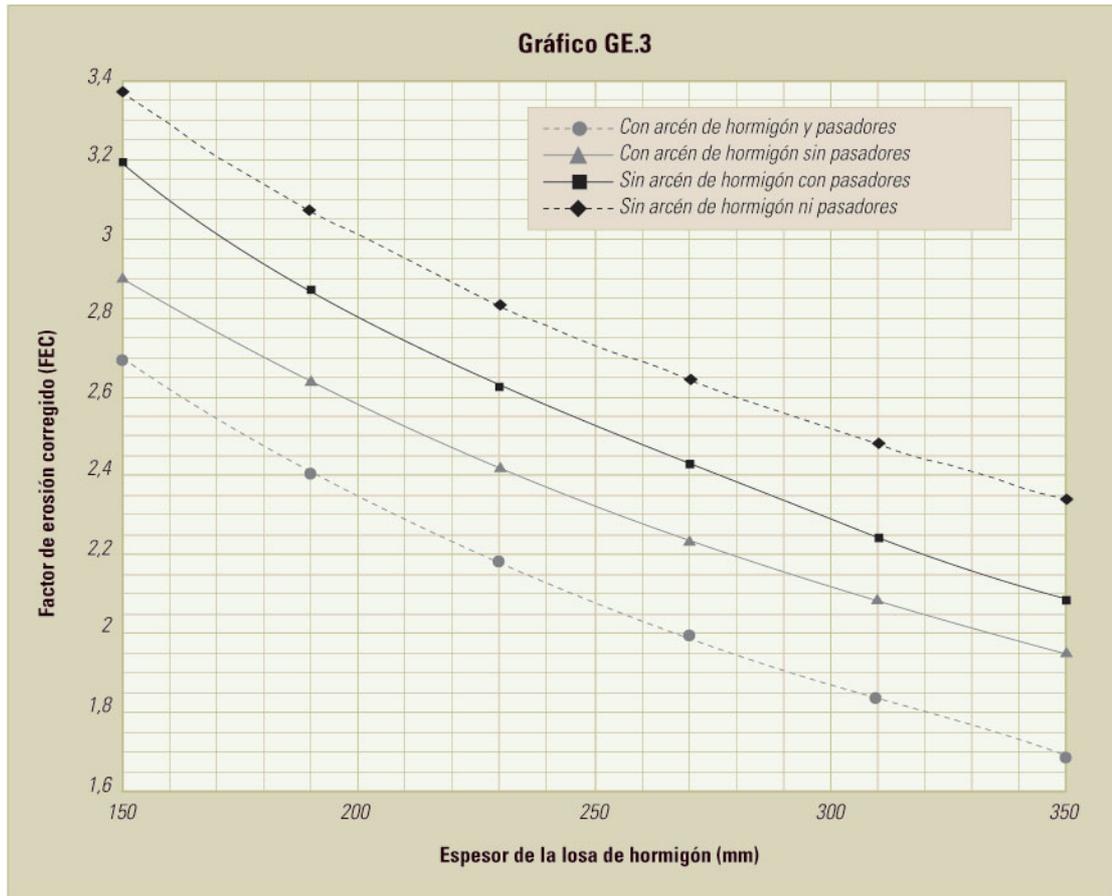


Gráfico GE.3



5.5.3.5 Análisis del resultado

Una vez calculados los espesores mínimos necesarios del pavimento de hormigón según ambos criterios, de fatiga, e_F , y de erosión, e_E , se elegirá como espesor de cálculo el mayor de los anteriores (e_C).

Si se va a disponer una base de hormigón magro o gravacemento se reducirá el espesor de cálculo del pavimento de hormigón en 5 cm.

PAVIMENTOS SOBRE TABLEROS DE OBRAS DE PASO

El pavimento del tablero de una obra de paso deberá cumplir la doble misión de proporcionar una adecuada rodadura al tráfico y proteger e impermeabilizar el tablero ante la acción directa del tráfico y de la intemperie, particularmente en climas o ambientes agresivos.

6.1 CONDICIONANTES DE PROYECTO

6.1.1 TRÁFICO

Se considerarán la intensidad y la composición del tráfico previsto en servicio según los criterios del apartado 3.1, así como las condiciones previstas durante la puesta en obra.

6.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA OBRA DE PASO

Se considerarán, entre otras, las características siguientes:

- Tipo de tablero (de hormigón armado o pretensado, metálico o mixto).
- Flexibilidad del tablero.
- Elementos de equipamiento de la obra de paso.
- Extensión de la superficie a pavimentar.
- Susceptibilidad al agua de los materiales del tablero al agua.

6.1.3 CONDICIONES AMBIENTALES

Se considerará la posible situación de la estructura dentro de zonas ambientales agresivas, como pueden ser las de climas fríos y lluviosos (ZT1 Y ZPH), las costeras, las de grandes incrementos térmicos (ZT4), o las industriales con presencia de agentes químicos nocivos (NO, SO, etc.).

6.2 SISTEMAS DE PAVIMENTACIÓN

Para el diseño del pavimento se seguirán las indicaciones expuestas en los apartados siguientes, adoptando alguna de las soluciones propuestas. En caso de utilizar otras secciones u otros sistemas de impermeabilización, se deberá justificar motivadamente la no adopción de alguna de las soluciones propuestas.

6.2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

En general, no se diseñarán pavimentos de espesores superiores a 10 cm, e incluso serán menores para tableros de puentes muy flexibles, donde no se emplearán espesores de pavimento superiores a 5 cm. Los sistemas de pavimentación indicados en este capítulo constan de capas inferiores de impermeabilización y protección, y de capas de pavimento.

Las capas inferiores deben proyectarse siguiendo los criterios que se indican en los apartados siguientes, salvo que se den alguna de las condiciones que se indican a continuación en las que no es necesario su empleo:

- Tableros en zonas de baja pluviometría (zona pluviométrica seca según apartado 3.3.2) en las cuales no exista riesgo de heladas.
- Tableros no expuestos a ambientes agresivos.

Si por dar continuidad a la rodadura se proyectan mezclas bituminosas del tipo drenante (en espesor de 4 cm) o del discontinuo (en espesor de 2,5 cm), se dispondrá bajo las mismas una capa de 5 cm de mezcla bituminosa en caliente del tipo denso o semidenso y la correspondiente capa de regularización en su caso. En zonas con riesgos de heladas en la obra de paso no se usarán mezclas drenantes¹⁰.

6.2.1.1 Preparación del tablero

Se tendrá especial cuidado con el acabado del mismo, así como con la compatibilidad entre dicho acabado y la solución elegida. Las siguientes prescripciones técnicas se especificarán obligatoriamente en el correspondiente pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto de Construcción. En tableros de hormigón se tendrán en cuenta las prescripciones, que se exponen a continuación, en particular cuando se empleen resinas como tratamiento de impermeabilización:

- La superficie del tablero debe estar limpia de restos de lechadas de inyección, cordones de mortero, manchas de grasa, gasoil o aceites, etc., y debe presentar una textura adecuada, de manera que las irregularidades sean menores de 5 mm medidas con la regla de 3 m, evitando oquedades superficiales, huellas diversas, etc. Para ello, se corregirá en su caso con materiales compatibles con el tablero y la impermeabilización (másticos, mezclas asfálticas finas y estables, etc.), y si esto no fuese posible se fresará.
- La superficie del tablero ha de ser paralela a la capa de rodadura, para evitar las cuñas o reperfilados.
- Todos los bordes que vayan a impermeabilizarse habrán de achaflanarse con un radio mínimo de 40 mm, y los ángulos entrantes se suavizarán a 45º mediante relleno de mortero de resina.
- Se preverán los sistemas de desagüe necesarios para la evacuación de las aguas siguiendo las directrices expuestas en el apartado 6.3.

En tableros de hormigón, para las operaciones de limpieza y eliminación de los materiales no cohesivos, se pueden emplear técnicas como decapado mecánico, chorro de arena, cepillos metálicos o agua a presión. Sin embargo, en tableros metálicos, se hará imprescindible la realización de una limpieza exhaustiva del tablero por medio de chorro de arena.

En caso de utilizar másticos en caliente, se debe colocar entre el mástico y el tablero, tras el tratamiento de imprimación, una capa de ventilación, de malla de fibra de vidrio o perforada con numerosos puntos de anclaje, que deje circular libremente el vapor de agua impidiendo la formación de ampollas.

6.2.1.2 Sistema aplicable a tableros metálicos

Para este tipo de tableros se podrá optar por tres tipos distintos de soluciones:

- Soluciones a partir de compuestos de resinas, especialmente resinas epoxi.
- Soluciones bituminosas altamente modificadas.
- Soluciones mixtas formadas por mezclas o capas de los productos usados en las dos soluciones anteriores.

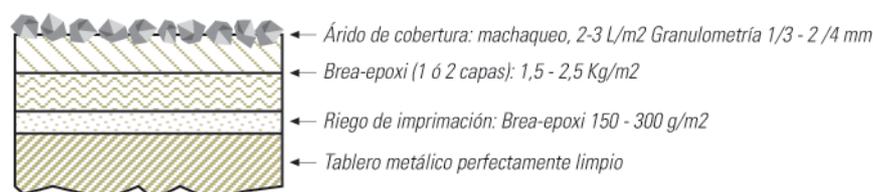
¹⁰ Si en las aproximaciones a la obra de paso se proyectan mezclas drenantes, puede ser adecuado disponer en el tablero mezclas discontinuas en capa fina para dar cierta continuidad a la textura superficial de aquellas.

El sistema de pavimentación estará formado por las siguientes capas:

1. Un riego de imprimación, que tiene también funciones de impermeabilización, formado por ligantes bituminosos modificados con elastómeros, o bien por tratamientos de imprimación epoxidicos o de alquitrán-epoxi, con incrustación de árido de machaqueo para conseguir el anclaje con el resto de las capas, e incluso con un posterior tratamiento de adherencia.
2. Una capa de protección que a su vez refuerza la impermeabilización, compuesta por un mástico en frío o en caliente. Se pueden emplear betunes modificados con elastómeros, brea-epoxi, betún-caucho, etc.
3. Un pavimento formado por:
 - En tableros de losa ortótropa, un sistema de mezcla en capa fina muy flexible (lechadas bituminosas, microaglomerados en caliente, o tratamientos superficiales con gravilla y con ligantes puros o modificados) en espesor inferior a 3 cm para todo tipo de tráfico.
 - En tableros flexibles, mezclas bituminosas muy resistentes a fatiga en espesor comprendido entre 3 y 5 cm. Se pueden emplear mezclas S-12 con un ligante modificado, o mezclas discontinuas en capa fina con un fuerte riego de adherencia.
 - En tableros rígidos, mezclas bituminosas con un espesor total de 8 a 10 cm para tráfico T2 o superiores y de 5 a 6 cm para tráfico inferiores.

En la figura 21 se muestra un ejemplo de sistema de impermeabilización aplicable a tableros metálicos, al que habrá que añadir alguna de las soluciones propuestas para capa de rodadura.

Figura 21. **Ejemplo de solución aplicable a tableros metálicos (a falta de colocar la capa de rodadura)**



6.2.1.3 Sistema aplicable a tableros rígidos¹¹ de hormigón

Se distinguirá entre dos tipos de soluciones, en función del tráfico de proyecto que se estime vaya a circular sobre el tablero:

a. Tráfico T2 o superior

Se empleará un sistema compuesto por:

1. Riego de imprimación del tablero.
2. Capa de impermeabilización, con una capa de protección para evitar que esta se dañe durante los trabajos de construcción.
3. Dos capas de mezcla bituminosa en caliente con un espesor total de 8 a 10 cm, dispuestas de la siguiente manera:

¹¹ Entre éstos pueden citarse por ejemplo los constituidos por tableros de hormigón armado, de vigas de hormigón pretensado de luces no superiores a 25 m, etc.

- Capa intermedia de regularización de mezcla bituminosa tipo densa o semidensa y de tamaño máximo de árido pequeño.
- Capa de rodadura de mezcla bituminosa tipo densa o semidensa de 6 cm de espesor, o mezcla bituminosa discontinua.

b. Tráfico T3 o inferior

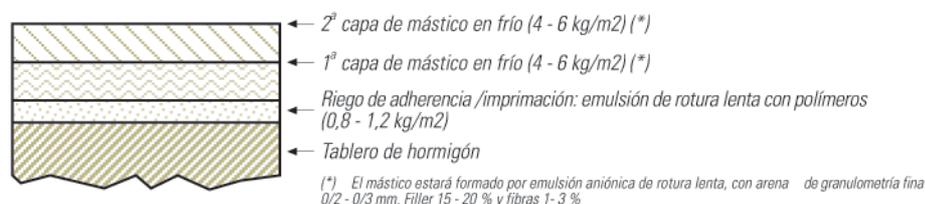
Se utilizará un riego de imprimación del tablero y una capa de 5-6 cm de mezcla bituminosa en caliente. En carreteras no pavimentadas con mezcla bituminosa, puede también emplearse un tratamiento superficial con ligante modificado o una lechada bituminosa.

6.2.1.4 Sistema aplicable a tableros flexibles de hormigón

Se tendrá que impermeabilizar el tablero y extender, para todo tipo de tráfico, un pavimento delgado (3-5 cm) de una mezcla bituminosa muy resistente a fatiga y perfectamente adherida al tablero. Se pueden emplear mezclas S-12 con un ligante modificado, o mezclas discontinuas en capa fina con un fuerte riego de adherencia.

En general, para tableros de hormigón, tanto rígidos como flexibles, se podrá usar el sistema de impermeabilización propuesto en la figura 22 (al que habrá que añadir la capa de rodadura), sin perjuicio de otros que pudieran resultar eficaces.

Figura 22. **Ejemplo de solución aplicable a tableros de hormigón (a falta de colocar la capa de rodadura)**



Comentario Impermeabilización con láminas prefabricadas

En cualesquiera de las situaciones anteriores pueden emplearse sistemas de impermeabilización con láminas prefabricadas de tipo bituminoso o elastomérico. Todos los tipos de láminas prefabricadas deben ir siempre adheridas al tablero del puente, mediante la aplicación de un ligante (betún o betún-polímero) o soldadas por calentamiento de su cara inferior. Las láminas delgadas deben llevar una capa de protección para evitar roturas por punzonamiento durante los trabajos de construcción.

6.2.2 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

a. Pavimento incorporado al tablero

Se trata de una solución monolítica en que los 5 cm superiores se consideran como capa de rodadura. Ello exige un hormigón resistente, con arena silíceo y textura superficial adecuada.

b. Pavimento superpuesto y adherido

Se debe comenzar por una adecuada limpieza del tablero con chorro de arena tras mantenerlo mojado durante 48 horas. A continuación podrá escogerse entre las siguientes soluciones:

- a. Extendido de una capa de mortero de cemento para asegurar la adherencia con conectores u otros dispositivos de anclaje al tablero y posterior extendido de una capa de resistencia característica mínima a compresión de 35 MPa con un espesor medio de 8 cm de hormigón. Esta capa se compactará, se terminará mecánicamente y se curará cuidadosamente.
- b. Colocación de una capa de hormigón con fibras de acero (30-50 kg/m³) de extremos conformados de espesor entre 4 y 8 cm. Además se dispondrán dispositivos de anclaje y una capa de adherencia de mortero epoxi o polímero entre tablero y pavimento.

En zonas de heladas o con empleo habitual de sales, es obligado el empleo de hormigón con aire ocluido.

6.3 EVACUACIÓN DE AGUA

Se proyectarán los dispositivos necesarios para la evacuación tanto de las aguas superficiales que discurran sobre la capa de rodadura, como las que circulen a través del pavimento sobre la capa de impermeabilización. Para ello, se prestará especial atención a los detalles constructivos como son las uniones de la impermeabilización y el pavimento en barreras de protección, bordillos, juntas de dilatación y sumideros.

6.3.1 EVACUACIÓN TRANSVERSAL

Se dotará al pavimento de las pendientes adecuadas, dirigiendo el agua hacia la canalización longitudinal. En caso de disponer de aceras elevadas se les dotará de pendientes del 1-2 % hacia el interior del puente. Cuando la solución adoptada sea sin aceras elevadas, debe preverse cualquier sistema para evitar goterones a lo largo de la imposta.

6.3.2 EVACUACIÓN LONGITUDINAL

Se implantará un sistema de canalización del agua que conecte con los sistemas generales de desagüe. Se podrán usar conducciones de aluminio con ranuras situadas sobre la membrana impermeabilizante, u otros sistemas similares. Se colocarán sumideros o imbornales aguas arriba de todas las juntas de dilatación, siendo el diámetro de los tubos de desagüe de éstos, como mínimo, de 100 mm.

6.4 JUNTAS PARA OBRAS DE PASO

Para que la junta de una obra de paso cumpla su misión correctamente deberá satisfacer las siguientes funciones:

- Asegurar la libertad de movimiento del tablero.
- Dar continuidad a la capa de rodadura, siendo capaz de soportar las cargas de tráfico.
- No ser fuente de ruidos, impactos y vibraciones.
- Tener una buena estanqueidad y/o permitir una correcta evacuación de aguas.

Se tenderá a buscar sistemas que permitan una vida de servicio igual o superior a la del pavimento en que se insertan y con escaso mantenimiento. A continuación se indican algunos criterios, tanto para el proyecto como para la ejecución de las mismas, que deberán seguirse al margen de la tipología elegida.

En lo referente al proyecto de las juntas, se atenderá a lo siguiente:

- Se analizarán sus movimientos y se incluirán todos sus componentes.
- En estructuras isostáticas con varias juntas, se dimensionará con cierta amplitud, ya que es frecuente que los movimientos no se repartan equitativamente.
- Se proyectará un sistema de impermeabilización continuo a lo largo de toda la junta.

- Se proyectarán sistemas de drenaje adecuados en las juntas.
- Se incorporarán todas las piezas especiales necesarias (bordillos, medianas, etc.)

En lo referente a la puesta en obra de las juntas, se incluirán en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares los siguientes criterios de ejecución:

- Se planificará adecuadamente el momento de su instalación, de manera que se realicen los trabajos con la suficiente calidad y en la situación adecuada de acuerdo a los movimientos previsibles.
- Se proporcionará al instalador los datos que permitan un reglaje ajustado a la situación de la estructura.
- Se controlará la ejecución, en particular de la impermeabilización, y en caso de que se adopte un sistema de drenaje, se instruirá sobre el punto de desagüe del mismo.
- Se exigirá del fabricante la información precisa del alcance y limitaciones de los sistemas que propone, incluyendo todos los elementos auxiliares.



SECCIONES DE FIRME EN ARCENES

En este capítulo se presentan directrices para el proyecto de soluciones de firme en arcenes junto con esquemas de algunas de ellas. La elección de la sección de firme será función de la categoría de tráfico de proyecto y del firme proyectado en la calzada. Siempre que sea posible, se procurará proyectar secciones con las mismas unidades de obra que en el firme de la calzada; asimismo, que las capas del arcén quedarán enrasadas con las de la calzada.

Las secciones definidas aquí están previstas para unas solicitaciones mínimas del tráfico pesado acordes con la función asignada a los arcenes. En el caso de que se previeran solicitaciones anormalmente intensas, podrán justificarse secciones de mayor capacidad estructural.

7.1 CONDICIONANTES DE PROYECTO

Para cualquier tráfico de proyecto siempre es posible la prolongación del firme de la calzada adyacente. Esta solución puede tener en algunos casos ventajas constructivas.

Para la elección de la sección de firme en arcén se seguirán las siguientes directrices:

1. El firme de los arcenes de anchura no superior a 1,25 m será prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre calzada y arcén.
2. En arcenes de anchura superior a 1,25 m se prolongará el firme de la calzada adyacente en al menos los 20 cm interiores del arcén, el resto de su firme dependerá de la categoría de tráfico pesado prevista para la calzada y de la sección adoptada en ésta. Se evitará en lo posible la aparición de nuevas unidades de obra.

En el caso de que la calzada dispusiera de una capa inferior drenante o un geotextil, se prolongarán bajo el arcén hasta desaguar a un sistema de drenaje adecuado.

Ha de tenerse en cuenta la disposición de pendientes de calzada y arcén a efectos de colocación de drenajes, especialmente si la pendiente del arcén vierte hacia la calzada.

Para fijar los espesores de construcción de las capas o tongadas del firme del arcén se tendrá en cuenta la distribución de capas del firme de la calzada, a fin de coordinar su construcción. Si fuera previsible un ensanche de la calzada a costa del arcén, se procurará asimismo adoptar una solución compatible con la futura ampliación.

El espesor de construcción de cualquier capa de la sección de firme del arcén, excepto de las bituminosas, estará comprendido entre 15 y 25 cm. Si se superase este último límite se construirá en dos capas, en cuyo caso el límite inferior podrá reducirse hasta 12 cm. Podrá sustituirse la zorra por macadam en cualquiera de las soluciones adoptadas para tráfico T4.

7.2 CATÁLOGO DE SECCIONES PARA ARCÉN

7.2.1 CATEGORÍAS DE TRÁFICO T0 Y T1

a. Junto a calzadas con pavimento de hormigón vibrado se diseñará alguna de las dos soluciones siguientes:

1. Pavimento de hormigón vibrado en masa de 15 cm de espesor, con textura superficial transversal. Bajo él se dispondrá zahorra hasta alcanzar la cota de la capa granular de la calzada, que se prolongará bajo el arcén, o, si no la hubiera, la del plano de explanada. Este pavimento deberá ir atado al de la calzada mediante barras de unión de 12 mm de diámetro y 80 cm de longitud, situadas a la mitad del canto y espaciadas 1 m. La junta longitudinal entre ambos se sellará.
2. Pavimento de mezcla bituminosa del tipo denso (D) o semidenso (S) de 6 cm de espesor, enrasado con el de la calzada. Bajo él se podrá optar por disponer, hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea gravacemento u hormigón magro.
 - Zahorra.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

b. Junto a calzadas con pavimento de mezcla bituminosa se diseñará alguna de las dos soluciones siguientes:

1. Si la capa de rodadura de la calzada no fuera drenante, se continuará en el arcén. Debajo se podrá optar por disponer:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea este material o gravacemento, con espesor mínimo de 20 cm para la categoría de tráfico pesado T0 o de 18 cm para la T1.
 - Zahorra, procurando enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

2. Si la capa de rodadura de la calzada fuera drenante, se podrá optar por:

- Continuarla en el arcén. Bajo la capa de mezcla drenante se colocará otra capa de mezcla bituminosa densa (D) o semidensa (S) de 5 cm de espesor, y bajo ésta se podrá optar por disponer:
 - Suelocemento, si en la calzada se emplea este material o gravacemento, con espesor mínimo de 20 cm para la categoría de tráfico pesado T0 o de 18 cm para la categoría de tráfico T1.
 - Zahorra, hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

- Continuarla hasta rebasar en 50 cm el borde de la calzada, achaflanando su borde exterior. La capa de rodadura del arcén será de mezcla bituminosa densa o semidensa de 6 cm de espesor. Bajo esta capa se podrá disponer:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea este material o gravacemento, con espesor mínimo de 20 cm para la categoría de tráfico T0 o de 18 cm para la categoría de tráfico T1.
 - Zahorra, hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

7.2.2 CATEGORÍA DE TRÁFICO T2

c. Junto a calzadas con pavimento de hormigón vibrado se diseñará alguna de las soluciones siguientes:

1. Pavimento de hormigón vibrado en masa u hormigón magro de 15 cm de espesor, con textura superficial transversal. Bajo él se dispondrá zahorra hasta alcanzar la cota de la capa granular de la calzada, que se prolongará bajo el arcén, o, si no la hubiera, la del plano de explanada. La junta longitudinal entre ambos se sellará.
2. Pavimento de mezcla bituminosa del tipo denso (D) o semidenso (S) de 5 cm de espesor, enrasado con el de la calzada. Bajo él se podrá optar por disponer, hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea gravacemento u hormigón magro.
 - Zahorra.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

d. Junto a calzadas con pavimento de mezcla bituminosa se diseñará alguna de las soluciones siguientes:

1. Si la capa de rodadura de la calzada no fuera drenante, se continuará en el arcén. Bajo él se podrá optar por disponer hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea este material o gravacemento.
 - Zahorra, procurando enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

2. Si la capa de rodadura de la calzada fuera drenante, se debe continuar hasta rebasar en 50 cm el borde de la calzada, achaflanando su borde exterior. La capa de rodadura del arcén será de mezcla bituminosa densa o semidensa de 5 cm de espesor. Bajo esta capa se podrá optar por disponer hasta enrasar con la cara inferior del pavimento de la calzada:
 - Suelocemento, si en calzada se emplea este material o gravacemento.
 - Zahorra.

El resto del espesor hasta el plano de explanada será de zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior.

7.2.3 CATEGORÍAS DE TRÁFICO T3 o T4

Se diseñará un pavimento constituido por un tratamiento superficial mediante riego con gravilla o lechada bituminosa sobre zahorra con el mismo espesor del pavimento de hormigón o de las capas de mezcla bituminosa de la calzada. El resto del espesor se completará con zahorra, o suelo seleccionado tipo S3 o superior hasta alcanzar el plano de explanada.

Cuando el pavimento de la calzada sea de mezcla bituminosa, la superficie del pavimento de arcén deberá quedar enrasada con la capa intermedia, y la capa de rodadura se continuará en los primeros 50 cm del arcén achaflanando su borde exterior. Sin embargo, si el pavimento de la calzada es de hormigón, se enrasará a unos 2 cm por debajo de éste.

Opcionalmente para tráfico T4, junto a calzadas con pavimento de mezcla bituminosa no drenante o tratamiento superficial, el arcén puede no estar pavimentado. El firme estará constituido por zahorra, que no sea erosionable, con un espesor mínimo de 18 cm, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; y el resto hasta el plano de explanada será de zahorra, o de suelo seleccionado tipo S3 o superior. La superficie del arcén se enrasará con la capa intermedia del pavimento de la calzada.

En las figuras siguientes, se presentan algunos de los esquemas de soluciones propuestas.

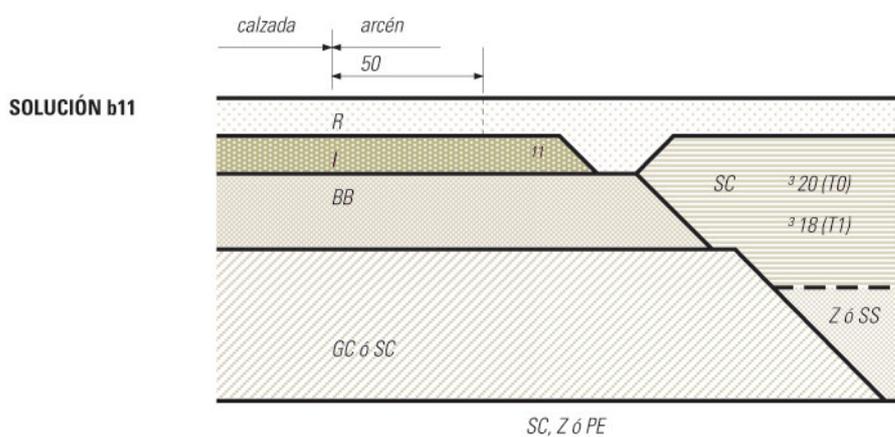
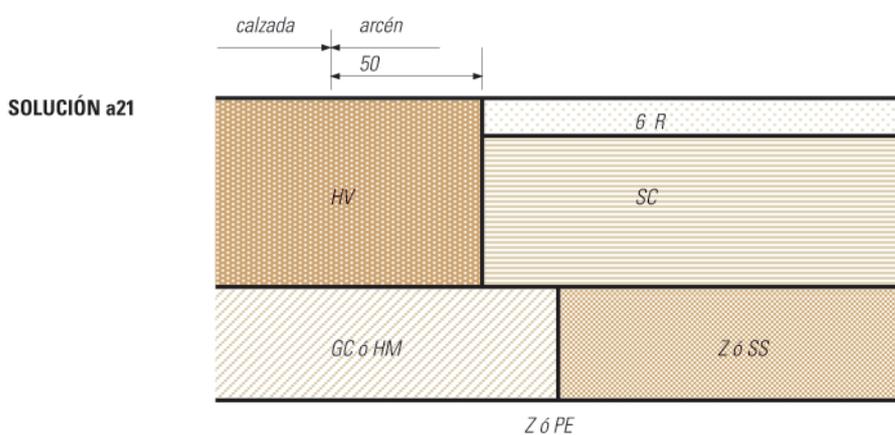
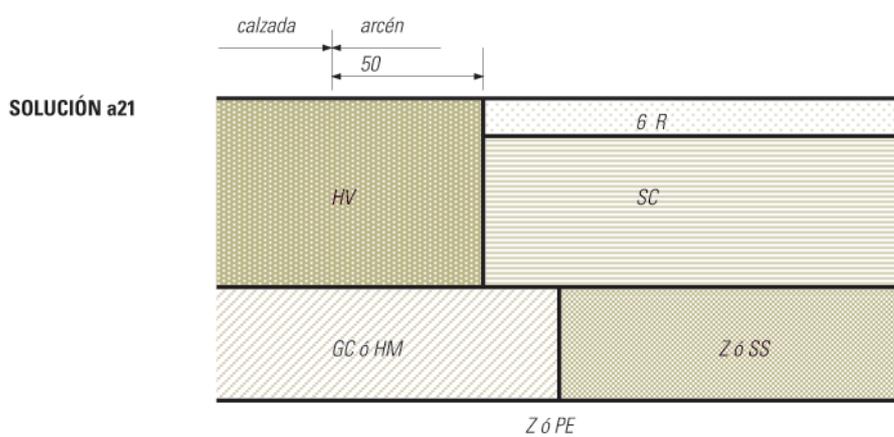
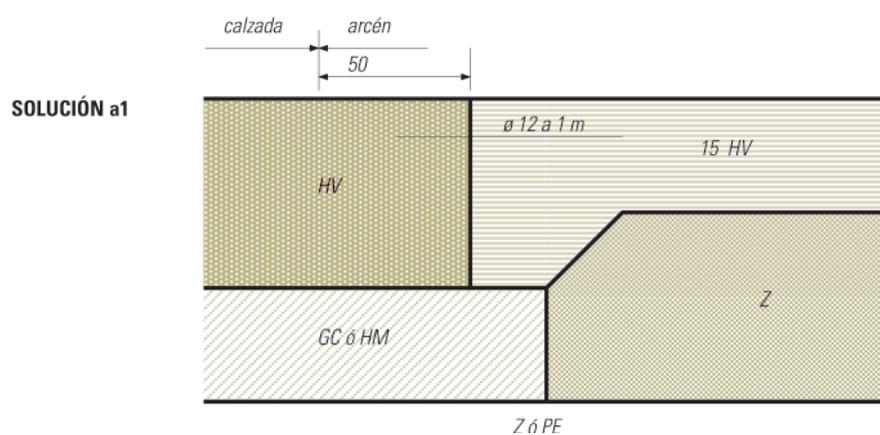
LEYENDA DE MATERIALES

BB	Mezcla bituminosa convencional en capa base
GC	Gravacemento
HM	Hormigón magro
HV	Hormigón vibrado
I	Mezcla bituminosa convencional en capa intermedia
PE	Plano de explanada
R	Mezcla bituminosa convencional en capa de rodadura
RD	Mezcla bituminosa drenante en capa de rodadura
SC	Suelocemento
SS	Suelo seleccionado tipo S3 o superior
TS	Tratamiento superficial
Z	Zahorra

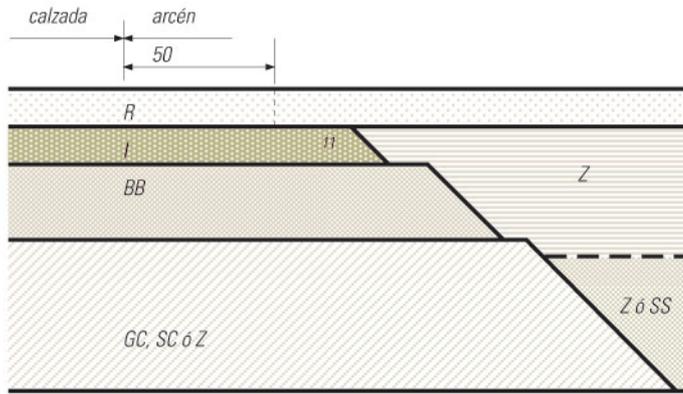
NOTAS:

1. Cotas en cm.
2. No se han representado las pendientes transversales de las capas.
3. No se han dibujado las secciones en las que el firme del arcén es continuación del firme de la calzada.

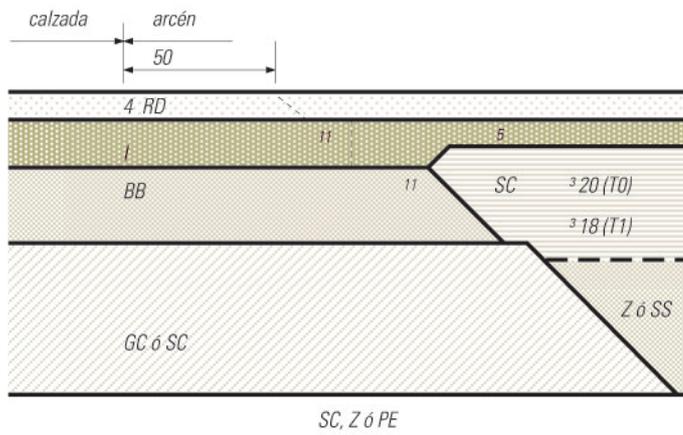
CATEGORÍAS DE TRÁFICO T0 Y T1



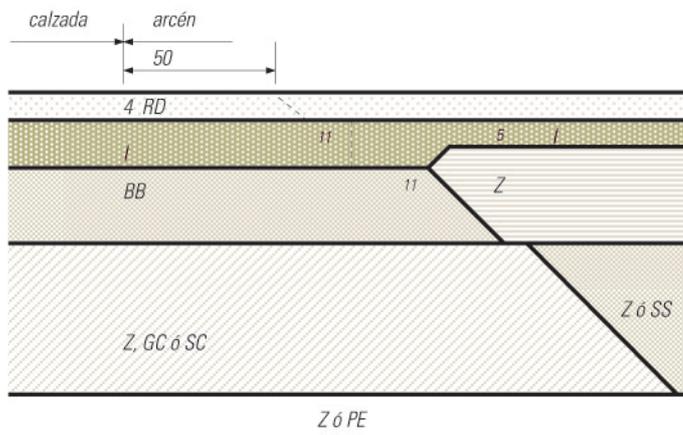
SOLUCIÓN b12



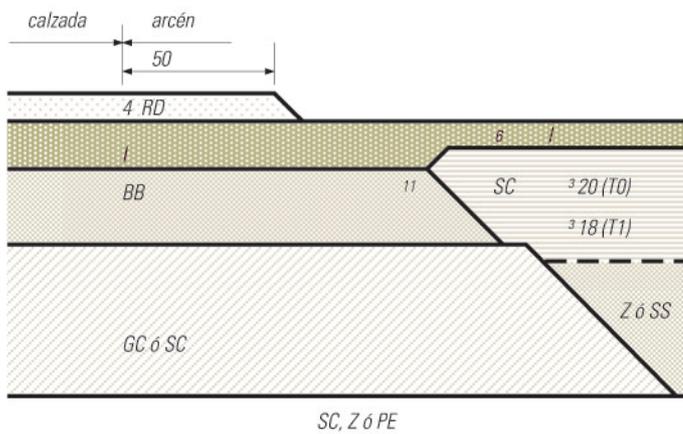
SOLUCIÓN b211



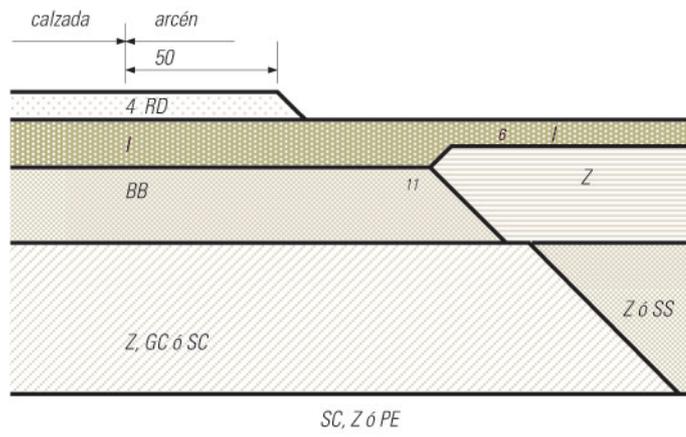
SOLUCIÓN b212



SOLUCIÓN b221

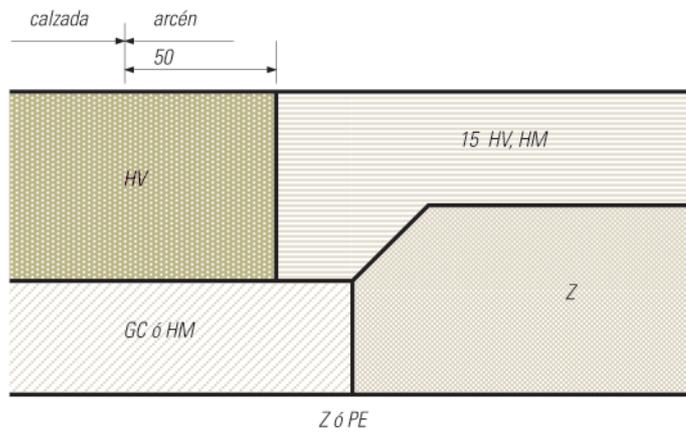


SOLUCIÓN b222

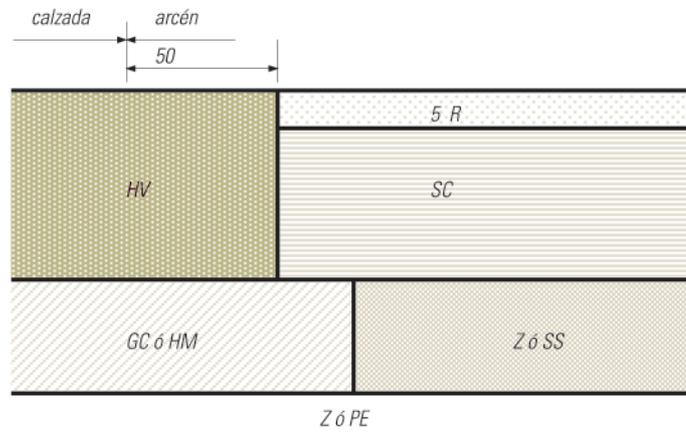


CATEGORÍA DE TRÁFICO T2

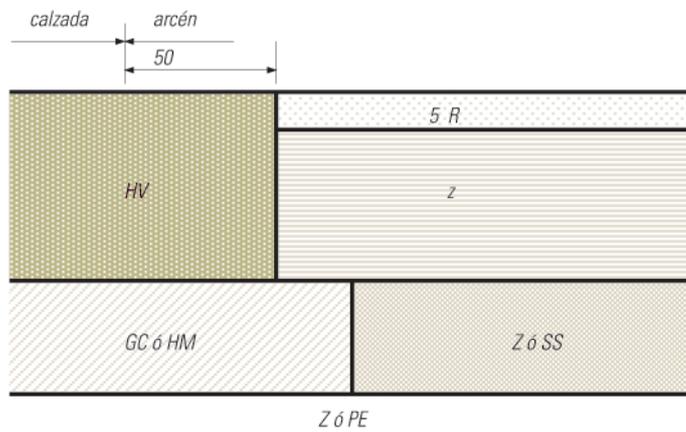
SOLUCIÓN c1



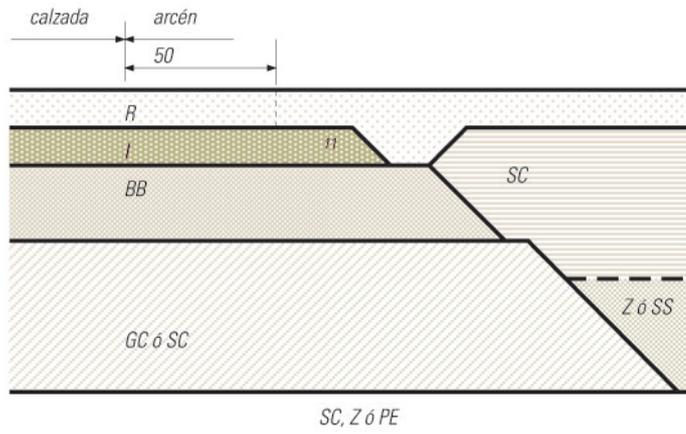
SOLUCIÓN c21



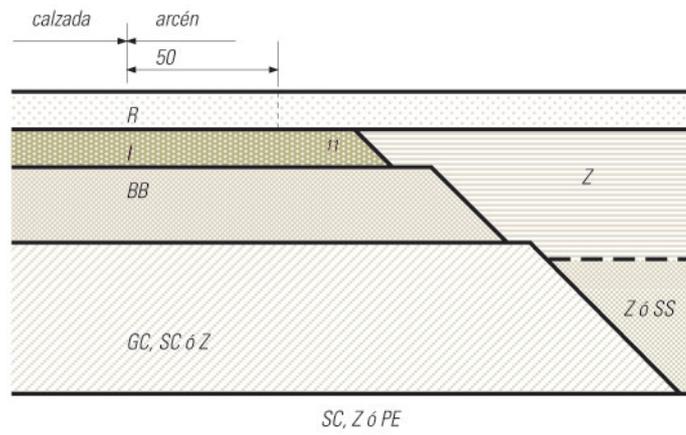
SOLUCIÓN c22



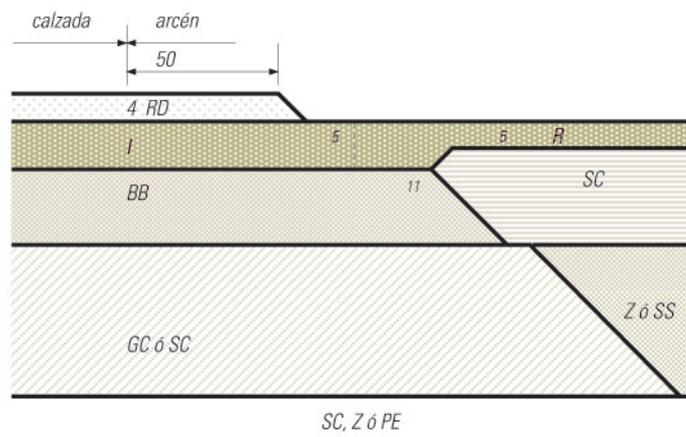
SOLUCIÓN d11



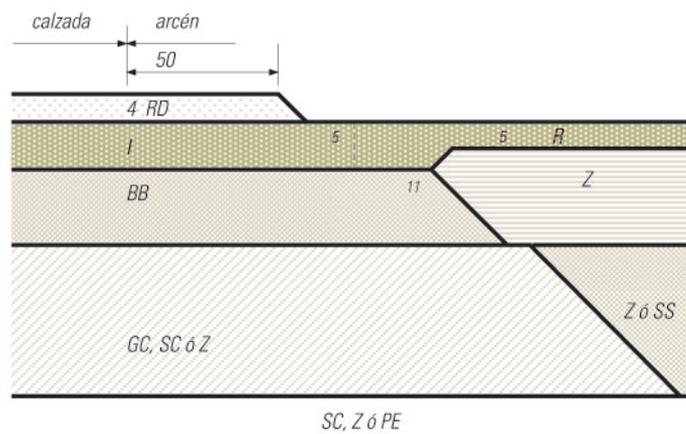
SOLUCIÓN d12



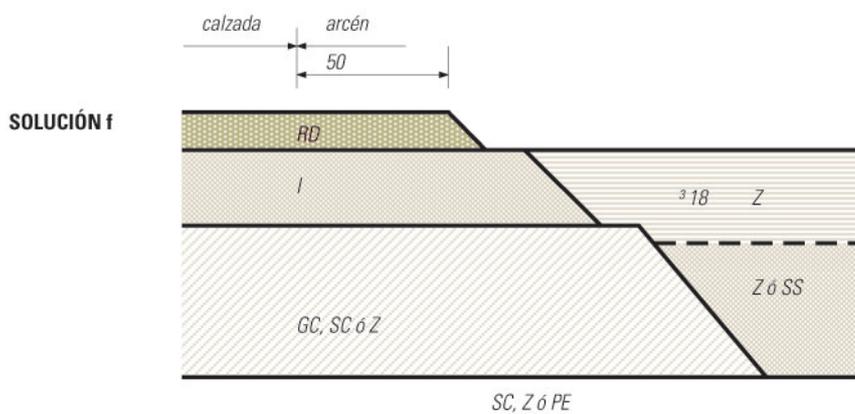
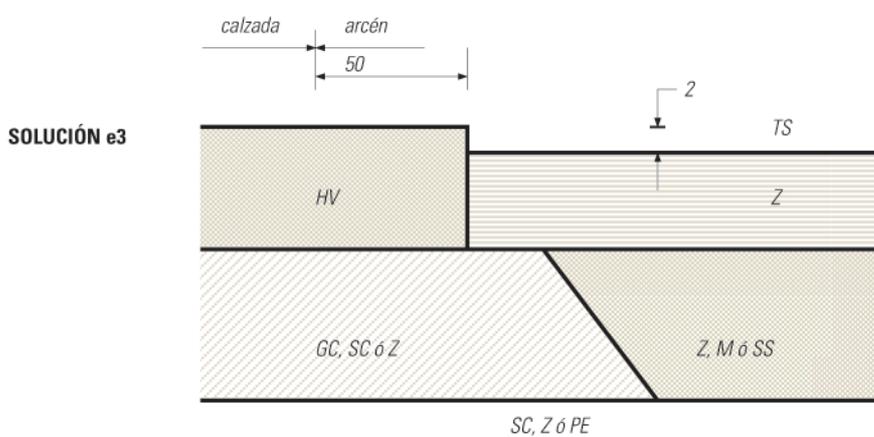
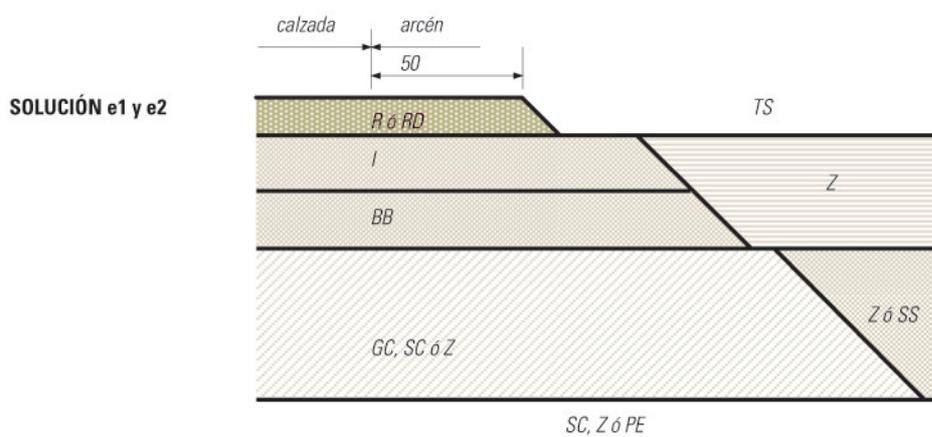
SOLUCIÓN d21



SOLUCIÓN d22



CATEGORÍAS DE TRÁFICO T3 Y T4



MATERIALES PARA CAPAS DE FIRME

En este capítulo se relacionan los posibles materiales a utilizar en las secciones de firme, para los que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá tener en cuenta, entre otras, las prescripciones siguientes.

8.1 ÁRIDOS

A efectos de establecer los valores límite de las características de los áridos a emplear en las distintas unidades de obra, se fijará el grupo de valores en función de la situación de la unidad de obra en la plataforma y de la categoría de tráfico de proyecto, de acuerdo con lo indicado en las tablas 8.1 y 8.2.

Tabla 8.1 Grupo de valores de los áridos

Situación y Categoría de tráfico	Grupo
Calzada: T0, T1, T2A	A
Calzada: T2B, T3A; Arcén: T0, T1	B
Calzada: T3B, T4; Arcén: T2, T3A	C
Otras	D

Tabla 8.2. Valores límite de las características de los áridos

Capa	Pavimento						Base capa superior						Base capa inferior								
	Ud. Obra	M	MBI	MBR	HV	TSG	TSL	Z	M	SC	GC	GE	MB	HM	Z	SC	GC.HC	GE	MB	HM	
Grupo A	EA		50	50	50	50	50				40	40	45	40	40		35		45	40	
	Plas		N.P.						N.P.		25/6	N.P.			N.P.	40/15	N.P.	25/6	N.P.	25/6	
	Laja	15	25	30	15	20	20			25						30				40	
	Frac		100	60	100	100	60			90	30	70	0	50	0						
	DLA	18	25	35	15	20	20			30	25	30	28	35	30	35					
Grupo B	EA		45	50	50	50	45			40	45	35		30	40						
	Plas		N						25/6	N.P.			N.P.	40/15	N.P.	25/6	N.P.	25/6			
	Laja	25	30	30	20	25	25			35	30			40							
	Frac	100	90	50	90	90	50			75	0	50	0	50	0						
	DLA	23	25	35	20	25	25			30	28	30	30	40	30	40					
Grupo C	EA		45	45	40				35	40	30		30	40	45						
	Plast		N.P.						N.P.		25/6	N.P.			25/6	N.P.	40/15	N.P.	25/6	N.P.	25/6
	Laja	25	30	40	25	30	30	25	35	30	35			40							
	Frac	90	75	30	90	75	70	75	30	50	0			0							
	DLA	25	28	35	25	28	35			30	35	4	3	45							
Grupo D	EA	30	35	40	40	35			25	35	30		30	25	35						
	Plast	25/6									40/10	N.P.	25/6	N.P.	40/15	40/10					
	Laja	25	40	50	25	30	40	25						40							
	Frac	75	50	0	60	50	0	75		0				0							
	DLA	25	30	0	35	45	40	35	40	50	40	50	40	50	40	50					

Z = Zahorra, art.501./ M = Macadam, art.502./ SC=Suelo-cemento, art.512./ GC=Grava-cemento, art.513./ GE=Grava-emulsión, art.514./ HC=Hormigón con pactado, art.551./ MB=Mezcla bituminosa, art.541, 542, 543./ MBI=Mezcla bituminosa en capa intermedia./ MBR=Mezcla bituminosa en capa de rodadura./ HM=Hormigón magro, art.516./ HV=Hormigón vibrado, art.550./ TSG=Tratamiento superficial con gravilla, art.533./ TSL=Tratamiento superficial con lechada bituminosa, art.540./ EA=Mínimo Equivalente de Arena, NLT-113./ plast=Máximos Límite Líquido e Índice de Plasticidad, NLT-105 y NLT-106./ laja=Índice de Lajas, NLT-354./ frac=Proporción de partículas con dos o más caras de fractura, NLT-358./ DLA=Coefficiente de Desgaste Los Ángeles, NLT-149.

8.2 MATERIALES BITUMINOSOS

En general podrán emplearse los siguientes materiales bituminosos:

- Mezclas continuas en caliente convencionales: densas, semidensas y gruesas.
- Mezclas abiertas en caliente (A).
- Mezclas drenantes en caliente (P y PA).
- Mezclas de alto módulo¹² (SM).
- Mezclas discontinuas en caliente para capas de pequeño espesor (F y M).
- Mezclas abiertas en frío (AF).
- Gravaemulsiones (GE).
- Tratamientos superficiales con lechada bituminosa (LB).
- Tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla (TS).

¹² Se consideran mezclas de alto módulo aquellas cuyo módulo de Young a 200 C medido de acuerdo con la norma NLT-349 es superior a 12.000 MPa, y cuyo coeficiente e6 medido en ensayo a fatiga a flexotracción según la norma NLT-360 es superior a 100 md.

La distribución de los diversos tipos de mezcla bituminosa en las distintas capas (rodadura, intermedia y base) así como los espesores mínimos a emplear, serán los indicados en la tabla 8.3. Tanto las mezclas drenantes como las discontinuas en capa fina deben colocarse siempre sobre mezclas suficientemente impermeables (tipo D, S o SM) con riegos ricos en ligante residual, y no se deben emplear directamente sobre capas granulares.

Tabla 8.3. Tipo de mezcla bituminosa en calzada

Categoría de tráfico pesado	Tipo (espesor)		
	Rodadura	Intermedia (I) si existe	Base (BB) si existe e interiores
T0, T1, T2	D, S (6 cm)	D, S (≥ 6 cm) SM (≥ 7 cm)	S, G, A (≥ 7 cm) SM (≥ 7 cm)
	F ($\geq 2,5$ cm)	D, S (≥ 6 cm) SM (≥ 7 cm)	
	P, PA (4 cm)	D, S (≥ 6 cm) SM (≥ 7 cm)	
T3A	D, S (≥ 5 cm)	D, S (≥ 5 cm), SM (≥ 7 cm)	S, G (≥ 6 cm)
	F ($\geq 2,5$ cm)	D, S, SM (≥ 7 cm)	
T3B	P, PA (4 cm)	D, S, SM (≥ 7 cm)	S (≥ 6 cm)
	D, S (≥ 5 cm)	D, S (≥ 5 cm)	
	F, M, LB	D, S (≥ 5 cm)	
T4	AF ($\geq 2,5$ cm)+LB	GE (≥ 6 cm)	
	D, S (≥ 4 cm)	S, G, (≥ 4 cm)	
	AF ($\geq 2,5$ cm)	GE (≥ 5 cm)	
	F, M, TS, LB LB	D, S (≥ 4 cm) AF (≥ 4 cm)	

Para capas de rodadura de mezclas bituminosas o tratamientos superficiales, el mínimo valor del Coeficiente de Pulimento Acelerado del árido retenido por el tamiz UNE 2,5 mm, será el indicado en la tabla 8.4, en función de la situación de la mezcla y de la categoría de tráfico prevista.

Tabla 8.4. Coeficiente de pulimento acelerado

Categoría de tráfico	Valor mínimo del Coeficiente de Pulimento Acelerado	
T0, T1, T2A	Calzada	0,50
	Arcén	0,45
T2B, T3A	Calzada	0,45
	Arcén	0,40
T3B y T4	Calzada y Arcén	

El tamaño máximo del árido a utilizar en la mezcla bituminosa se elegirá en función del espesor de la capa (rodadura, intermedia o base), el cual, excepto para mezclas tipo M, debe estar comprendido entre 2,5 y 5 veces el tamaño máximo nominal (primer tamiz de la serie que retiene más del 5%) del huso granulométrico.

8.2.1 LIGANTES PARA MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

La dosificación mínima de ligante hidrocarbonado, en porcentaje del peso total de árido combinado incluido el polvo mineral no será inferior a los valores siguientes¹³:

- 3,8% en capas de base o inferiores tipo G.
- 4,5% en capas intermedias de base o inferiores tipo S.
- 5,2% en capas tipo SM.
- 4,7% en capas de rodadura S o D.
- 4,5% en capas de rodadura drenante.
- 5,0% en capas discontinuas tipo M.
- 5,5% en capas discontinuas tipo F.

Las mezclas convencionales de granulometría continua con ligante modificado serán de tipo S. En rodadura se emplearán con dotación de betún superior al 5,2% y en capas intermedia o de base, con dotación superior al 4,7%.

Los tipos de ligante se elegirán, en función de la situación de la capa en el firme, de la zona térmica y de la categoría de tráfico de proyecto previstas, entre los indicados en la tabla 8.5, teniendo en cuenta que:

- En mezclas bituminosas drenantes no se emplearán los tipos B40/50, BM-1 o BM-2.
- En mezclas bituminosas de alto módulo se empleará betún tipo B13/22 o BM-1.
- En mezclas bituminosas discontinuas, para categoría de tráfico T2 o superior, se empleará betún modificado tipo BM-3b o BM-3c, o bien, betún asfáltico tipo B60/70 con adición de fibras a la mezcla. Para categoría de tráfico T3 o inferior, se podrá también emplear betún asfáltico tipo B60/70 o B80/100.

Tabla 8.5. Tipo de ligante hidrocarbonado para mezclas bituminosas en caliente

Categoría de tráfico	Zona térmica			
	ZT4	ZT3	ZT2	ZT1
En capa de rodadura tipo D o S				
T0, T1 y T2	BM-2, BM-3 (a,b o c)	B60/70, BM-3 (a,b o c)	B60/70, BM-3 (a,b o c)	B60/70, BM-3 (a,b o c)
T3	B60/70	B60/70	B60/70	B80/100
T4	B60/70 y B80/100	B60/70 y B80/100	B60/70 y B80/100	B80/100
En capas inferiores tipo D, S, G o A				
T0, T1 y T2	B40/50, B60/70, BM-2	B40/50, B60/70, BM-2	B40/50, B60/70, BM-2	B40/50, B60/70, BM-2
T3	B60/70	B60/70	B60/70	B80/100
T4	B60/70 y B80/100	B60/70 y B80/100	B60/70 y B80/100	B80/100

8.2.2 LIGANTES PARA MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

La dosificación mínima de ligante bituminoso residual, en peso del árido seco, en mezclas abiertas en frío no será inferior al 3,5%. La dosificación mínima de ligante bituminoso residual, en peso del árido seco, para gravaemulsión, no será inferior al 3% para su utilización en calzada y al 2,5% para su utilización en arcenes.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará los tipos de emulsión bituminosa a emplear, en general una catiónica y otra aniónica, que se elegirán, en función de la situación de la capa en el firme, de la zona térmica y de la categoría de tráfico pesado previstas en esta Instrucción, entre las indicadas en la tabla 8.6.

¹²Estos porcentajes de ligante y todos los que incluyen en este apartado se refieren a áridos con peso específico conjunto de 2,7 t/m³. Para pesos específicos fuera del intervalo 2,65-2,75 t/m³ deben hacerse las correspondientes transformaciones volumétricas.

Tabla 8.6. Tipos de ligantes para mezclas en frío

Situación de la capa	Categoría de tráfico	Zona térmica	
		ZT4	ZT1, ZT2 y ZT3
Mezcla abierta en frío			
Calzada	T3	ECM-md, EAM-md	
	T4	ECM-md, EAM-md	
Arcén	T3, T4	EAM, ECM, ECM-m, EAM-m	
Gravaemulsión			
Calzada	T3B, T4	EAL-2d, ECL-2d, ECL-2-md	EAL-2, ECL-2, ECL-2-m
Arcén	T3, T4	EAL-2, ECL-2	

8.2.3 LIGANTES PARA TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

La dosificación mínima de ligante bituminoso residual, en peso del árido, en lechadas no será inferior al 5% para LB-1, al 6% para LB-2 y al 7% para LB-3. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará los tipos de ligante hidrocarbonado a emplear en función de la zona térmica, y de la categoría de tráfico pesado previstas, de entre los indicados en la tablas 8.7 y 8.8.

Tabla 8.7. Tipos de ligantes para lechadas

Situación de la capa	Categoría de tráfico	Zona térmica	
		ZT4	ZT1, ZT2 y ZT3
Calzada	T3B y T4	EAL-2d, ECL-2d, ECL-2-md	EAL-2, ECL-2, ECL-2-m
Arcén	T2, T3, T4	EAL-2, ECL-2	

Tabla 8.8. Tipos de ligante para pliegos con gravilla

Situación de la capa	Categoría de tráfico	Zona térmica	
		ZT4	ZT1, ZT2 y ZT3
Calzada	T4	EAR-2d, ECR-2d, ECR-3d	B150/200, EAR-2, ECR-2, ECR-3
Arcén	T3, T4	EAR-2d, ECR-2d, ECR-3d	B150/200, EAR-2, ECR-2, ECR-3

Comentario Empleo de los distintos tipos de mezclas bituminosas

Empleo de mezclas bituminosas convencionales en caliente

Si el conjunto de mezclas bituminosas en el firme está compuesto únicamente por capas de mezcla continua convencional en caliente, se utilizarán preferentemente:

- Para tráficos T2 y superiores, mezclas tipo G para la capa inferior y tipo S para las superiores.
- Para tráficos T3 e inferiores, mezclas tipo S en todas las capas.

No es recomendable emplear mezclas tipo G sobre gravacemento u hormigón compactado, pudiéndose sustituir en este caso por mezclas tipo S.

Las mezclas bituminosas en caliente con ligantes modificados se proyectarán preferentemente, tanto en capas de rodadura como de base, para tráficos altos (T2 o superiores) y zonas cliáticas cálidas (especialmente ZT4), así como con otros tráficos, en zonas especialmente sensibles a las roderas (climas cálidos y fuertes pendientes). Además, resulta también adecuada su utilización en firmes en los que sea necesaria una gran resistencia a fatiga de las capas. Las mezclas con betún polietileno no es conveniente emplearlas sobre capas tratadas con cemento.

Debe evitarse la colocación de mezclas muy rígidas (con betunes duros o escasas de betún) sobre soportes muy flexibles (tráficos T3 e inferiores). Por otro lado deben respetarse estrictamente los contenidos mínimos de betún señalados, y especialmente en las rodaduras, para evitar los problemas asociados a los envejecimientos prematuros de estas capas.

Empleo de mezclas bituminosas abiertas en caliente

Se recomienda emplearlas solamente como capas de regularización o como capas drenantes.

Empleo de mezclas bituminosas drenantes

Las mezclas drenantes sólo podrán utilizarse en vías urbanas con IMD superiores a 2.000 vehículos/día en las que haya que reducir el ruido de rodadura, o bien en zonas de pluviometría húmeda. No deben utilizarse en las siguientes circunstancias:

- Tramos situados en zonas con problemas de heladas.
- Tramos en zonas con peligro de colmatación de los huecos de la mezcla (en general, con más de un acceso no pavimentado por kilómetro, o con tráficos agrícolas importantes).
- Tramos en zonas donde a menudo se movilizan sobre el firme grandes esfuerzos de rozamiento (curvas de radio menor de 100 m, abundantes situaciones de aceleración y frenado, giros de vehículos, viales urbanos, etc). Si por circunstancias determinadas se proyectan en estas situaciones, deben utilizarse ligantes especiales.
- Tramos de longitud inferior a 1 km, a menos que sean continuación de otros tramos con mezclas drenantes, o que sean puntos específicos en los que haya que facilitar el drenaje. En cualquier caso, se procurará evitar cambios bruscos en el tipo de firme. Cuando el firme tenga como capa de base un material tratado con cemento.

Empleo de mezclas bituminosas de alto módulo

Las mezclas de alto módulo están previstas para capas de base para firmes de carreteras con tráfico T3 o superiores, y se recomienda proyectar sobre ellas una capa de rodadura de mezcla discontinua en capa fina. Se estudiará su empleo en aquellas zonas en que se precise mantener el nivel de la rasante, en las que se necesiten firmes de menor espesor que los convencionales.

No deben emplearse sobre soportes deformables, y especialmente cuando el tramo discorra sobre suelos tipo inadecuado o marginal, ni sobre capas de firme tratadas con cemento, salvo que el espesor conjunto de la mezcla bituminosa sea superior a 15 cm.

Empleo de mezclas bituminosas discontinuas en capa fina

Las mezclas discontinuas en capa fina son adecuadas en las siguientes situaciones:

- Cuando se quiera disminuir el consumo de áridos de rodadura.
- En zonas con posibles problemas de deslizamiento o cuando se quiera dotar de mayor textura a la capa de rodadura.
- Sobre mezclas de alto módulo o en zonas con previsibles problemas de roderas (climas cálidos con tráficos elevados y/o fuertes pendientes).

Empleo de mezclas bituminosas abiertas en frío

Se prevé su empleo exclusivamente, como capa de rodadura, en firmes con tráfico T3B o inferiores. También pueden utilizarse como capa de rodadura en firmes provisionales para cualquier tipo de tráfico.

Si se utilizan como capa de rodadura es recomendable sellarlas, tras el correspondiente período de curado, mediante la aplicación de un tratamiento superficial o una lechada bituminosa.

Empleo de la gravaemulsión

Entre sus principales campos de aplicación se encuentran los siguientes:

- Capas de base en tráfico T3 o T4, especialmente en zonas alejadas de plantas fijas de mezcla en caliente.
- Aprovechamiento en planta de capas granulares procedentes de antiguos firmes.
- Firmes provisionales (sobre terraplenes que puedan asentar).
- Firmes deformables (especialmente sobre macizos con suelos inadecuados).

La gravaemulsión requiere un período de maduración para alcanzar su rigidez final. Se puede considerar que ha transcurrido ese período cuando el contenido de agua libre en el material sea inferior al 1,5%. En este sentido, debido a su efecto favorecedor, la apertura al tráfico puede ser inmediata tras la compactación. En época favorable (verano) conviene que la capa esté abierta al tráfico, sin la rodadura, aproximadamente una semana, y en época desfavorable (invierno) al menos un mes.

La gravaemulsión es un material diseñado específicamente para actuar como capa de base del firme. Por tanto, en cualquier caso, debe realizarse un revestimiento posterior. Para tráfico T3 pueden emplearse mezclas en caliente, pero es preferible proyectar este firme con rodaduras de mezcla abierta en frío. Para tráfico T4 la rodadura también puede estar constituida por un tratamiento superficial.

Empleo de los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla

Los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla tienen por objeto proporcionar una textura adecuada para la circulación de los vehículos e impermeabilizar el firme, sin que aporten directamente un incremento en la capacidad estructural. Se admiten en calzada exclusivamente para tráfico T4, y en arcenes para tráfico T3 y T4. Pueden colocarse sobre capas granulares, bituminosas o tratadas con cemento. Además de la experiencia existente en la zona pueden tomarse en consideración las siguientes recomendaciones de empleo:

- Riego Monocapa, formado por aplicación de ligante y una extensión de árido. Tiene aplicación en sellados provisionales, generalmente sobre gravaemulsión o materiales tratados con cemento.
- Riego Monocapa Doble Engravillado, formado por una aplicación de ligante y dos extensiones de árido. De aplicación en sellados provisionales de grava-emulsión en zonas sometidas a fuertes esfuerzos transversales.
- Riego Bicapa, formado por dos aplicaciones sucesivas de ligante y árido. Se utiliza en labores de conservación y en sellado definitivo de gravaemulsión.
- Riego Bicapa Sandwich, formado por dos extensiones de árido entre las que se intercala con una aplicación de ligante. De aplicación en operaciones de conservación o en sellados provisionales de grava-emulsión.
- Riego Doble Sandwich, formado por tres extensiones de árido entre las que se intercalan dos aplicaciones de ligante. Se utiliza sobre zahorras artificiales cerradas o macadam sin

recebar como alternativa a los triples tratamientos superficiales, que se consideran preferibles.

- Riego Tricapa, formado por tres aplicaciones sucesivas de ligante y árido. Se utiliza sobre zahorras o macadam. Debe incluirse en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares el barrido de la capa inferior para conseguir un buen agarre.
- Riego de Protección o riego en negro, consistente en un riego ligero de ligante sobre cualquiera de los riegos anteriores, para protegerlos y evitar pérdidas de gravilla.

Empleo de los tratamientos superficiales con lechadas bituminosas

Los tratamientos superficiales con lechadas se utilizan con funciones de sellado sobre mezclas bituminosas o tratamientos superficiales mediante riego con gravilla. Pueden utilizarse también sobre capas bituminosas o tratadas con cemento.

8.3 HORMIGÓN VIBRADO

- Para las categorías de tráfico T0 o T1, se podrán utilizar los tipos de hormigón HP-45 o HP-40.
- Para las categorías de tráfico T3 o T4, se podrán utilizar los tipos de hormigón HP-40 o HP-35.

8.3.1 JUNTAS LONGITUDINALES

Las juntas longitudinales de alabeo se dispondrán donde la anchura de hormigonado sea superior a 5 m, dividiendo el pavimento en franjas aproximadamente iguales, procurando que coincidan con las separaciones entre carriles de circulación y evitando que lo hagan con las rodadas, con una marca vial o con un pasador. Salvo justificación en contrario se ejecutarán por aserrado, con una profundidad de corte no inferior al tercio del espesor de la losa.

Para las categorías de tráfico de proyecto T0 y T1, las juntas longitudinales de alabeo irán provistas de barras de unión corrugadas de 12 mm de diámetro, 80 cm de longitud y espaciadas 1 m, dispuestas transversalmente a la junta y a caballo de ella.

Se dispondrán juntas longitudinales de hormigonado cuando los arcenes sean de hormigón así como cuando el hormigonado se realice por franjas, procurando en este último caso que coincidan con las separaciones entre carriles de circulación, y evitando que lo hagan con las rodadas o con una marca vial. Se dispondrán, transversalmente a la junta y a caballo de ella, barras corrugadas de 12 mm de diámetro, 80 cm de longitud y espaciadas 1 m.

8.3.2 JUNTAS TRANSVERSALES

Las juntas transversales podrán ser de contracción, de hormigonado o de dilatación. Salvo justificación en contrario, las juntas transversales de contracción se realizarán por aserrado en pavimentos de hormigón en masa vibrado, y en fresco o por aserrado en bases de hormigón. La anchura de corte no será superior a 4 mm, y su profundidad no deberá ser inferior al cuarto del espesor de la losa.

Para las categorías de tráfico de proyecto T0 y T1, las juntas transversales de contracción en pavimentos de hormigón vibrado en masa irán provistas de pasadores (a medio espesor de la losa, transversales y simétricos respecto a la junta) con separación variable entre 0,3 m bajo las rodadas del carril de proyecto y 0,6 m en otras zonas o en el carril interior en vías de más de un carril por sentido de circulación. Estas juntas serán perpendiculares al eje de la calzada, e irán separadas entre sí por una distancia entre 4 y 5 m.

Para la categoría de tráfico de proyecto T2, las juntas transversales de contracción en pavimentos de hormigón vibrado en masa podrán ir sin pasadores.

Para las categorías de tráfico de proyecto T3 o T4 o en arcenes las juntas transversales de contracción en pavimentos de hormigón vibrado no llevarán pasadores.

Las juntas transversales de hormigonado en pavimentos de hormigón vibrado en masa se harán coincidir con el emplazamiento de una junta de contracción e irán siempre provistas de pasadores, siendo por ello perpendiculares al eje de la calzada. En pavimentos de hormigón armado continuo se justificará el diseño de estas juntas.

Las juntas serradas se sellarán practicando un cajeado en los mismos, siempre por uno de estos dos procedimientos:

- Introducción de un cordón de polietileno reticulado, sobre el que se colocará un producto de sellado.
- Introducción de un perfil de policloropreno.

Las juntas transversales de dilatación sólo se dispondrán en curvas de radio inferior a 200 m. Se recomienda establecer una junta de dilatación en cada extremo y, si la longitud de la alineación curva fuera superior a 100 m, otra intermedia. Se dispondrán perpendiculares al eje de la calzada, y estarán dotadas de pasadores enfundados en plástico antiadherente y provistos de capuchones rellenos de material compresible; irán selladas, con una anchura de 20 mm y una profundidad mínima de 40 mm.

También se dispondrán juntas transversales de dilatación ante estructuras que no puedan soportar empujes apreciables, o donde pudiera estar especialmente impedido el movimiento de las losas del pavimento. En estos casos se justificará el diseño de dichas juntas.

8.4 HORMIGÓN MAGRO

Sin prescripciones adicionales.

8.5 HORMIGÓN COMPACTADO

Sin prescripciones adicionales.

8.6 SUELOCEMENTO

- Con tráfico T3A y superiores el sueloceemento será del tipo SC-4 y en general, se fabricará en central, salvo que se utilicen equipos adecuados y específicos que garanticen la calidad de la unidad de obra, lo que deberá demostrarse en tramo de prueba.
- Con tráfico T3B e inferiores podrá ser del tipo SC-4 o SC-3, y podrá fabricarse *in situ*.

La resistencia media a compresión, según la Norma NLT-305, cumplirá los valores límites de la tabla 8.9. Se entiende por resistencia media la media aritmética de los resultados obtenidos al menos sobre tres probetas de la misma amasada o sobre las del mismo lote de control de ejecución. Las probetas se compactarán según la Norma NLT-310, con la energía que proporcione la densidad máxima del Proctor Modificado (NLT-108).

Se utilizarán preferentemente cementos tipo II. En el caso de emplearse cementos especiales tipo VI, los valores límites de la resistencia a los siete días (7d) se deducirán de la curva de evolución de resistencias obtenida para la mezcla hecha con la fórmula de trabajo aprobada.

Tabla 8.9. Tipos y características de suelocemento

Capa	Resistencia media a compresión	Contenido de cemento
	(MPa) a 7 Días, Mín/Máx	(% en peso)
Bajo pavimento bituminoso	4,5 / 6,5	3 / 6
Bajo pavimento de hormigón vibrado para tráfico T2 o superiores	8 / -	5 / 6
En arcenes	3,5 / 6,5	3 / 6

8.7 GRAVACIMIENTO

La resistencia media a compresión, según la Norma NLT-305, cumplirá los valores límites de la tabla 8.10. Se entiende por resistencia media a compresión la media aritmética de los resultados obtenidos al menos sobre tres probetas de la misma amasada o sobre las del mismo lote de control de ejecución. Las probetas se compactarán según la Norma NLT-310, con la energía que proporcione la densidad máxima del Proctor Modificado (NLT-108).

Tabla 8.10. Características de la gravacemento

Capa	Resistencia media a la compresión (MPa) a 7 días, Mín/Max	Contenido de cemento (% en peso)
Bajo pavimento bituminoso	4,5 / 6,5	3 / 6
Bajo pavimento de hormigón vibrado para tráfico T2 o superiores	8 / -	5 / 6
En arcenes	3,5 / 6,5	3 / 6

Se utilizarán preferentemente cementos tipo II. En el caso de emplearse cementos especiales tipo VI, los valores límites de la resistencia a los siete días se deducirán de la curva de evolución de resistencias obtenida para la mezcla hecha con la fórmula de trabajo aprobada, de forma que a los 90 días no sea inferior a 5 MPa y no supere los 9 MPa.

8.8 ZAHORRAS

Se realizará el prehumectado en central para las capas de base en calzadas con tráfico T0, T1 y T2, y siempre que por otras causas se realice la homogeneización en central de obra. En otros casos, la obligatoriedad del prehumectado dependerá de la importancia de la vía. La extensión se realizará con extendedora para tráfico T2 o superiores, pudiéndose realizar con motoniveladora para tráfico inferiores.

El control de la capacidad de soporte de la capa terminada se realizará con deflectómetro de impacto. La capacidad de soporte mínima será fijada por el director de las obras basándose en ensayos realizados en tramo de prueba o estudios específicos.

8.9 MACADAM

Sólo se utilizará para tráfico tipo T4. El control de la capacidad de soporte de la capa terminada se realizará preferiblemente con deflectómetro de impacto o mediante el ensayo de carga con placa. La capacidad de soporte mínima será fijada por el Director de las Obras basándose en ensayos realizados en tramo de prueba o estudios específicos.

8.10 RIEGOS DE IMPRIMACIÓN Y DE ADHERENCIA

Sobre la zahorra y, en su caso, macadam, que vaya a recibir una capa de mezcla bituminosa o un tratamiento superficial, deberá previamente efectuarse un riego de imprimación.

Sobre las capas tratadas con cemento que vayan a recibir una capa de mezcla bituminosa, o un tratamiento superficial, deberá previamente efectuarse un riego de adherencia, barriendo enérgicamente antes el riego de curado.

Entre dos capas sucesivas de mezcla bituminosa se ejecutará un riego de adherencia con una dotación de betún residual del orden de 0,3 kg/m², la cual se elevará a 0,4 kg/m² bajo capas de rodadura de microaglomerado y a 0,5 kg/m² bajo capas drenantes.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará los tipos de ligante hidrocarbonado a emplear en función del tipo de riego, que se elegirán de entre los indicados en la tabla 8.11.

Tabla 8.11. Tipos de ligantes para riegos de imprimación y adherencia

Tipo de riego	Ligante
Imprimación	EAL-1, ECL-1, EAI, ECI
Adherencia	EAR-0, ECR-0, EAR-1, ECR-1

8.11 RIEGOS DE CURADO

El suelocemento, gravacemento u hormigón compactado, deberán recibir un riego de curado, a base de un ligante hidrocarbonado con una dotación mínima de betún residual del orden de 0,3 kg/m². Este riego no servirá como riego de adherencia, y deberá ser barrido enérgicamente antes de ser colocado.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará los tipos de ligante hidrocarbonado a emplear de entre los siguientes: EAR-0, ECR-0, EAR-1, ECR-1.

8.12 MATERIALES RECICLADOS EN FRÍO *IN SITU* CON EMULSIÓN BITUMINOSA

Los materiales reciclados en frío *in situ* con emulsión se clasificarán como Tipo I cuando más del 75% del espesor reciclado está formado por material bituminoso, y como Tipo II en caso contrario.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo de emulsión bituminosa a emplear, en general del tipo EAL-2 o ECL-2, pudiendo estar la penetración (25°C; 100 g; 5 s) del residuo por destilación (NLT-139) comprendida en el intervalo 130-330.

La cantidad mínima de ligante bituminoso residual, en peso del árido seco, será del 1,2% para el reciclado tipo I, y del 2,5% para el reciclado tipo II.

El 100% del material fresado pasará por el tamiz de 40 mm, y como mínimo el 75% en peso, por el de 25 mm.

El porcentaje necesario de ligante residual se determinará por medio del ensayo de inmersión-compresión, según la Norma NLT-162. Los valores mínimos de la resistencia a compresión antes de la inmersión y la resistencia conservada serán los indicados en la tabla 8.12, en función de la categoría de tráfico pesado.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares se exigirá la utilización de equipos de compactación con la potencia adecuada. En particular, para tráficos T3 y superiores, deberán exigirse un compactador vibrante de 15 t y uno de neumáticos de 35 t y 7 ruedas.

Tabla 8.12. Resistencias en inmersión-compresión para material reciclado con emulsión

Categoría de tráfico	Valores mínimos de resistencias a compresión según Norma NLT-162, después de 7 días de curado en estufa a 50°C a/b/c donde: a=resistencia en seco MPa; b=resistencia después de inmersión MPa; c= resistencia conservada %	
	Tipo I	Tipo II
T0, T1 y T2	3/2,5/75	1,8/1,5/75
T3	2,5/2/60	1,2/1/60
T4	2/1,5/50	0,9/0,7/50

Las densidad mínima del material compactado se fijará en el tramo de prueba y, en ningún caso, será inferior al 90% de la original en la capa del material que se está reciclando.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares se fijará que el tiempo de espera necesario para el curado de la emulsión previo a la extensión de la capa superior, será el suficiente para que el contenido de humedad en el material reciclado sea inferior al 1,5%.

ANNEJOSS

DEFINICIONES

Arcén. Franja longitudinal afirmada contigua a la calzada, no destinada al uso por vehículos automóviles más que en circunstancias excepcionales.

Base. Capa del firme situada inmediatamente bajo el pavimento. En firmes con pavimentos bituminosos la capa de base es la de mayor capacidad de soporte bajo el pavimento. En firmes flexibles o semirrígidos se considera que existe base bituminosa cuando el espesor de mezcla bituminosa, incluido el pavimento, es igual o superior a 16 cm.

Berma. Franja longitudinal contigua al arcén, si existe, en el borde de la plataforma. Es una zona de seguridad para la circulación y se utiliza para la eventual circulación de peatones y situación de elementos auxiliares de la carretera.

Carril de vehículos lentos. Carril situado a la derecha del o de los carriles principales para la circulación de vehículos lentos y/o pesados, con objeto de mejorar las condiciones de capacidad de la carretera, generalmente en rampas y zonas urbanas.

Calzada. Zona de la carretera destinada a la circulación. Se compone de un cierto número de carriles.

Capacidad de una carretera. Máxima intensidad de vehículos que razonablemente pueden circular por un perfil o segmento uniforme de carril o carretera durante un período de tiempo determinado bajo las condiciones prevalecientes viales, del tráfico y de la regulación.

Capacidad de soporte. Aptitud de un suelo, terraplén, desmonte o capa de firme para soportar las cargas de tráfico con deformaciones volumétricas, tensiones y alterabilidad climática dentro de unos límites fijados experimental o analíticamente.

Capas de Asiento. Capa o capas de aportación formadas por suelos o materiales granulares, tratados o no con conglomerantes, situadas bajo el plano de explanada con el fin de mejorar alguna de las cualidades del cimientado.

Carril de proyecto. Carril de la calzada para el que se dimensiona el firme, el cual soporta las mayores cargas de tráfico, es decir, para el que se prevé un mayor tráfico de proyecto.

Carril. Subdivisión o banda de la calzada que permite la circulación de una fila de vehículos, generalmente delimitada por líneas de marcas viales o balizas.

Cimiento del Firme. Conjunto de capas de suelos u otros materiales que se encuentran bajo el plano de explanada y comprende las capas de asiento y el terraplén o el terreno natural subyacente.

Coefficiente de equivalencia. Número de ejes tipo a que equivale un conjunto de ejes de un vehículo cualquiera, a efectos de dimensionamiento de la estructura del firme.

Colapsabilidad de un suelo. Característica de algunos suelos por la cual son susceptibles de sufrir un asiento adicional cuando estando sometidos a cierta presión, y con el asiento estabilizado, se inundan bruscamente. Para que se produzca el colapso el grado de saturación debe ser inferior a un valor crítico.

Desmonte. Excavación por debajo de la cota del nivel natural del terreno para realizar la explanación de una carretera.

Drenaje. Conjunto de dispositivos destinados a permitir la evacuación fuera de la carretera de las aguas profundas e infiltradas.

Estructura del Firme. Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados colocado sobre el cimientado del firme, que sirven para soportar las cargas del tráfico y permitir la circulación en condiciones de seguridad y comodidad. Constituye la estructura resistente de la calzada o arcén y comprende en general, de abajo arriba, las capas de subbase, base y pavimento.

Explanación. Superficie superior de la coronación de terraplenes y la inferior de los desmontes. También, ejecución de las operaciones necesarias para conseguir dicha superficie.

Firme flexible. Firme constituido por capas granulares no tratadas, con pavimentos bituminosos (de espesor no superior a 15 cm). También puede considerarse como flexible, un firme con un espesor mayor de mezclas bituminosas y/o capas inferiores tratadas con conglomerantes hidráulicos, siempre que el estado de estas capas no permita que puedan resistir fundamentalmente por flexión.

Firme rígido. Firme con pavimento de hormigón.

Firme semirrígido. Firme constituido por una base tratada con conglomerantes hidráulicos y un pavimento bituminoso. También puede considerarse como semirrígido, un firme con un espesor total de mezclas bituminosas superior a 15 cm sobre capas granulares no tratadas, siempre que su comportamiento no sea flexible, es decir, cuando resista fundamentalmente por flexión.

Intensidad de tráfico. Número de vehículos que pasan por una sección transversal dada de una vía o carretera o carril en la unidad de tiempo.

Módulo de compresibilidad. Valor obtenido en el ensayo de carga con placa y que se define, para el ciclo de carga i , mediante la siguiente expresión: $E_i = D \times (P_i / S_i)$, siendo D el diámetro de la placa de carga; P la diferencia de presión transmitida por la placa entre dos escalones de carga y S la diferencia de asientos al aplicar P . Se puede considerar que el módulo de compresibilidad está relacionado con el módulo de Young mediante un factor de 0,75 ($E = 0,75 \times E_i$).

Módulo de Young. Relación entre la tensión aplicada y la deformación unitaria. Es un término general que se aplica a todos los materiales aunque no sean propiamente elásticos, es decir, aunque no haya proporcionalidad entre tensiones y deformaciones unitarias.

Módulo de Young equivalente. Representa el módulo de Young conjunto de un terreno formado por distintos suelos. En el ensayo de carga con placa se obtiene la misma deflexión superficial sobre este macizo que sobre un macizo semiindefinido de Boussinesq que tenga por módulo elástico dicho módulo equivalente.

Nivelación. Operación que consiste en tomar las cotas de los puntos de una superficie dada con relación a un plano de referencia.

Núcleo de terraplén. Suelo o conjunto de suelos comprendidos entre el nivel del terreno natural y las capas de asiento. Está formado por suelos de aportación cuya función principal es la de elevar la coronación del cimientado hasta la cota del plano de explanada.

Obra de paso. Construcción que salva una discontinuidad en un trazado de carreteras para conseguir el paso de ésta sobre un cauce, camino, conducción, etc.

Pavimento. Parte superior de un firme que debe resistir los esfuerzos producidos por la circulación, proporcionando a ésta una superficie de rodadura cómoda y segura.

Período de proyecto. Período de tiempo durante el cual se estima permanecerá la estructura del firme en estado de servicio.

Plano de Explanada. Constituye la superficie superior del cimiento del firme sobre la que se asienta el mismo, no perteneciente a una obra de fábrica o estructura.

Plataforma. Zona de la carretera ocupada por la calzada, arcenes y bermas adyacentes.

Proyecto. Conjunto de documentos que reúne todos los datos necesarios para construir una obra.

Replanteo. Traslado y localización sobre el terreno de los diferentes puntos característicos del proyecto, definidos por sus coordenadas, con el fin de fijar la situación de la obra de forma que ésta pueda construirse en planta y alzado.

Sección a media ladera. Aquella en que parte del plano de explanada corta al terreno natural.

Sección en desmonte. La que corresponde a un cimiento del firme cuyo plano de explanada está situado bajo el terreno natural.

Sección en terraplén o pedraplén. La que corresponde a un cimiento del firme cuyo plano de explanada está situado sobre el terreno natural.

Subbase. Capa del firme situada inmediatamente bajo la base y por encima del plano de explanada. Puede no existir o estar compuesta de varias capas.

Subtramos de terreno natural subyacente. Cada uno de las partes en que queda dividido el terreno natural subyacente en base a los tipos de suelos que lo constituyen. En general, tendrán una longitud mínima de 500 m, a excepción de desmontes y terraplenes de más de 5 m de altura y puntos singulares que pudieran tener longitudes inferiores.

Suelo granular. Suelo constituido por arenas y gravas en su mayor parte.

Suelo. Formación natural de estructura blanda, resultado de la alteración de las rocas o de la evolución de las sustancias vegetales.

Terraplén. Relleno formado por extensión y compactación de suelos por encima del terreno natural con el que se constituye el cimiento del firme. Está constituido por el núcleo del terraplén y por las capas de asiento.

Terreno natural. El existente bajo la capa vegetal.

Terreno natural subyacente. Conjunto de suelos u otros materiales que se encuentran bajo la superficie de desmonte o núcleo de terraplén o pedraplén.

Tongada. Capa de un determinado espesor, constante o variable, colocada sobre una superficie regular.

Tráfico de proyecto (TE). Es el número acumulado de ejes equivalentes de 13 t en el carril de proyecto y durante el período de proyecto.

Tramo llano. Toda combinación de pendientes y alineaciones, horizontales y verticales, que permite a los vehículos pesados mantener al menos una velocidad media de 80 km/h o aproximadamente la misma velocidad que la de los vehículos ligeros; estos tramos incluyen en general pequeñas rampas no superiores al 1 ó 2 %.

Tramo montañoso. Toda combinación de pendientes y trazado, tanto horizontal como vertical, que obliga a los conductores de vehículos pesados a circular a velocidad sostenida en rampa a lo largo de distancias considerables o a intervalos frecuentes.

Tramo ondulado. Toda combinación de pendientes y trazado, tanto horizontal como vertical, que obliga a los conductores de vehículos pesados a circular a una velocidad media menor de 80 Km/h o sustancialmente inferior a la de los vehículos ligeros, aunque sin llegar a su velocidad sostenida en rampa durante ningún período significativo de tiempo.

Tramo. Longitud de vía o carretera entre dos secciones transversales de su trazado.

Tramos de proyecto. Cada una de las partes en que queda dividida la longitud de la vía o carretera, y que se caracterizan por unos factores de diseño homogéneos.

Vehículo pesado. Se incluyen en esta denominación los camiones de carga útil superior a 3 t, de más de 4 ruedas y sin remolque; los camiones con uno o varios remolques; los vehículos articulados y los vehículos especiales; y los vehículos dedicados al transporte de personas con más de 9 plazas.

Velocidad máxima legal. Máxima velocidad de circulación, fijada por la legislación vigente o por la autoridad competente, a la que se permite circular un vehículo por una carretera o tramo de carretera.

Velocidad sostenida en rampa. Máxima velocidad sostenida que los vehículos pesados pueden mantener en una rampa larga de una pendiente dada.

Zahorra. Es el material formado por áridos, cuya granulometría es de tipo continuo.

Zona de dominio público. Zona de terreno en la que se encuentra la vía o carretera y que pertenece a la administración titular de ésta.

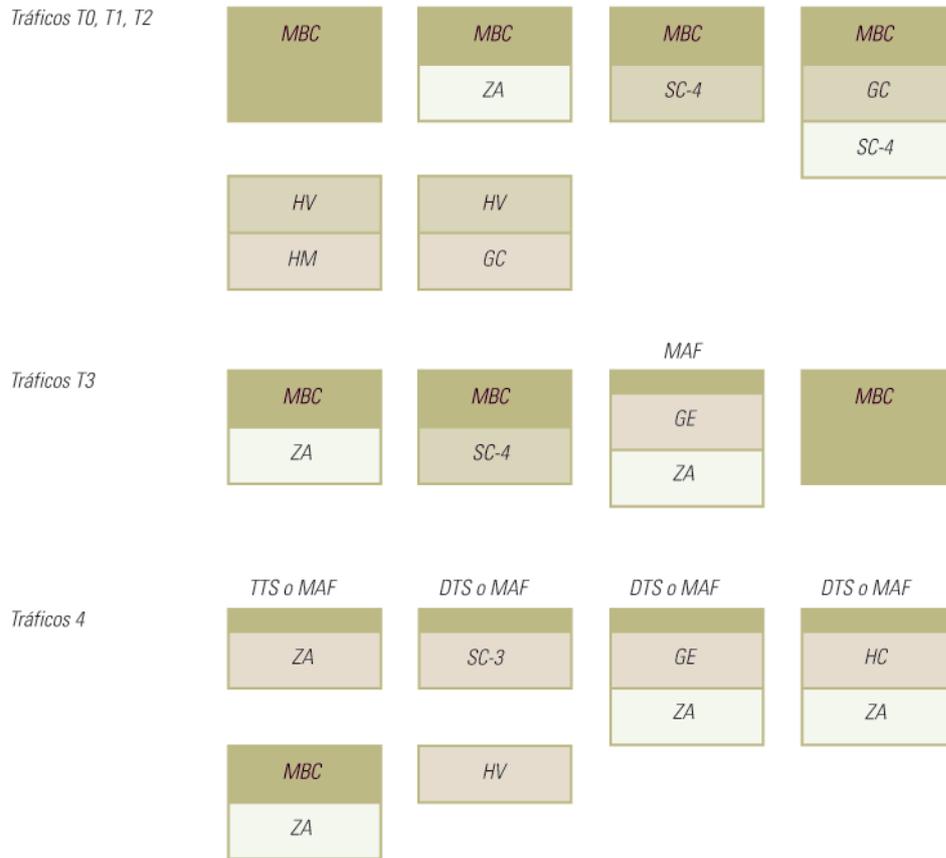
En este anejo se presentan algunas de las producciones medias anuales agrarias en Andalucía para el cálculo de la Intensidad Media Diaria en carreteras de zonas agrícolas. Estos datos se podrán usar a falta de otros más precisos de la zona en cuestión, teniendo en cuenta que se trata de valores medios estimados.

Tabla 1. Producciones medias de los principales cultivos de Andalucía

Cultivos	Producción media (Kg/Ha)	Cultivos	Producción media (Kg/Ha)	Cultivos	Producción media (Kg/Ha)
Acelga	60.000	Col-repollo	2.500	Olivo en regadío	(almanzara) 5.000
Aguacate	8.000	Chirimoyo	18.000	Olivo en secano	(almanzara) 3.000
Ajo en regadío	25.000	Espárrago blanco	(año 2) 1.500 (años 3-9) 9.500	Olivo por goteo	(verdeo) 8.000
Ajo en secano	6.000	Espárrago verde	(año 2) 1.000 (años 3-9) 6.500	Palmera datilera	(palma) 6.000 (dátí) 20.000
Albaricoque	28.000	Espinaca	15.000		Pepino 45.000
Algodón regadío al aire libre	3.200	Fresa y fresón	40.000	Pimiento	(bola) 6.200 (plaza) 32.000
Algodón regadío bajo plástico	3.800	Garbanzo	550 (paja) 550	Remolacha azucarera en regadío	45.000
Algodón en secano	950	Girasol regadío	2.300	Remolacha azucarera por aspersión riego	60.000
Almendo en regadío	2.400	Girasol secano	750	Remolacha azucarera secano	35.000
Almendo en secano	1.200	Granado	15.000	Remolacha de mesa	35.000
Altramuz	1.700	Haba seca	2.000	Sandía regadío	25.000
Arroz	7.000	Haba para verdeo	15.000	Sandía secano	9.000
Avena	(grano) 1.500 (paja) 1.500	Higuera	(brevas) 8.000 (higos) 18.000	Soja	3.500
Batata, boniato	45.000	Judía seca	(alubias) 2.100 (paja) 3.500	Sorgo para forraje	40.000
Berenjena	25.000	Judía verde	20.000	Sorgo para grano	6.000
Cacahuete	2.500	Lechuga	35.000	Tabaco	4.300
Calabacín	40.000	Limonero	30.000	Tomate ind.	50.000
Cártamo	1.200	Maiz para grano	11.000	Tomate plaza	80.000
Cebada	(grano) 2.000 (paja) 3.000	Mandarino	10.000 15.000	Trigo regadío	(grano) 4.500 (paja) 5.000
Cebolla	60.000	Melocotonero	18.000	Trigo secano	(grano) 2.500 (paja) 3.500
Cebollino	80.000	Melón secano	6.500	Veza	(heno) 3.600 (grano) 900
Centeno	(grano) 1.500 (paja) 1.700	Membrillero	30.000	Vid uva mesa	14.000
Ciruelo	28.000	Naranja	35.000	Zanahoria	60.000
Coliflor	12.000	Níspero	20.000		

En este anejo se presentan algunos de los tipos más frecuentes de secciones para estructuras de firme. Con ello se pretende orientar al proyectista sobre las disposiciones de capas cuyo comportamiento está contrastado por la experiencia.

Tipos de secciones para la estructura del firme



MBC: Mezcla bituminosa en caliente; ZA: Zahorra artificial; SC-4: Suelocemento tipo SC-4; GC: Gravacemento; HV: Hormigón vibrado; HM: Hormigón magro; MAF: Mezcla abierta en frío; GE: Gravaemulsión; SC-3: Suelocemento tipo SC-3; TTS: Triple tratamiento superficial; DTS: Doble tratamiento superficial; HC: Hormigón compactado.

Para poder evaluar los costes de las operaciones ordinarias de conservación de firmes, de las rehabilitaciones superficiales o estructurales a lo largo del período de análisis y de reconstrucción al final de la vida de servicio, es necesario definir unos escenarios de conservación. En principio, pueden usarse los modelos expuestos en las tablas o bien, realizar un estudio particular en función del tipo de sección de que se trate. Los porcentajes se refieren a las reparaciones necesarias expresadas como porcentaje del coste inicial de las capas de firme.

Tabla 1. Escenarios de conservación en firmes con capas granulares y mezclas bituminosas

Años	Tráfico T0	T1	T2	T-3	T4
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	1%	1%	1%	-	-
5	1%	1%	1%	0,7%	-
6	1%	1%	1%	0,7%	-
7	Micro+1%	Micro + 1%	1%	0,7%	0,5%
8	1%	1%	1%	0,7%	-
9	1%	1%	Lechada + 1%	Lechada + 0,7%	-
10	1%	1%	1%	0,7%	TS
11	1%	1%	1%	0,7%	-
12	10 cm MB	5 cm MB	1%	0,7%	-
13	-	-	5 cm MB	5 cm MB	-
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	0,5%
16	1%	1%	-	-	-
17	1%	1%	1%	0,7%	-
18	1%	1%	1%	0,7%	-
19	Lechada	Lechada	Lechada	Lechada	-
20	1%	1%	1%	0,7%	-
21	Fresado y repos. 25 cm + 5 cm MB	Fresado y repos. 20 cm + 5 cm MB	Fresado y repos. 15 cm + 5 cm MB	Fresado y repos 10 cm + 5 cm MB	10 cm MB
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	1%	1%	1%	-	-
26	1%	1%	1%	0,7%	-
27	1%	1%	1%	0,7%	-
28	Micro + 1%	1%	1%	0,7%	0,5%
29	1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
30	1%	1%	1%	0,7%	-

Micro: Mezcla bituminosa en caliente en capa fina. MB: Mezcla bituminosa en caliente.

Tabla 2.

Escenarios de conservación en firmes con suelocemento y mezclas bituminosas

Años	Tráfico T0	T1	T2	T3	T4
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	1%	1%	1%	-	-
7	Micro+1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
8	1%	1%	1%	0,7%	-
9	1%	1%	Lechada + 1%	Lechada + 0,7%	0,5%
10	1%	1%	1%	0,7%	TS
11	1%	1%	1%	0,7%	-
12	10 cm MB	5 cm MB	1%	0,7%	-
13	-	-	5 cm MB	5 cm MB	-
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
16	1%	1%	-	-	-
17	1%	1%	1%	-	-
18	1%	1%	1%	0,7%	0,5%
19	Lechada	Lechada	Lechada	Lechada	-
20	1%	1%	1%	0,7%	-
21	Fresado y repos. 25 cm + 5 cm MB	Fresado y repos. 20 cm + 5 cm MB	Fresado y repos. 15 cm + 5 cm MB	Fresado y rep 10 cm + 5 cm MB	10 cm MB
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	1%	1%	1%	0,7%	-
26	1%	1%	1%	0,7%	-
27	1%	1%	1%	0,7%	0,5%
28	Micro + 1%	1%	1%	0,7%	-
29	1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
30	1%	1%	1%	0,7%	-

Micro: Mezcla bituminosa en caliente en capa fina. MB: Mezcla bituminosa en caliente.

Tabla 3. Escenarios de conservación en firmes con gravacemento y mezclas bituminosas

Años	Tráfico T0	T1	T2	T.3	T4
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	S(10%)	S(10%)	S(10%)	-	-
6	1%	1%	1%	-	-
7	Micro+1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
8	1%	1%	1%	0,7%	-
9	1%	1%	Lechada + 1%	Lechada + 0,7%	0,5%
10	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	0,7%	TS
11	1%	1%	1%	0,7%	-
12	10 cm MB	5 cm MB	1%	0,7%	-
13	-	-	5 cm MB	5 cm MB	-
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
16	1%	1%	-	-	-
17	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	-	-
18	1%	1%	1%	0,7%	0,5%
19	Lechada	Lechada	Lechada	Lechada	-
20	1%	1%	1%	0,7%	-
21	Fresado y repos. 15 cm + 8 cm MB	Fresado y repos. 15 cm + 8 cm MB	Fresado y repos. 12 cm + 5 cm MB	Fresado y rep 10 cm + 5 cm MB	10 cm MB
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-
25	1%	1%	1%	0,7%	-
26	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	0,7%	-
27	1%	1%	1%	0,7%	0,5%
28	Micro + 1%	1%	1%	0,7%	-
29	1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
30	15	1%	1%	0,7%	-

Micro: Mezcla bituminosa en caliente en capa fina. MB: Mezcla bituminosa en caliente. TS: Tratamiento superficial. S(%). Sellado del porcentaje % de las grietas aparecidas en superficie, suponiendo que en secciones con gravecemento o suelocemento aparecen cada 7 m, y en secciones con hormigón compactado cada 4 m. J(%): Sellado del porcentaje % de juntas a resellar.

Tabla 4.

Escenarios de conservación de firmes con hormigón compactado y mezclas bituminosas

Años	Tráfico T0	T1	T2	T3	T4
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	S(10%)	S(10%)	S(10%)	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	-	-
7	Micro+1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
8	1%	1%	1%	0,7%	-
9	1%	1%	Lechada + 1%	Lechada + 0,7%	0,5%
10	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	0,7%	TS
11	1%	1%	1%	0,7%	-
12	10 cm MB	5 cm MB	1%	0,7%	-
13	-	-	5 cm MB	5 cm MB	-
14	-	-	-	-	-
15	S(10%)	S(10%)	S(10%)	-	-
16	1%	1%	-	-	-
17	1%	1%	1%	-	-
18	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	0,7%	0,5%
19	Lechada	Lechada	Lechada	Lechada	-
20	1%	1%	1%	0,7%	-
21	Fresado y repos.1 2 cm + 10 cm MB	Fresado y repos. 12 cm + 10 cm MB	Fresado y repos. 10 cm + 8 cm MB	Fresado y rep 5 cm + 5 cm MB	10 cm MB
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	S(10%)	S(10%)	S(10%)	-	-
25	1%	1%	1%	0,7%	-
26	1%	1%	1%	0,7%	-
27	S(10%)+1%	S(10%)+1%	S(10%)+1%	0,7%	0,5%
28	Micro + 1%	1%	1%	0,7%	-
29	1%	Micro + 1%	1%	0,7%	-
30	1%	1%	1%	0,7%	-

Micro: Mezcla bituminosa en caliente en capa fina. MB: Mezcla bituminosa en caliente. TS: Tratamiento superficial. S(%): Sellado del porcentaje % de las grietas aparecidas en superficie, suponiendo que en secciones con gravecimiento o suelocemento aparecen cada 7 m, y en secciones con hormigón compactado cada 4 m.

J(%): Sellado del porcentaje % de juntas a resellar.

Tabla 5. Escenarios de conservación en firmes con pavimento de hormigón en masa con juntas
(se suponen T0, T1 con pasadores y T2, T3 y T4 sin pasadores)

Años	T0	T1	T2	T3	T4
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	J (20%)	J (20%)	J (20%)		-
8	J (20%)	J (20%)	J (20%)		-
9	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%		-
10	J (20%)	J (20%)	J (20%)+0,5%	0,5%	-
11	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	-	-
12	J (20%)	J (20%)	J (20%)	0,5%	-
13	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	-	-
14	J (20%)	J (20%)	J (20%)	0,5%	-
15	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	-	-
16	J (20%)	J (20%)	J (20%)	0,5 %	-
17	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	J (20%)+0,5%	-	-
18	J (20%)	J (20%)	J (20%)	0,5%	0,5%
19	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	-
20	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	0,5%	-
21	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	0,5%
22	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	0,5%	-
23	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	-
24	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	0,5%	0,5%
25	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	-
26	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	0,5%	-
27	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	0,5%
28	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	0,5 %	-
29	J (20%)+1%	J (20%)+1%	J (20%)+1%	-	-
30	15 cm MB	15 cm MB	10 cm MB	5 cm MB	5 cm MB

Micro: Mezcla bituminosa en caliente en capa fina. MB: Mezcla bituminosa en caliente. TS: Tratamiento superficial. S(%): Sellado del porcentaje % de las grietas aparecidas en superficie, suponiendo que en secciones con gravecimiento o suelocemento aparecen cada 7 m, y en secciones con hormigón compactado cada 4 m. J(%): Sellado del porcentaje % de juntas a resellar.

El objeto de este anejo es la resolución de un ejemplo práctico de cálculo del tráfico de proyecto de un tramo de carretera según el procedimiento expuesto en el capítulo 3 de la Instrucción.

DATOS DE PROYECTO

Se desea calcular el tráfico de proyecto de un tramo de carretera que discurre en una zona de orografía ondulada, en la cual se realizaron, en el año 1996, aforos de tráfico mediante el sistema de pesaje con básculas dinámicas portátiles. El tramo es de calzada única, dos carriles y doble sentido de circulación. El carril es de 3 m y los arcenes de 0,8 m. Se tomará como período de proyecto 20 años. Supóngase que el año de redacción del proyecto es 1998.

La información obtenida a partir de los aforos del año 1996 es la siguiente:

ESTACIÓN 14
POBLACIÓN XXX
CARRETERA AB, P.K. (Campaña enero/96)

Volumen diario en la carretera:	580 vehículos
Porcentaje de vehículos pesados en la carretera:	35 %
Distribución de vehículos pesados por carril:	
Carril 1, sentido A:	50 %
Carril 2, sentido B:	50 %
Análisis de las siluetas de los vehículos pesados:	
Ejes simples pesados:	505 ejes
Ejes dobles pesados:	103 ejes
Ejes triples pesados:	67 ejes
Espectros de distribución de ejes por intervalos de carga (figs. 1 y 2).	

RESOLUCIÓN DEL SUPUESTO

Según se establece en el apartado 3.1.1 el Tráfico de Proyecto (TE) debe definirse mediante el par de valores dado por el número de ejes equivalentes acumulados durante el período de proyecto y la categoría del tráfico. El número de ejes acumulados viene dado por la expresión siguiente:

$$TE = IMD_{PA} \times CE \times 365 \times F \times g_t$$

Para la resolución de este ejemplo se calcularán los valores de los distintos parámetros que determinan el valor final del tráfico de proyecto. Según se establece en el apartado 2.2.4, el coeficiente de seguridad, γ_t , puede o no existir, y su valor se elegirá en función de la categoría del tráfico de proyecto.

Cálculo del valor de IMD_{PA}

Según se define en la instrucción, para calcular la IMD_{PA} se deben seguir varios pasos actualizando los valores de la IMD desde la fecha de realización del estudio específico hasta la de puesta en servicio del tramo (tabla 1).

Tabla 1. Resumen de IMD y fechas

Símbolo	Descripción fecha	Año
IMD	Año de aforo	1996
IMD _P	Año de aforo	1996
IMD _{PB}	Año de redacción del proyecto	1998
IMD _{PA}	Año de apertura al tráfico	2001

IMD : Intensidad Media Diaria de vehículos del tramo considerado en el año de realización del aforo (1996). El volumen diario de vehículos obtenido del aforo se corrige a partir de los datos de la estación permanente de control hallando finalmente el valor estimado de la IMD. De la estación permanente se han obtenido los siguientes datos:

$$S = 0,981$$

$$IMD = 922$$

$$IMD \text{ (enero)} = 602$$

Por tanto,

$$IMD \text{ (1996)} = 580 \times 0,981 \cdot (922/602) = 871 \text{ vehículos}$$

% VP : Porcentaje de vehículos pesados, respecto al número total de vehículos. En el presente caso, % VP=35.

% VPC : Porcentaje de vehículos pesados en el carril de proyecto, respecto al número total de vehículos pesados en la calzada. En el presente caso, % VPC = 50.

IMD_P : Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto del tramo considerado en el año de realización del aforo (1996).

$$IMD_P \text{ (1996)} = \% VP \times \% VPC \times IMD \text{ (1996)} = 0,35 \times 0,50 \times 871 = 152 \text{ vehículos}$$

IMD_{PB} : Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto del tramo considerado en el año de redacción del proyecto (1998).

En este caso, los aforos se han realizado en 1996 y el proyecto se redacta en 1998. A falta de otros datos se puede suponer que la tasa de crecimiento del tráfico de vehículos pesados durante estos dos años es del 4%, es decir,

$$IMD_{PB} \text{ (1998)} = IMD_P \text{ (1996)} \times (1 + 0,04)^2 = 152 \times 1,0816 = 165 \text{ vehículos}$$

IMD_{PA} : Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto considerado, en el año de apertura al tráfico. Como no se dan datos acerca de la fecha de puesta en servicio del tramo, según la Instrucción se podrá suponer que transcurren 3 años desde la redacción del proyecto. Suponiendo una tasa anual de crecimiento del tráfico de vehículos pesados constante del 4%, el valor de IMD_{PA} se puede hallar aplicando la siguiente fórmula:

$$IMD_{PA} \text{ (2001)} = IMD_{PB} \text{ (1998)} \times (1 + 0,04)^3 = 165 \times 1,12 = 185 \text{ vehículos}$$

Cálculo del valor de CE

En este caso, al disponer de datos de campañas de pesaje, el valor del coeficiente de equivalencia de vehículos pesados en número de aplicaciones del eje tipo de 13 t se obtendrá de la distribución de cargas por eje.

Figura 1. Distribución de ejes por intervalos de cargas (simple/tandem)

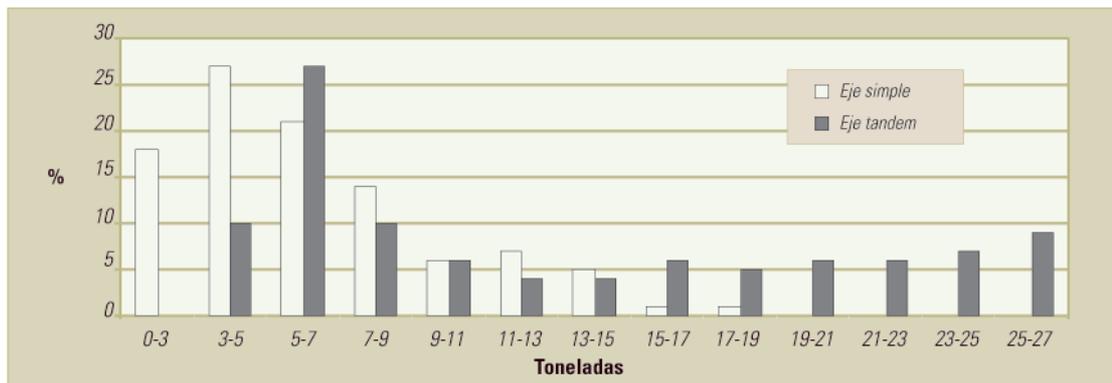
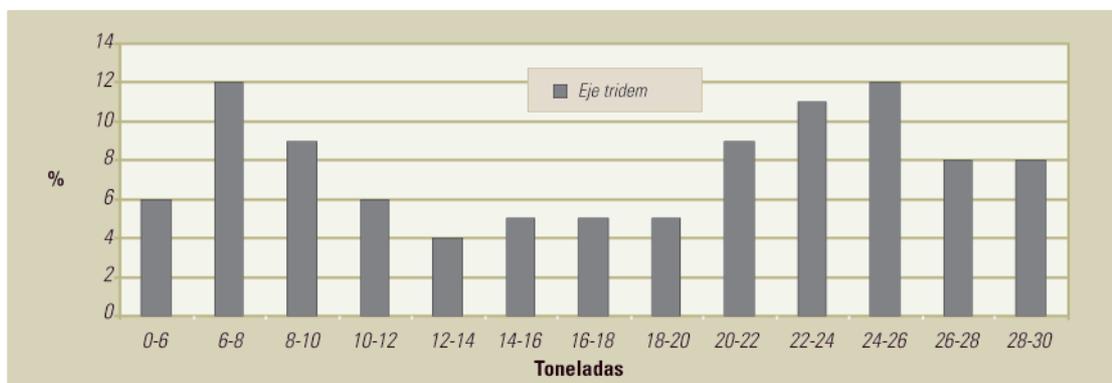


Figura 2. Distribución de ejes por intervalos de carga (Tridem)



A partir de los espectros de distribución de ejes por intervalos de carga (figs. 1 y 2), se construye la tabla 2. Conociendo ya la distribución de los diferentes valores de carga sobre el total de ejes, hay que establecer esa distribución sobre el total de vehículos. Para ello basta con aplicar a la tabla 2 el número de ejes de cada tipo que se consideran sobre 100 vehículos pesados (tabla 3). Es decir, según los datos se tendrá:

Intensidad Media Diaria de vehículos pesados en la carretera en el año del aforo:

$$871 \text{ veh.} \times 0,35 = 305 \text{ vehs. pesados.}$$

Luego:

$$505/305 = 166 \text{ ejes simples por cada 100 vehs. pesados}$$

$$103/305 = 34 \text{ ejes tándem por cada 100 vehs. pesados}$$

$$67/305 = 22 \text{ ejes trídem por cada 100 vehs. pesados}$$

Tabla 2. Distribución media de cargas por tipo de eje

Distribución porcentual				
Carga por eje (t)	Eje simple	Eje tandem	Carga por eje (t)	Eje tridem
A	B	C	D	E
0-3	18	0	0-6	6
3-5	27	10	6-8	12
5-7	21	27	8-10	9
7-9	14	10	10-12	6
9-11	6	6	12-14	4
11-13	7	4	14-16	5
13-15	5	4	16-18	5
15-17	1	6	18-20	5
17-19	1	5	20-22	9
19-21	0	6	22-24	11
21-23	0	6	24-26	12
23-25	0	7	26-28	8
25-27	0	9	28-30	8
SUMA:	100	100	SUMA:	100

Tabla 3. Distribución de cargas por eje en 100 vehículos pesados

Distribución porcentual				
Carga por eje (t)	Eje simple	Eje tandem	Carga por eje (t)	Eje tridem
A	F=166x B/100	G=34x C/100	D	H=22x E/100
0-3	29,88	0,00	0-6	1,32
3-5	44,82	3,40	6-8	2,64
5-7	34,86	9,18	8-10	1,98
7-9	23,24	3,40	10-12	1,32
9-11	9,96	2,04	12-14	0,88
11-13	11,62	1,36	14-16	1,10
13-15	8,30	1,36	16-18	1,10
15-17	1,66	2,04	18-20	1,10
17-19	1,66	1,70	20-22	1,98
19-21	0,00	2,04	22-24	2,42
21-23	0,00	2,04	24-26	2,64
23-25	0,00	2,38	26-28	1,76
25-27	0,00	3,06	28-30	1,76
SUMA :	166	34	SUMA :	22

La aplicación al ejemplo planteado se recoge en las tablas 4 y 5. En la parte superior de cada columna se muestran mediante expresiones alfanuméricas las operaciones realizadas. Para el cálculo de los coeficientes de equivalencia se han utilizado los valores medios de las cargas por eje en cada intervalo. Entonces, de acuerdo con estas tablas, el paso de un vehículo pesado equivale como media al paso del número de ejes de 13 t. que se indica a continuación para cada hipótesis:

Firme flexible: $CE = (38,32+15,57+6,65)/100 = 0,60$

Firme semirrígido: $CE = (54,08+22,56+4,28)/100 = 0,81$

Tabla 4. Equivalencia en ejes simples de 13 t para firme flexible ($\alpha=4$)

Eje simple (Neumático doble normal; suspensión tradicional)			Ejes tandem (Neumático doble normal; suspensión tradicional)		Ejes tridem (Neumático doble normal; uspensión tradicional)		
Carga por eje (t)	Coef. de equivalencia (P/13) ^a	Nº de ejes equivalentes de 13 t.	Coef. de equivalencia {0,6.(P/13)} ^a	Nº de ejes equivalentes DE 13 t.	Carga por eje (t)	Coef. de equivalencia {0,45.(P/13)} ^a K	Nº de ejes equivalentes de 13 t.
A	I	I. F	J	J. G	D	k	K. H
0-3	0,000177252	0,005296296	2,29719E-05	0	0-6	0,000116295	0,00015351
3-5	0,008963272	0,401733833	0,00116164	0,003949576	6-8	0,003447218	0,009100657
5-7	0,045376562	1,581826967	0,005880802	0,053985767	8-10	0,009419908	0,018651419
7-9	0,143412346	3,33290291	0,01858624	0,063193216	10-12	0,02102071	0,027747338
9-11	0,350127797	3,487272855	0,045376562	0,092568187	12-14	0,04100625	0,0360855
11-13	0,726024999	8,43641049	0,09409284	0,127966262	14-16	0,072684479	0,079952927
13-15	1,345050944	11,16392283	0,174318602	0,237073299	16-18	0,119914674	0,131906141
15-17	2,294597528	3,809031897	0,29737984	0,606654873	18-20	0,187107437	0,205818181
17-19	3,675501558	6,101332586	0,476345002	0,809786503	20-22	0,279224695	0,552864896
19-21	5,602044746	0	0,726024999	1,481090998	22-24	0,4017797	0,972306874
21-23	8,201953713	0	1,062973201	2,16846533	24-26	0,56083703	1,480609758
23-25	11,61639999	0	1,505485438	3,583055343	26-28	0,763012587	1,342902154
25-27	16	0	2,0736	6,345216	28-30	1,015473601	1,787233537
SUMA :		38,32	SUMA :	15,57	SUMA :		6,65

Tabla 5. Equivalencia en ejes simples de 13 t para firme semirrígido ($\alpha=8$)

Eje simple (Neumático doble normal; suspensión tradicional)			Ejes tandem (Neumático doble normal; suspensión tradicional)		Ejes tridem (Neumático doble normal; uspensión tradicional)		
Carga por eje (t)	Coef. de equivalencia (P/13) ^a	Nº de ejes equivalentes de 13 t.	Coef. de equivalencia {0,6.(P/13)} ^a	Nº de ejes equivalentes DE 13 t.	Carga por eje (t)	Coef. de equivalencia {0,45.(P/13)} ^a K	Nº de ejes equivalentes de 13 t.
A	I	I. F	J	J. G	D	k	K. H
0-3	3,14183E-08	9,3878E-07	5,27707E-10	0	0-6	1,35246E-08	1,78524E-08
3-5	8,03402E-05	0,003600849	1,34941E-06	4,58799E-06	6-8	1,18833E-05	3,1372E-05
5-7	0,002059032	0,07177787	3,45838E-05	0,00031748	8-10	8,87347E-05	0,000175695
7-9	0,020567101	0,477979424	0,000345448	0,001174524	10-12	0,00044187	0,000583269
9-11	0,122589474	1,220991161	0,002059032	0,004200426	12-14	0,001681513	0,001479731
11-13	0,527112299	6,125044918	0,008853463	0,012040709	14-16	0,005283033	0,005811337
13-15	1,809162041	15,01604494	0,030386975	0,041326286	16-18	0,014379529	0,015817482
15-17	5,265177816	8,740195175	0,088434769	0,180406929	18-20	0,035009193	0,038510112
17-19	13,5093117	22,42545743	0,226904561	0,385737753	20-22	0,07796643	0,154373532
19-21	31,38290534	0	0,527112299	1,075309091	22-24	0,161426927	0,390653164
21-23	67,27204471	0	1,129912027	2,305020534	24-26	0,314538174	0,830380779
23-25	134,9407486	0	2,266486405	5,394237643	26-28	0,582188208	1,024651247
25-27	256	0	4,29981696	13,1574399	28-30	1,031186633	1,814888475
SUMA :		54,08	SUMA :	22,56	SUMA :		4,28

Cálculo del valor de F

El valor del factor de crecimiento del tráfico será función de la tasa de crecimiento de vehículos pesados estimada para el período de proyecto. Además, deberán tenerse en cuenta las limitaciones impuestas por la capacidad de la sección estudiada.

Tasa anual de crecimiento constante

Si se estima una tasa de crecimiento del tráfico de vehículos pesados constante, el factor de crecimiento se puede obtener de la siguiente expresión:

$$F = [(1+r)^n - 1]/r$$

r : Tasa de crecimiento anual del tráfico de vehículos pesados (en tanto por uno).

n : Período de proyecto (en años).

Por ejemplo (CASO 1), para un período de proyecto de 20 años, y una tasa estimada de crecimiento del 4 % anual se obtiene un valor del factor de crecimiento: $F = 29,78$.

Tasa anual de crecimiento variable

En caso de que se considere conveniente la variación de la tasa de crecimiento a lo largo del período de proyecto, el caso más general tendrá la forma siguiente:

.n₁ primeros años con tasa de crecimiento r₁.

.n₂ primeros años con tasa de crecimiento r₂.

.....

.n_m primeros años con tasa de crecimiento r_m.

$$\sum_{i=1}^m n_i = n \text{ (Período de proyecto)}$$

El *factor de crecimiento* se definirá como,

$$FC = C_1 + t_{C1} \times C_2 + t_{C1} \times t_{C2} \times C_3 + \dots + t_{C1} \dots t_{C_{m-1}} \times C_m$$

Donde,

C_i Factor de acumulación de tráfico en cada período.

$$C_i = \frac{(1+r_i)^{n_i} - 1}{r_i}$$

t_{Ci} Tráfico al final de cada período.

$$t_{Ci} = (1+r_i)^{n_i}$$

Los valores C_i y t_{Ci} pueden obtenerse de los ábacos que aparecen en la figura 3, introduciendo la tasa anual de crecimiento y los años durante la cual ésta permanece constante.

Figura 3. Ábacos para el cálculo del factor de crecimiento con tasa variable

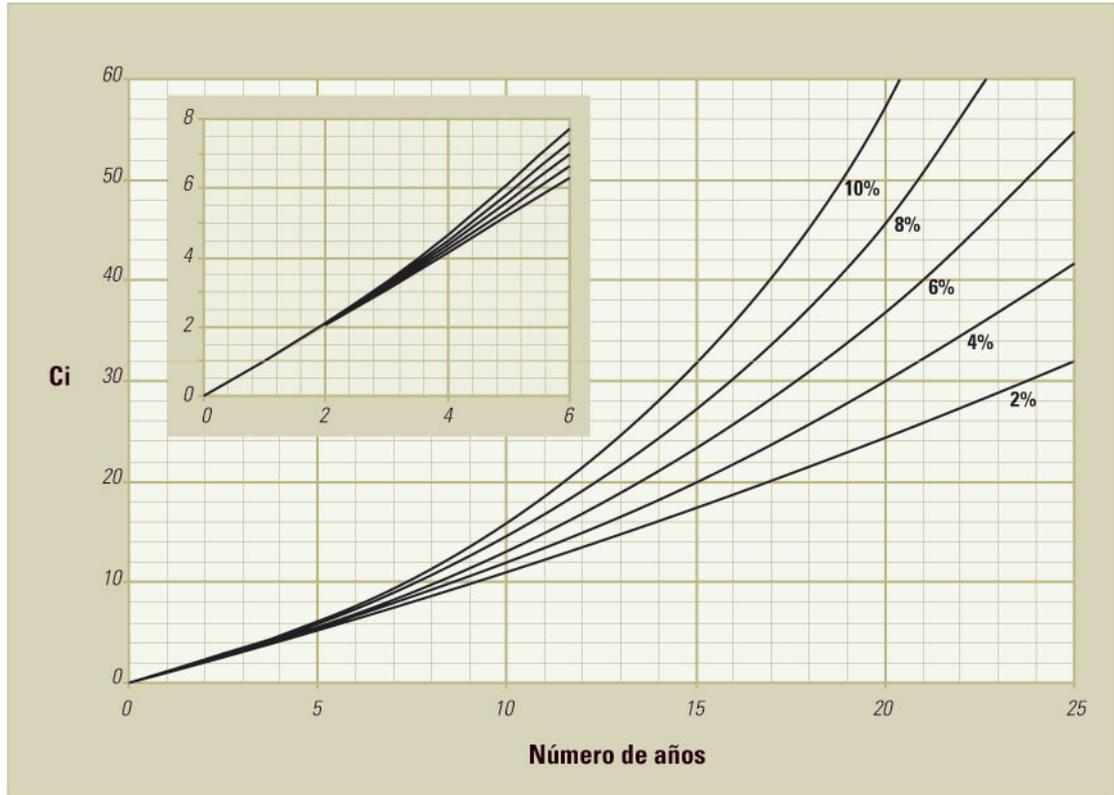
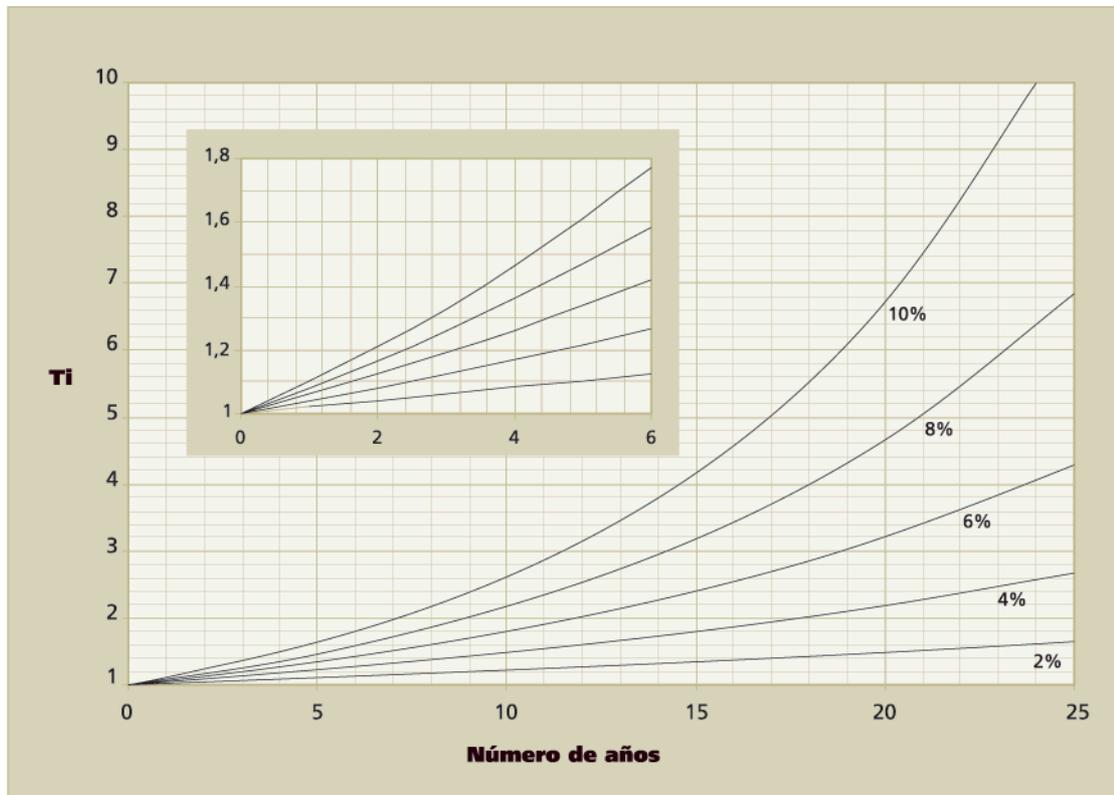


Figura 3. Ábacos para el cálculo del factor de crecimiento con tasa variable (cont.)



A continuación se realiza un ejemplo numérico en el que la tasa de crecimiento anual no permanece constante a lo largo del período de proyecto (CASO 2), y se reparte de la siguiente manera:

- Durante los 5 (n_1) primeros años será del 8 % (r_1).
- Durante los 4 (n_2) primeros años será del 4 % (r_2).
- Durante los 11 (n_3) primeros años será del 2 % (r_3).

Entonces, a partir de los ábacos mencionados se obtendrán los siguientes valores,

C_1	8% en 5 años:	5,9	t_{c1}	8 % en 5 años:	1,47
C_2	4% en 4 años:	4,3	t_{c2}	4 % en 4 años:	1,17
C_3	2% en 11 años:	12,1			

y por consiguiente, el valor del factor de crecimiento será, $F = 5,9+(1,47 \times 4,3)+(1,47 \times 1,17 \times 12,1) = 33,03$

Limitación por capacidad de la sección

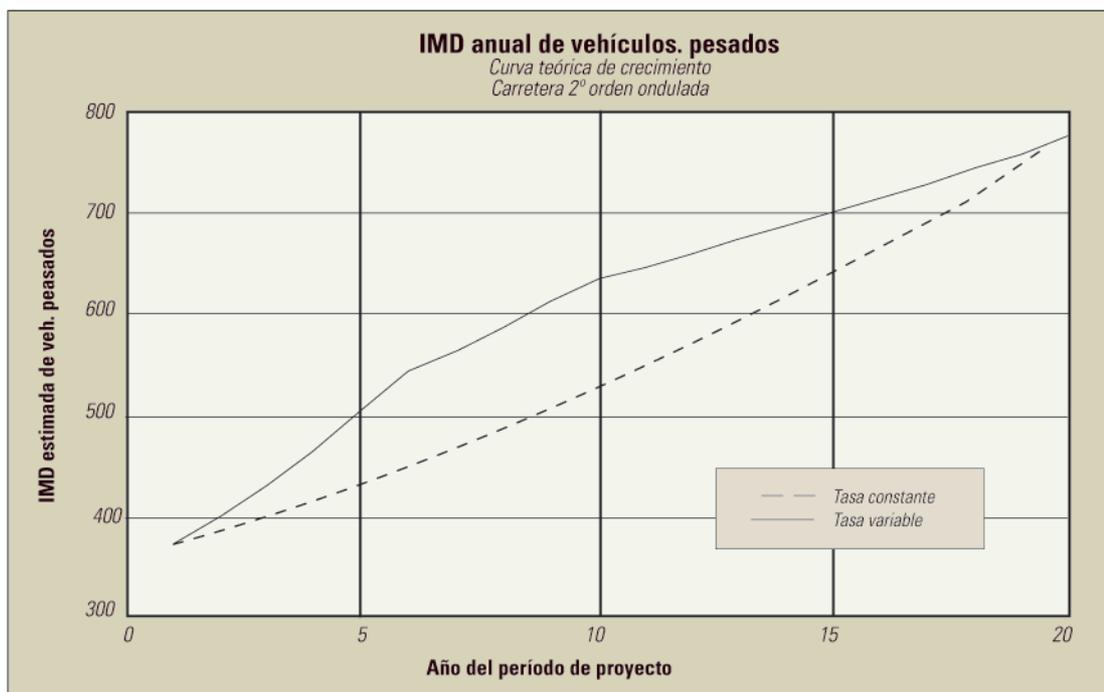
El crecimiento teórico de las IMD de vehículos pesados debe corregirse en función de la capacidad del tramo de carretera proyectado. De otra manera podría darse la paradoja de que a partir de cierto año la IMD estimada para la carretera fuera mayor que su propia capacidad.

La capacidad de la sección (Red secundaria con calzada de 6 m y arcén >0,5 m sobre terreno ondulado), en términos de IMD de pesados, se obtiene de la tabla C3.1 de la Instrucción:

Capacidad (tabla C3.1) = 3.000 vehículos pesados en toda la calzada.

Por tanto, la IMD anual de vehículos pesados en la calzada no podrá superar en ninguno de los años del período de proyecto el valor de la capacidad de la sección; cuando según las estimaciones realizadas se llegase a ese valor, a partir de ese año la IMD dejaría de crecer y tomaría el valor constante dado por la capacidad de la sección. Como consecuencia de esto, el valor del factor de crecimiento de pesados en ese caso debería de reajustarse.

Figura 4. Crecimiento estimado del tráfico de vehículos pesados en el período de proyecto



Según se muestra en la figura 4, la IMD de vehículos pesados en la calzada no alcanza el valor de la capacidad de la sección (3.000 vehs. pesados), con lo cual los valores obtenidos para el factor de crecimiento son válidos ($F=29,78$ para tasa constante y $F=33,03$ para tasa variable).

Tráfico de proyecto (TE)

El tráfico de proyecto vendrá definido por el par de valores dado por el número de ejes equivalentes acumulados y por la categoría del tráfico de proyecto. El número de ejes equivalentes acumulados, considerando una tasa de crecimiento del tráfico pesado constante (CASO 1) tanto para firme flexible como semirrígido, serán:

- $TE (f.flexible) = 185 \times 0,60 \times 365 \times 29,78 = 1.206.537$ ejes equivalentes de 13 t.
- $TE(f.semirrígido) = 185 \times 0,81 \times 365 \times 29,78 = 1.628.825$ ejes equivalentes de 13 t.

Si se considera una tasa de crecimiento del tráfico pesado variable (CASO 2) tanto para firme flexible como semirrígido, serán:

- $TE (f.flexible) = 185 \times 0,60 \times 365 \times 33,03 = 1.338.211$ ejes equivalentes de 13 t.
- $TE(f.semirrígido) = 185 \times 0,81 \times 365 \times 33,03 = 1.806.584$ ejes equivalentes de 13 t.

De acuerdo con la tabla 3.1 de la Instrucción la categoría del tráfico de proyecto será función de la IMD_{PA} y en este caso adoptará el valor T3A (100<185<200) para todos los supuestos.

Tráfico de proyecto mayorado $(TE)_m$

Si se decide adoptar un coeficiente de seguridad se deben seguir las directrices indicadas en el apartado 2.2.4. En consecuencia se adoptará un valor que será función de la categoría del tráfico de proyecto (T3A) y que estará dentro del rango 1,12-1,25. Se adoptará un valor para S de 1,20. Por consiguiente los ejes equivalentes mayorados tendrán unos valores de:

CASO 1:

- $TE (f.flexible) = 1.206.537 \times 1,20 = 1.447.844$ ejes equivalentes de 13 t.
- $TE (f.semirrígido) = 1.628.825 \times 1,20 = 1.954.590$ ejes equivalentes de 13 t.

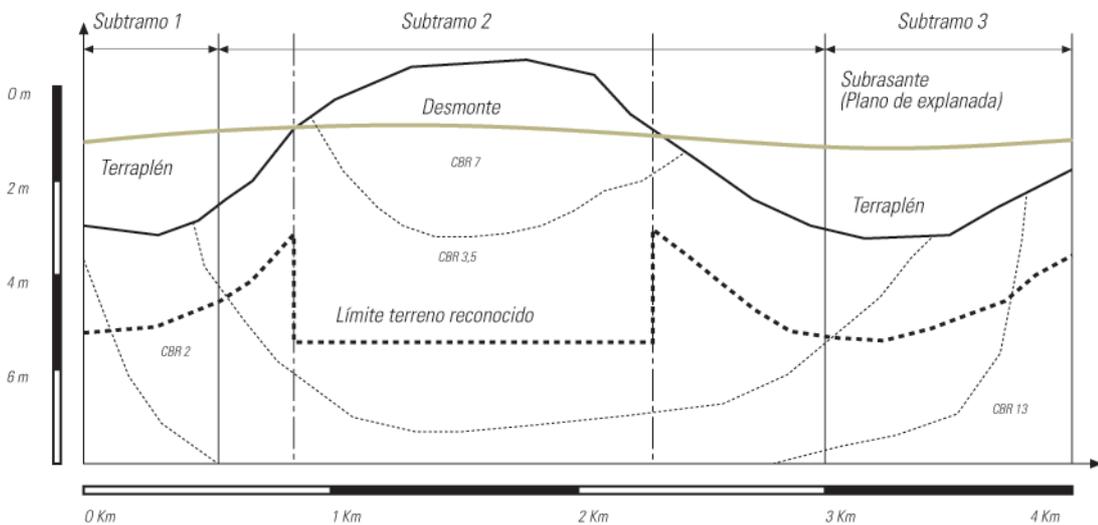
CASO 2:

- $TE (f.flexible) = 1.338.211 \times 1,20 = 1.605.853$ ejes equivalentes de 13 t.
- $TE (f.semirrígido) = 1.806.584 \times 1,20 = 2.167.900$ ejes equivalentes de 13 t.

Estos valores son los que deben utilizarse para el cálculo de la sección del firme. La categoría del tráfico de proyecto será la correspondiente al resultado de mayorar con el coeficiente S la IMD_{PA} anterior ($185 \times 1,20 = 222$). En este caso corresponde a una categoría T2B (200<222<400).

Se pretende proyectar la sección estructural del cimiento del firme de una carretera de nueva construcción de 4 km de longitud. Una vez encajado el trazado teniendo en cuenta los condicionantes orográficos, topográficos, etc., se parte del perfil longitudinal de la figura 1. Se estima que por ella transitará un tráfico de categoría T3A. La carretera se encuentra dentro de la zona térmica ZT2 y de la zona pluviométrica ZPS. En las inmediaciones de la traza existen préstamos de suelos seleccionados.

Figura 1. Sección del tramo de proyecto



RECONOCIMIENTO DEL TERRENO NATURAL SUBYACENTE

El terreno natural subyacente se reconocerá según las directrices indicadas en el apartado 3.2.3 de la Instrucción; lo cual dará lugar al anejo nº 7 "Geotecnia del corredor" del proyecto de construcción, que incluirá los parámetros geotécnicos necesarios para el dimensionamiento del cimiento. En este caso se obtienen los siguientes datos del reconocimiento:

SUBTRAMO HOMOGÉNEO Nº 1 (ver figura 2)

P.K. inicial: _____; Longitud: 500 m

Grupos de suelos homogéneos:

TIPO DE SUELO	CBR	HINCHAMIENTO
Inadecuado SIN	2,0	2%
Tolerable S0	3,5	-
Seleccionado S2	13,0	-

A. Subtramo en terraplén:

P.K.inicial: _____; Longitud: 500 m

Profundidad reconocida: 2 m

Caracterización del terreno natural subyacente: Suelo inadecuado SIN; CBR 2; Hinchamiento 2%

B. Subtramo en desmonte:

P.K.inicial: _____; Longitud: 0 m

SUBTRAMO HOMOGÉNEO Nº 2

P.K. inicial: _____; Longitud: 2.500 m

Grupos de suelos homogéneos:

TIPO DE SUELO	CBR	HINCHAMIENTO
Tolerable S0	3,5	-
Adecuado S1	7	-

A. Subtramo en terraplén:

P.K.inicial: _____; Longitud: 950 m

Profundidad reconocida: 2 m

Caracterización del terreno natural subyacente: Suelo tolerable S0; CBR 3,5;

B. Subtramo en desmonte:

P.K.inicial: _____; Longitud: 1.550 m

Profundidad reconocida: 6 m

Caracterización del terreno natural subyacente: Suelo tolerable S0; CBR 3,5;

SUBTRAMO HOMOGÉNEO Nº 3

P.K. inicial: _____; Longitud: 1.000 m

Grupos de suelos homogéneos:

TIPO DE SUELO	CBR	HINCHAMIENTO
Inadecuado SIN	2,0	
Tolerable S0	3,5	
Seleccionado S2	13,0	

A. Subtramo en terraplén:

P.K.inicial: _____; Longitud: 1.000 m

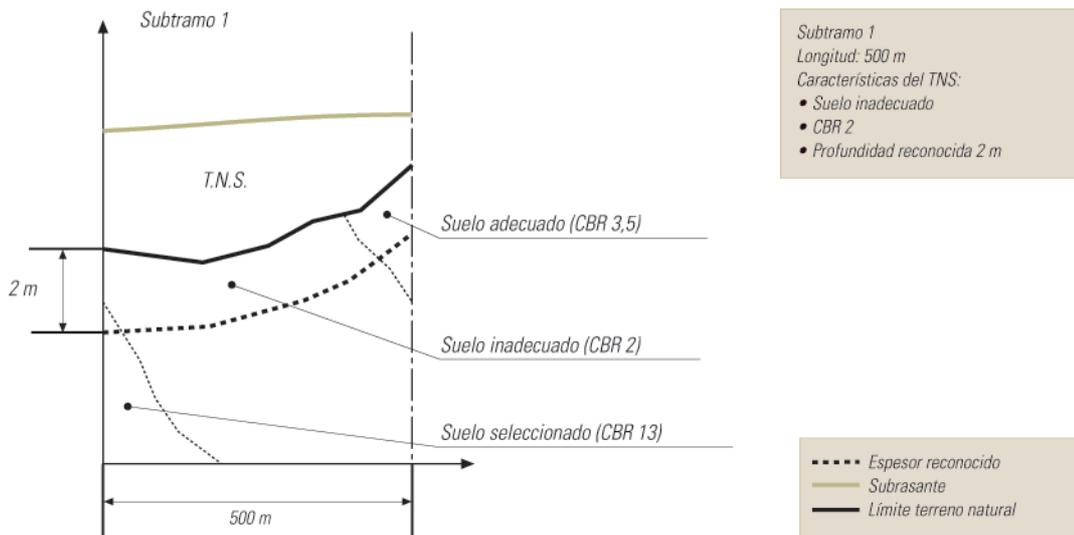
Profundidad reconocida: 2 m

Caracterización del terreno natural subyacente: Suelo inadecuado SIN; CBR 2; Hinchamiento 2%

B. Subtramo en desmonte:

P.K.inicial: _____; Longitud: 0 m

Figura 2. Sección del subtramo nº 1



DEFINICIÓN DE TRAMOS DE PROYECTO

A continuación deben definirse los tramos de proyecto; en cada uno de ellos se deben mantener inalteradas tanto la categoría del pavimento como la sección dimensionada del firme (ver apartado 4.2 de la Instrucción). En este caso, la carretera objeto del proyecto tiene una longitud de 4 km, por consiguiente, se define un único tramo de proyecto que se corresponde con la totalidad de la traza. No se pueden definir dos tramos de proyecto ya que uno de ellos tendría una longitud inferior a 2,5 km.

La categoría del pavimento del firme vendrá dada por el tráfico de proyecto estimado para el tramo, y que en este caso se corresponde con T3A. Para esta categoría de tráfico, se exige un pavimento ALTO o MEDIO. En este caso, se elegirá un pavimento tipo MEDIO para todo el tramo. Se reproduce aquí la tabla 4.1 de la Instrucción que define el criterio de elección de la categoría de pavimento del firme en función del nivel de tráfico de proyecto.

Tabla 4.1. Categorías del pavimento del firme

Categorías del pavimento	Categorías del tráfico de proyecto
Baja	T4
Media	T3 y T4
Alta	T0, T1, T2, T3 y T4

Para esta categoría de pavimento se exige un módulo de Young equivalente mínimo (E_e) de 100 MPa. Se reproduce la tabla 3.8 de la Instrucción que define los valores mínimos exigidos para cada categoría de pavimento.

Tabla 3.8. Categorías del pavimento del firme

Categoría	Módulo de Young equivalente E_e (MPa)
Baja	> 60
Media	> 60
Alta	> 160

DIMENSIONAMIENTO DE LAS SECCIONES TIPO

Para cada subtramo se debe definir una sección tipo constituida por las capas de asiento necesarias para que, colocadas sobre el terreno natural subyacente, se alcance la capacidad de soporte exigida para el cimiento. En el caso de terraplenes y secciones a media ladera, bajo la sección tipo se añadirán los suelos de aportación necesarios para alcanzar la cota del plano de explanada.

DIMENSIONAMIENTO DEL SUBTRAMO 1

En primer lugar, se debe caracterizar el terreno natural subyacente y a continuación las capas de asiento, hasta lograr que el conjunto tenga la capacidad de soporte requerida. Posteriormente, y debido a que el subtramo ocurre en zona de terraplén, habrá que añadir suelos de aportación hasta alcanzar la cota del plano de explanada.

Caracterización del terreno natural subyacente

Según se indica en el apartado 5.3.2.1 de la Instrucción, el espesor reconocido del terreno natural subyacente, a efectos de capacidad portante, se caracterizará en función del peor de los suelos representativos encontrados en cada subtramo homogéneo definido, es decir, la capacidad de soporte del espesor reconocido vendrá dada por el mínimo CBR de los suelos que lo constituyen o que se consideren predominantes. En este caso, se trata de un suelo inadecuado con un CBR del 2%.

El macizo inferior no reconocido se caracteriza como un espacio semiindefinido cuyo CBR, y por tanto su módulo, depende del CBR de la zona reconocida (ver tabla 5.4, reproducida de la Instrucción). En este caso, al tener el espesor reconocido un CBR 2, el macizo semiindefinido se caracterizará como un suelo con CBR 1. Por tanto, aplicando la relación entre el CBR y el módulo de deformación:

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

Se obtendrá el modelo de cálculo que aparece en la figura 3.

Figura 3. Modelo de cálculo de la sección tipo del subtramo nº 1

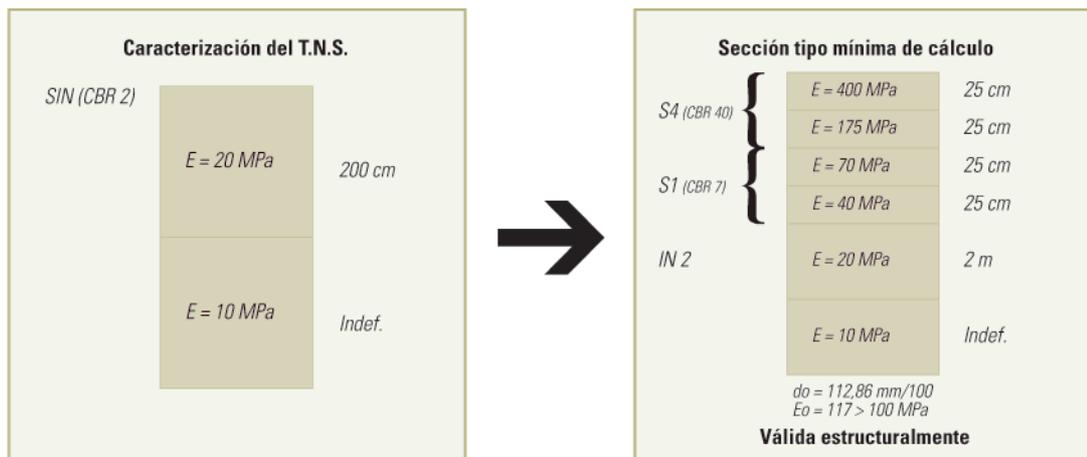


Tabla 5.4. Caracterización del terreno natural subyacente en suelos

CBR mínimo en la zona reconocida (> 2m)	CBR del macizo indefinido no reconocido
>5	3
>3 y (5)	2
≤3	1

Definición de las capas de asiento

Para formar las capas de asiento se puede utilizar suelo adecuado con CBR 7, procedente del desmonte del subtramo nº 2, así como suelo seleccionado procedente de préstamos. Los suelos se caracterizarán en tongadas con el espesor de compactación (ver apartado 5.3.2.2). En este caso, las tongadas se caracterizarán con el espesor máximo permitido de 25 cm. Cada tongada tendrá un módulo de valor proporcional al de la tongada inferior, siempre y cuando, no supere la capacidad resistente del propio material. Los coeficientes de proporcionalidad entre módulos para los distintos materiales utilizables se reproducen en la tabla 5.1, y la capacidad resistente de los materiales en la tabla 5.2.

Tabla 5.1. Valor del coeficiente de proporcionalidad, *c*, entre módulos de materiales granulares

Material de la capa o tongada "i"	Suelos S0, S1 y S2	Suelos S3 y S4; Zahorra <50% part.fract.	Zahorra >50% part.fract.
Coeficiente de proporcionalidad, c	2	2,5	3

Se dispondrán 50 cm de suelo seleccionado tipo S4 con CBR 40, sobre 50 cm de suelo adecuado S1 con CBR 7, tal y como aparece en la figura 3. La primera tongada de 25 cm de suelo adecuado tendrá un módulo de 40 MPa (2x20 MPa), ya que el coeficiente de proporcionalidad entre módulos para suelos adecuados tiene valor 2. Según esto, la siguiente tongada tendría un módulo de valor 80 MPa, sin embargo el módulo máximo que puede adoptar el material es de 70 MPa ($E_{max}=10 \times CBR=10 \times 7=70$ MPa). Una vez que un material ha alcanzado su módulo máximo, a efectos de cálculo, se puede caracterizar el espesor restante en una sola capa. A continuación, se caracteriza la primera tongada de suelo seleccionado tipo S4 cuyo módulo será 2,5 veces el módulo de la capa inferior, es decir 175 MPa ($E=2,5 \times 70$). La segunda tongada de 25 cm alcanza el módulo máximo del propio material de valor 400 MPa.

Para todos los suelos se considera un coeficiente de Poisson de 0,35 y se supone que todas las capas tienen adherencia perfecta en sus interfases.

Tabla 5.2. Valores máximos de los módulos de Young para materiales granulares

Material granular	Módulo máximo (MPa) (el mínimo de los valores señalados)
Suelo tipo S0	10 x CBR ó 50
Suelo tipo S1	10 x CBR ó 100
Suelo tipo S2	10 x CBR ó 200
Suelo tipo S3	10 x CBR ó 300
Suelo tipo S4	10 x CBR ó 400
Zahorra con menos del 50% de partículas fracturadas	10 x CBR ó 500
Zahorra con menos del 50% de partículas fracturadas	600
Macadam	

Cálculo analítico

A continuación se realiza el cálculo con la ayuda del programa informático ICAFIR. Se hallará la deflexión superficial en el eje de carga y, a partir de ella, se obtendrá el módulo de Young equivalente del macizo mediante la expresión:

$$E \text{ (MPa)} = 13.150 / d_0 \text{ (mm/100)}$$

Realizando el cálculo sobre el modelo con la sollicitación tipo (placa de carga; Presión=0,5 MPa; Diámetro de placa=300 mm) se obtiene el siguiente resultado:

$$d_0 = 112,860 \text{ mm}/100 \cdot E = 117 \text{ MPa} > 100 \text{ MPa}$$

por tanto, se cumple la capacidad de soporte exigida para un cemento tipo MEDIO.

Por razones de calidad del cemento, en los criterios de proyecto (ver tabla 4.2, reproducida de la Instrucción) se exige que en los 50 cm superiores de las capas de asiento se dispongan suelos seleccionados tipo S2 o superiores; criterio que en este caso cumple la sección tipo calculada. Además, deben estudiarse las condiciones de filtro de los suelos utilizados para considerar la posibilidad de disponer capas filtro o geotextiles.

Sección tipo del subtramo

La sección tipo mínima de cálculo para el cemento del firme del subtramo nº 1 (ver figura 4), estará constituida por:

- 50 cm de suelo seleccionado tipo S4 (CBR=40) compactado en dos tongadas de 25 cm.
- 50 cm de suelo adecuado tipo S1 (CBR=7) compactado en tongadas de 25 cm.

Tabla 4.2. Suelos admisibles en capas de asiento

Categoría	Capas de asiento en los 50 cm superiores	Profundidad mínima en desmonte de los suelos inadecuados no estabilizados respecto al plano de explanada (cm)
Baja	S1, S2, S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	50
Media	S2, S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	75
Alta	S3, S4, SC-1, SC-2 y SC-3	100

Figura 4. Sección tipo del subtramo nº 1



Suelos de aportación (al núcleo del terraplén)

Bajo la sección tipo mínima calculada se añadirán, en caso de terraplenes y secciones a media ladera, los suelos de aportación necesarios para alcanzar la cota del plano de explanada. Los suelos de aportación pueden ser de calidad superior o inferior a la del terreno natural subyacente, siempre que cumplan los requisitos mínimos para poder usarlos en el núcleo del terraplén. La diferencia entre ambos casos estriba en la necesidad de recalcularse la sección. Mientras que en el primer caso no es necesario, en el segundo debe hacerse de nuevo el cálculo, ya que varía el modelo utilizado en el cálculo de la sección.

En el supuesto planteado, el suelo de aportación será adecuado (CBR 7), superior al del terreno natural subyacente (CBR 2), por tanto se añadirá sin necesidad de realizar un nuevo cálculo.

Parámetros característicos

Una vez dimensionada la sección del cimiento, deben hallarse sus parámetros característicos para su utilización en el cálculo de la estructura del firme. Estos varían en función del tipo de estructura que se vaya a proyectar, y su definición es independiente del proceso anterior. En concreto, se distinguirá entre firmes con pavimento bituminoso y firmes con pavimento de hormigón.

Firmes con pavimento bituminoso: en el dimensionamiento de este tipo de estructuras el cimiento se considera como un macizo elástico semindefinido y su parámetro característico es el módulo de Young, E , que tomará el valor mínimo exigido para cada categoría de cimiento independientemente del valor obtenido en el cálculo.

Categoría de cimiento: MEDIA · $E = 100$ MPa

El coeficiente de Poisson del macizo adoptará el valor 0,35 en todos los casos.

Firmes con pavimento de hormigón: en el dimensionamiento de este tipo de estructuras el cimiento se considera como un macizo formado por un conjunto de resortes y su parámetro característico es su coeficiente de balasto, K . Este tomará su valor de la tabla 5.17 de la Instrucción.

Categoría de cimiento: MEDIA · $K = 80$ MPa/m

Tabla 5.17. Valores de cálculo del coeficiente de Balasto

Categoría de cimiento	Última capa de asiento	K (MPa/m)
Bajo	Suelo seleccionado o zahorra	50
	Suelo estabilizado tipo SC-2	60
	Suelo estabilizado tipo SC-3	70
Medio	Suelo seleccionado o zahorra	80
	Suelo estabilizado tipo SC-2	90
	Suelo estabilizado tipo SC-3	100
Alto	Suelo seleccionado o zahorra	110
	Suelo estabilizado tipo SC-2	120
	Suelo estabilizado tipo SC-3	140

DIMENSIONAMIENTO DEL SUBTRAMO 2

En primer lugar, debe caracterizarse el terreno natural subyacente y a continuación las capas de asiento, hasta lograr que el conjunto tenga la capacidad de soporte requerida. Posteriormente, al subtramo que discurre en zona de terraplén, habrá que añadirle suelos de aportación hasta que se alcance la cota del plano de explanada.

Caracterización del terreno natural subyacente

El subtramo nº 2 incluye una zona de desmonte, reconocida en 6 m, y una zona de terraplén, reconocida en 2 m. En el caso del desmonte, se caracteriza el espesor reconocido, menos el estimado para las capas de asiento. Se supondrá que las capas de asiento tendrán un espesor aproximado de 1 m, por tanto, el espesor reconocido en la zona de desmonte será de 3 m. En el caso del terraplén, el espesor caracterizado es directamente el reconocido, es decir 2 m.

Por tanto, se elegirá como espesor reconocido el mínimo del todo el subtramo, que se corresponde con 2 m, que se caracterizará con el suelo de peor calidad encontrado. En este caso, se trata de un suelo tolerable con CBR 3,5. El macizo inferior no reconocido se caracteriza como un espacio semindefinido cuyo CBR, y por tanto su módulo, depende del CBR encontrado en el espesor reconocido de acuerdo a los criterios anteriormente mencionados.

En este caso, al tener el espesor reconocido un CBR 3,5 el macizo semidefinido se caracteriza como un suelo con CBR 2. Por tanto, aplicando la relación entre el CBR y el módulo de Young:

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

Se obtendrá el modelo de cálculo que aparece en la figura 5.

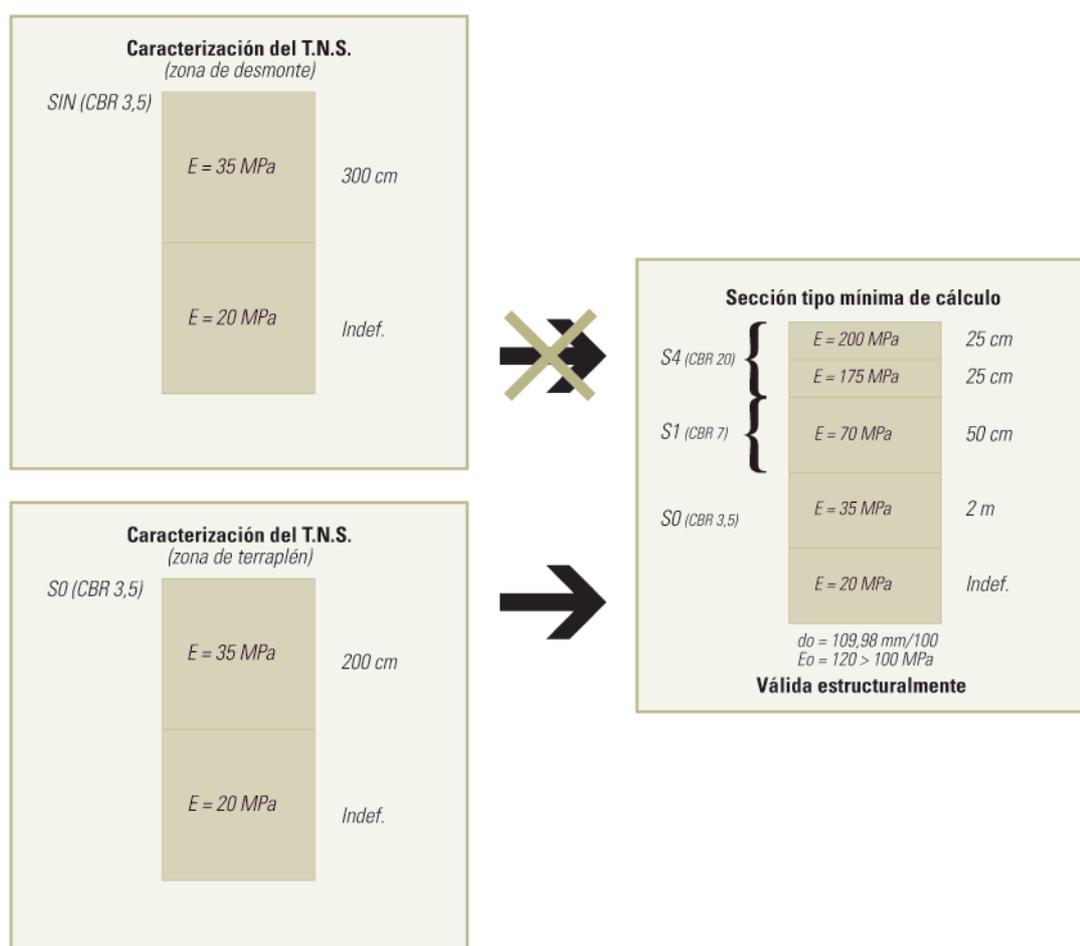
Definición de las capas de asiento

Las capas de asiento deben formar una estructura de tierras de 1 m de altura sobre cota de desmonte. Para ello se puede utilizar el suelo adecuado con CBR 7 procedente del desmonte así como suelo seleccionado procedente de préstamos. Los suelos se caracterizarán en tongadas de espesor máximo de compactación de valor 25 cm. Cada tongada tendrá un módulo cuyo valor será proporcional al módulo de la tongada inferior, siempre y cuando no se supere la capacidad resistente del propio material.

Se dispondrán 50 cm de suelo seleccionado tipo S3 con CBR 20, sobre 50 cm de suelo adecuado con CBR 7, tal y como aparece en la figura. La primera tongada de 25 cm de suelo adecuado S1, tendrá un módulo de 70 MPa (2x35 MPa) ya que el coeficiente de proporcionalidad de módulos para suelos adecuados tiene valor 2, y que en este caso coincide con el módulo máximo que puede adoptar el material. A continuación, se caracteriza la primera tongada de suelo seleccionado tipo S3, cuyo módulo será 2,5 veces el módulo de la tongada inferior, es decir 175 MPa ($E=2,5 \times 70$). La segunda capa de 25 cm alcanza el módulo máximo del propio material de valor 200 MPa.

Para todos los suelos, se considera un coeficiente de Poisson de 0,35 y se supone que todas las capas tienen adherencia perfecta en sus interfases.

Figura 5. Modelo de cálculo de la sección tipo del subtramo nº 2



Cálculo analítico

A continuación, se realiza el cálculo con la ayuda del programa informático *ICAFIR*. Se procede de la misma manera que con el subtramo nº 1 y se obtiene el siguiente resultado:

$$d_0 = 109,980 \text{ mm}/100 \cdot E = 120 \text{ MPa} > 100 \text{ MPa}$$

por tanto, cumple la exigencia de cimiento tipo MEDIO. Desde el punto de vista de la capacidad de soporte pudiera reducirse el espesor de la capa de suelo seleccionado aumentando el de la capa de suelo adecuado, sin embargo debido a las exigencias de calidad del cimiento, se establece que en los 50 cm de coronación se dispongan como mínimo 50 cm de suelo seleccionado tipo 2 o superior.

Sección tipo del subtramo

La sección tipo mínima de cálculo para el cimiento del firme del subtramo nº 2 estará constituida por:

- 50 cm de suelo seleccionado tipo S2 (CBR=20) compactado en dos tongadas de 25 cm.
- 50 cm de suelo adecuado tipo S1 (CBR=7) compactado en tongadas de 25 cm.

Suelos de aportación (terraplén)

A la sección tipo mínima calculada, se le añadirán, en el caso de terraplenes y secciones a media ladera, los suelos de aportación necesarios para alcanzar la cota del plano de explanada. En el supuesto planteado, el suelo de aportación será adecuado (CBR=7), superior al del terreno natural subyacente, por tanto se añadirá sin necesidad de realizar un nuevo cálculo.

Parámetros característicos

Una vez dimensionada la sección del cimiento, deben hallarse sus parámetros característicos para su utilización en el cálculo de la estructura del firme. Procediendo de la misma forma que para el subtramo nº 1, se tendrá:

- Firmes con pavimento bituminoso · E = 100 MPa
- El coeficiente de Poisson del macizo adoptará el valor 0,35 en todos los casos.
- Firmes con pavimento de hormigón · K = 80 MPa/m

DIMENSIONAMIENTO DEL SUBTRAMO 3

En primer lugar, debe caracterizarse el terreno natural subyacente y a continuación las capas de asiento, hasta lograr que el conjunto tenga la capacidad de soporte requerida. Posteriormente, y debido a que el subtramo discurre en zona de terraplén, habrá que añadir suelos de aportación hasta alcanzar la cota del plano de explanada.

Caracterización del terreno natural subyacente

Se caracteriza el espesor reconocido con el suelo de peor calidad encontrado, en este caso un suelo inadecuado con CBR 2. El macizo inferior no reconocido se caracteriza como un suelo con CBR 1.

Sección tipo del subtramo

La caracterización del terreno natural subyacente en este subtramo es idéntica a la del subtramo nº 1, ya que también se han reconocido 2 m, y el peor de los suelos encontrados se corresponde con el mismo grupo homogéneo de suelos (suelo inadecuado de CBR 2). Por consiguiente, no será necesario realizar el cálculo, siendo la sección tipo de este subtramo la misma que la del subtramo nº 1.

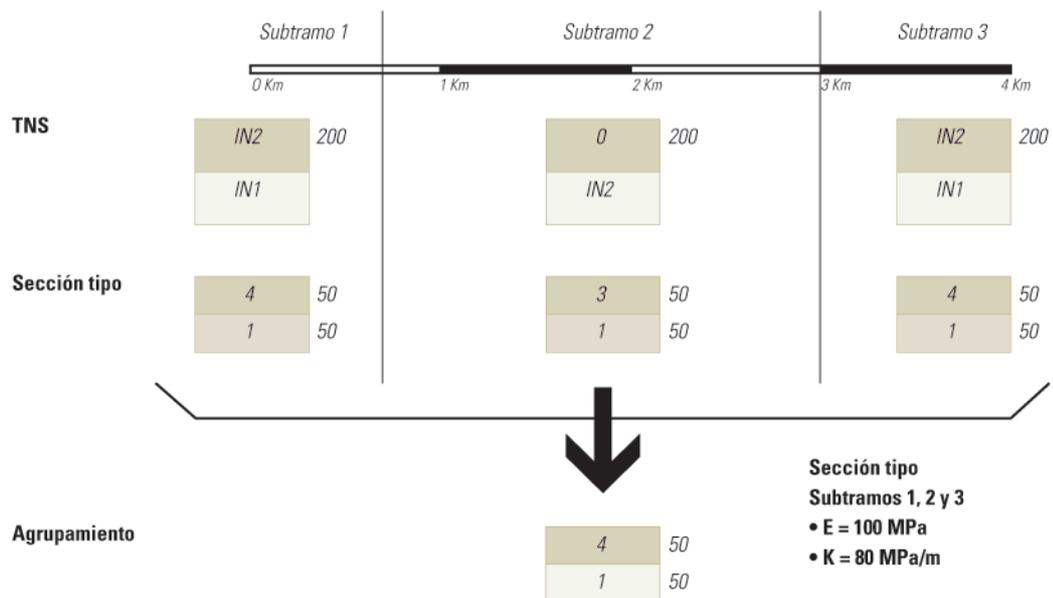
AGRUPAMIENTO DE SECCIONES TIPO

El proyectista podrá optar, una vez calculadas las secciones tipo de cada subtramo, por agrupar aquellas que considere oportuno. Esto permitirá simplificar las tareas de construcción al disminuir el número de secciones constructivas diferentes.

Debe elegirse como nueva sección tipo la de mayor capacidad portante. Es decir, de entre todas las secciones calculadas, se elegirá la que, al colocarla sobre el terreno natural subyacente de menor capacidad portante, dé como resultado el mayor módulo equivalente. Éste a su vez, será el menor de los obtenidos en cualquiera de los subtramos agrupados.

El terreno natural subyacente de menor capacidad portante es el del subtramo nº1 (igual al del subtramo nº 3). En este caso, resulta evidente que la sección elegida para el tramo será la formada por 50 cm de S4 sobre 50 cm de S1 (ver figura 6), sin embargo, en general deberá realizarse el cálculo de cada una de las secciones tipo de cada subtramo sobre el terreno natural subyacente de peor capacidad portante.

Figura 6. Esquema del agrupamiento de secciones de cimiento



FICHAS TIPO

A continuación, se presentan una serie de fichas tipo que pueden servir de base para la presentación de los datos correspondientes a cada subtramo.

SUBTRAMO HOMOGÉNEO N° 1

DATOS GENERALES

CARRETERA:	Ejemplo	TRÁFICO ESTIMADO:	T3A
CATEGORÍA DEL CIMIENTO:	MEDIA	LONGITUD:	500 m
P.K. INICIAL DEL TRAMO:	0,00		

TERRENO NATURAL SUBYACENTE

Nº	P.K.	MÉTODO	ZONA	PROF.	SUELO mín.	CBR mín.
1	50.00	Cata	Terraplén	2 m	Seleccionado S2	13
2	150.00	Cata	Terraplén	2 m	Inadecuado IN	2
3	250.00	Cata	Terraplén	2 m	Inadecuado IN	2
4	350.00	Cata	Terraplén	2 m	Inadecuado IN	2
5	450.00	Cata	Terraplén	2 m	Tolerable S0	3,5

CARACTERIZACIÓN T.N.S. **2 m** **Inadecuado IN** **2**

CAPAS DE ASIENTO

Nº	SUELO	CBR	K	E (MPa)	ESPESOR
1	Seleccionado S4	40	2,5	400	25 cm
2	Seleccionado S4	40	2,5	175	25 cm
3	Adecuado S1	7	2	70	25 cm
4	Adecuado S1	7	2	40	25 cm

DATOS DE CÁLCULO: $d_0 = 112,86$ mm/100; $E = 117$ MPa.

SECCIÓN TIPO DEL SUBTRAMO

TIPO	SUELO/MATERIAL	CBR	ESPESOR
C.A.	Seleccionado S4	40	50 cm
C.A.	Adecuado S1	7	50 cm
S.A.	Adecuado S1	7	h cm
T.N.S.	Inadecuado IN	2	-

C.A.:Capa de asiento, S.A.: Suelo de aportación al núcleo del terraplén, T.N.S.: Terreno natural subyacente

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE FIRMES CON:

- PAVIMENTO BITUMINOSO: $E = 100$ MPa
- PAVIMENTO DE HORMIGÓN: $K = 80$ MPa/m

AGRUPAMIENTO DE SECCIONES TIPO

DATOS GENERALES

CARRETERA:	Ejemplo	TRÁFICO ESTIMADO:	T3A
CATEGORÍA DEL CIMIENTO:	MEDIA	LONGITUD:	4.000 m
P.K. INICIAL DEL TRAMO:	0,00		

SUBTRAMOS AGRUPADOS

Nº	Longitud (m)	Terr. nat. Subyacente (Tipo/prof.reconocida)	Sección Tipo (Tipo/CBR/Espesor)	E (Mpa)
1	500	INCBR2 / 2 m	S4/CBR 40/50 (2x25) cm S1/CBR 7/50 (2x25) cm	117
2	2.500	S0 CBR3,5 / 2 m	S3/CBR 20/50 (2x25) cm S1/CBR 7/50 (2x25) cm	120
3	1.000	INCBR2 / 2 m	S4/CBR 40/50 (2x25) cm S1/CBR 7/50 (2x25) cm	117

CARACTERIZACIÓN TNS mínimo 2 m Inadecuado IN CBR 2

CÁLCULO DE SECCIONES TIPO SOBRE EL TNS MÍNIMO

Nº	Sección Tipo (Tipo/CBR/Espesor)	E (Mpa) sobre TNS mínimo
1	S4/CBR 40/50 (2x25) cm, S1/CBR 7/50 (2x25) cm	117
2	S3/CBR 20/50 (2x25) cm, S1/CBR 7/50 (2x25) cm	96
3	S4/CBR 40/50 (2x25) cm, S1/CBR 7/50 (2x25) cm	117

SECCIÓN TIPO DEL AGRUPAMIENTO DE LOS SUBTRAMOS 1, 2 Y 3.

TIPO	SUELO/MATERIAL	CBR	ESPESOR
C.A.	Seleccionado S4	40	50 cm
C.A.	Adecuado S1	7	50 cm
S.A.	Adecuado S1	7	h cm
T.N.S.	Inadecuado IN	2	-

C.A.:Capa de asiento, S.A.: Suelo de aportación al núcleo del terraplén, T.N.S.: Terreno natural subyacente

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE FIRMES CON:

- PAVIMENTO BITUMINOSO: **E = 100 MPa**
- PAVIMENTO DE HORMIGÓN: **K = 80 MPa/m**

El objeto del presente anejo es aclarar, mediante la resolución de varios casos concretos, el procedimiento a seguir para el dimensionamiento del firme. La metodología utilizada para el cálculo está basada en lo expuesto en el capítulo 5 de la Instrucción. Para ello, se han elegido diversos casos, que se consideran representativos.

FACTORES DE DISEÑO

Se han considerado varios ejemplos con factores de diseño diferentes y que aparecen en la tabla 1. Los ejemplos abarcan firmes flexibles o semirrígidos, distinción entre los tipos de mezclas utilizados en la capa inferior, cálculo por épocas climáticas para zonas térmicas ZT4 y , finalmente, dimensionamiento de secciones con tráficos de baja intensidad (T4). Se ha estimado el tráfico de proyecto para un periodo de proyecto de 20 años. Los valores del tráfico de proyecto se suponen mayorados.

Tabla 1. Factores de diseño

Caso	Tráfico		Cimiento		Clima
	Cat.	Nº ejes	Cat.	Módulo (MPa)	
1	T1	10.603.175	Alto	160	ZT2
2	T1	10.603.175	Alto	160	ZT4
3	T4A	225.321	Medio	100	ZT3
4	T4A	225.321	Bajo	60	ZT1

DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES

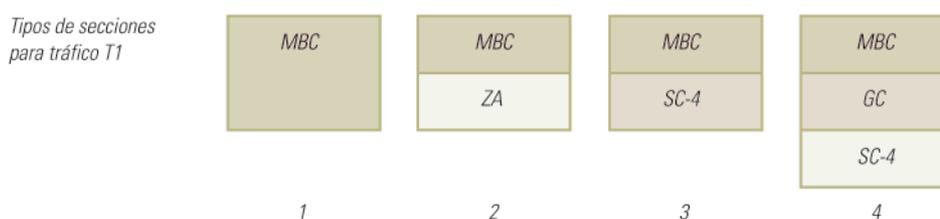
CASO 1

Para este primer caso, cuyos factores de diseño aparecen en la tabla 1, se realizará el cálculo para cuatro tipos de secciones (ver figura 1), y que se corresponden con las siguientes:

1. Mezcla bituminosa
2. Mezcla bituminosa - capa granular
3. Mezcla bituminosa - suelocemento
4. Mezcla bituminosa - gravacemento - suelocemento

En función de los condicionantes del tramo de carretera a proyectar y de los criterios generales de proyecto, se elegirán dentro de cada tipo de sección los materiales a utilizar. En concreto, se definirán los tipos de mezcla bituminosa a emplear, sus espesores y su disposición dentro de la capa bituminosa (ver tabla 8.3 de la Instrucción).

Figura 1. Tipos de secciones de firme para tráficos T1



Tipo 1: mezcla bituminosa

El cálculo se realizará diferenciando los módulos de las distintas capas de la mezcla (ver tabla 5.7 de la Instrucción). El dimensionamiento de la sección variará en función del tipo de mezcla que se vaya a disponer en el fondo de la capa. Esto es debido a que, para cada caso, la ley de fatiga de la mezcla viene corregida por un factor diferente (ver tabla 5.13 de la Instrucción).

El modelo de cálculo se introducirá en el programa de cálculo para definir en cada caso el espesor de mezcla bituminosa necesario. Para cada espesor, se deben hallar los parámetros críticos y compararlos con los valores admisibles (ver tabla 2). La sección será técnicamente correcta cuando sus parámetros críticos estén por debajo de los valores admisibles.

Tabla 2. Valores máximos admisibles de los parámetros críticos

Capa	Parámetro	Valor admisible ⁽¹⁾
Cimiento	Deformación vertical unitaria en el cimiento, ϵ_v	275×10^{-6}
Mezcla G	Deformación horizontal unitaria en la fibra inferior de la capa, ϵ_f	$7,855 \times 10^{-5}$
Mezcla S	Deformación horizontal unitaria en la fibra inferior de la capa, ϵ_f	$8,437 \times 10^{-5}$
Mezcla S con betún modificado >5%	Deformación horizontal unitaria en la fibra inferior de la capa, ϵ_f	$8,772 \times 10^{-5}$
Mezcla de alto módulo	Deformación horizontal unitaria en la fibra inferior de la capa, ϵ_f	$8,061 \times 10^{-5}$

(1) El valor del parámetro del cimiento se obtiene de la tabla 5.10 de la Instrucción. Los valores de los parámetros de la mezcla bituminosa se obtienen dividiendo el valor del tráfico de proyecto por los factores de corrección de la tabla 5.13, y aplicando la ley de fatiga de la mezcla (fórmula 5.6). Mezcla G: gruesa; Mezcla S: semidensa;

La elección de la solución más adecuada dependerá de las condiciones particulares del tramo objeto del proyecto. A modo de ejemplo se dimensionarán algunas soluciones que podrían utilizarse:

- Mezcla densa en rodadura sobre mezcla semidensa (ver tabla 3.1)
- Mezclas semidensa sobre base de mezcla gruesa (ver tabla 3.2)
- Mezcla discontinua en capa fina sobre base de alto módulo (ver tabla 3.3)
- Mezcla drenante sobre base de alto módulo (ver tabla 3.4)
- Mezcla drenante sobre mezcla semidensa o densa convencional (ver tabla 3.5)
- Mezcla drenante sobre mezcla semidensa con betún modificado (ver tabla 3.6)

Tabla 3.1. Modelo de cálculo mezclas bituminosas densas y semidensas

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S" ó "D"	6.000	0,33	A definir	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S" ó "D": Mezcla bituminosa en caliente semidensa o densa.

Tabla 3.2. Modelo de cálculo mezclas bituminosas semidensas y gruesas

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	A definir	Completa
MBC "G"	5.000	0,33	A definir	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa; MBC "G": Mezcla bituminosa en caliente gruesa.

Tabla 3.3. Modelo de cálculo de la sección de mezcla discontinua en capa fina sobre base de alto módulo

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MDCF	4.000	0,35	2,5	Completa
MAM	12.000	0,30	A definir	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MDCF: Mezcla discontinua en capa fina; MAM: Mezcla de alto módulo.

Tabla 3.4. Modelo de cálculo de la sección de mezcla drenante sobre base de alto módulo

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MD	4.000	0,35	4	Completa
MAM	12.000	0,30	A definir	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MD: Mezcla drenante; MAM: Mezcla de alto módulo.

Tabla 3.5. Modelo de cálculo de la sección de mezcla drenante sobre base de mezcla semidensa o densa

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MD	4.000	0,35	4	Completa
S o D	6.000	0,33	A definir	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MD: Mezcla drenante; S o D: Mezcla semidensa o densa.

A continuación, se realiza el cálculo analítico para obtener los parámetros críticos y compararlos con los valores admisibles indicados en la tabla 2. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del cálculo

Sección	Espesor (cm)	ϵr ($\times 10^{-3}$)	ϵv (μd)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
D/S	D 6/S 22	8,30	227	11.258.372	1,06
S/G	S 20/ G 11	7,81	207	10.827.724	1,02
MDCF/MAM	MAM 19	7,79	247	12.023.127	1,13
MD/MAM	MAM 18	7,79	248	12.023.127	1,13
MD/S	S 25	8,13	223	12.146.912	1,14
MD/S con BM>5%	S _{BM} 24	8,56	236	11.599.851	1,09

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$). MDCF: mezcla discontinua en capa fina; MAM: mezcla de alto módulo; MD: mezcla drenante; G, S ó D: mezcla gruesa, semidensa o densa; BM: betún modificado.

Tipo 2: mezcla bituminosa - capa granular

En este caso se van a dimensionar varias secciones utilizando mezcla bituminosa semidensa en caliente. En caso de utilizar otras mezclas, el procedimiento sería el mismo que el utilizado anteriormente.

Las secciones a dimensionar serán las siguientes:

- Mezcla bituminosa "S" – zorra artificial en una única capa de 25 cm de espesor.
- Mezcla bituminosa "S" – zorra artificial en dos capas de 20 cm de espesor.
- Mezcla bituminosa "S" – zorra artificial en dos capas de 15 cm de espesor.

Los modelos a introducir en el cálculo serán los indicados en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3. En el apartado 4.4.1 de la Instrucción se especifican los espesores máximo y mínimo permitidos para las capas granulares.

Los valores admisibles de los parámetros críticos de cálculo son los indicados en la tabla 2. Realizando el cálculo analítico de los modelos propuestos se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6, en función del tipo de betún empleado.

Tabla 5.1. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa sobre zorra artificial en capa única

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	A definir	Completa
ZA	480	0,35	25	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa. ZA: zorra artificial.

Tabla 5.2. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa sobre zorra artificial en capa doble de 20 cm cada una

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	A definir	Completa
ZA	600	0,35	20	Completa
ZA	480	0,35	20	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa. ZA: zorra artificial.

Tabla 5.3. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa sobre zahorra artificial en capa doble de 20 cm cada una

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	<i>A definir</i>	Completa
ZA	600	0,35	15	Completa
ZA	480	0,35	15	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa. ZA: zahorra artificial.

Tabla 6. Resultados del cálculo

Sección	Espesor MBC (cm)	e_r ($\times 10^{-3}$)	e_v (md)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
S/ZA25	23	8,41	207	10.708.474	1,01
S BM/ZA25	23	8,41	207	12.377.558	1,17
S/ZA20/ZA20	21	8,13	168	12.146.912	1,14
S BM/ ZA20/ZA20	20	8,59	176	11.451.838	1,08
S/ZA15/ZA15	22	8,09	196	12.368.828	1,17
S BM/ ZA15/ZA15	21	8,49	206	11.954.800	1,12

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$). G: mezcla gruesa; S: mezcla semidensa. BM: betún modificado; ZA20: zahorra artificial en capa de 20 cm.

Tipo 3: mezcla bituminosa - suelocemento

Se realizará el dimensionamiento de la sección con mezclas bituminosas semidensas. De acuerdo con los criterios de proyecto indicados en el apartado 4.4.2 de la Instrucción, el espesor mínimo de la capa de suelocemento es de 20 cm y el máximo de 25 cm. Asimismo, el espesor mínimo de mezcla bituminosa es de 15 cm. Teniendo en cuenta todo ello, se dimensionarán las siguientes secciones:

- Mezcla bituminosa "S" – capa de suelocemento de 20 cm de espesor.
- Mezcla bituminosa "S" – capa de suelocemento de 25 cm de espesor.

Los modelos de cálculo serán los mostrados en las tablas 7.1 y 7.2.

Tabla 7.1. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa semidensa sobre suelocemento en capa única de 20 cm

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	<i>A definir</i>	Completa
SC-4	8.000	0,25	20	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa. SC: suelocemento.

Tabla 7.2. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa semidensa sobre suelocemento en capa única de 25 cm

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	<i>A definir</i>	Completa
SC-4	8.000	0,25	25	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa caliente semidensa. SC: suelocemento.

En este caso, además de los indicados en la tabla 2, hay que añadir como parámetro crítico de fallo la tensión de tracción admisible en la fibra inferior de la capa de suelocemento. Para el tipo SC-4, adquiere un valor de 0,416 MPa (ver tabla 5.12 de la Instrucción). Generalmente, con esta tipología de firmes suele ser el parámetro determinante para el dimensionamiento de la sección.

Entrando en el programa de cálculo con los modelos propuestos se obtienen los resultados mostrados en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados del cálculo

Sección	Espesor MBC (cm)	e_r ($\times 10^{-3}$)	e_v (md)	s_r (MPa)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
MBC "S"/SC20	21	7,97	117	0,4028	22.008.608	2,07
MBC "S"/SC25	15 (2)	8,03	120	0,4109	14.291.986	1,35

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$).

(2) Espesor mínimo por criterios de proyecto. MBC "S": mezcla bituminosa en caliente "S"; SC20: suelocemento tipo SC-4 en capa de 20 cm de espesor.

Tipo 4: mezcla bituminosa - gravacemento - suelocemento

El dimensionamiento se realizará con mezclas bituminosas semidensas. Las limitaciones en los espesores son las mismas que para el suelocemento. La particularidad principal de este tipo de secciones es que deben realizarse dos cálculos. Esto es debido a la consideración de adherencia parcial entre las capas tratadas con cemento, lo que lleva necesariamente a la realización de un cálculo con adherencia completa y otro sin adherencia. Se va a dimensionar una única sección formada por mezcla bituminosa, una capa de 20 cm de gravacemento y una capa de suelocemento de 20 cm. El modelo a utilizar en el cálculo es el mostrado en la tabla 9.

Tabla 9. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa, gravacemento en capa de 20 cm y suelocemento en capa de 20 cm

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC "S"	6.000	0,33	<i>A definir</i>	Completa
GC	20.000	0,25	20	Completa/Nula
SC-4	8.000	0,25	20	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC "S": Mezcla bituminosa en caliente semidensa. SC: suelocemento; GC: gravacemento.

En este caso, además de los anteriormente citados, hay que añadir como parámetro crítico de fallo la tensión de tracción admisible en la fibra inferior de la capa de gravacemento, que adquiere un valor de 0,752 MPa (ver tabla 5.12 de la Instrucción). Realizando el cálculo del modelo propuesto, con y sin adherencia entre las capas tratadas con cemento, y componiendo los resultados, se obtienen los valores de la tabla 10.

Se puede observar que la sección calculada no puede ajustarse más debido a la limitación de espesores por criterios de proyecto.

Tabla 10. Resultados del cálculo

ADH. Gc/Sc	Espesor MBC (cm)	e_r ($\times 10^{-6}$)	e_v (md)	s_r,Sc (MPa)	s_r,Gc (MPa)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
Completa	15	-0,247	62	0,216	0,213	-	-
Nula	15	7,720	86	0,185	0,689	-	-
Parcial (2)	15 (3)	3,736	74	0,200	0,451	$7,6 \times 10^{10}$	

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$).

(2) Semisuma de los valores obtenidos con y sin adherencia. MBC: mezcla bituminosa en caliente; SC: suelocemento; GC: gravacemento.

(3) Espesor mínimo por criterios de proyecto.

CASO 2

Se trata de dimensionar una sección de firme de una carretera dentro de zona climática ZT4. La particularidad de este caso es que el cálculo se realiza por fases. Esto es debido a que en estas condiciones térmicas extremas resulta adecuado tener en cuenta en el cálculo los importantes cambios de temperatura que se producen en función de la época del año. Esto en la práctica puede simularse considerando un módulo de Young de la mezcla bituminosa, diferente para cada época del año (ver tabla 5.8 de la Instrucción). Para la composición de resultados se utilizará la ley de Miner.

Se va a dimensionar una sección formada por mezclas bituminosas convencionales en caliente densas o semidensas sobre zahorra artificial. Para el cálculo se utilizará el modelo de la tabla 11.

Tabla 11. Modelo de cálculo de la sección de mezcla bituminosa sobre zahorra en zona climática ZT4

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MBC invierno (3 meses)	9.000	0,30	<i>A definir</i>	Completa
MBC primavera / otoño (6 meses)	6.000	0,33		Completa
MBC verano (3 meses)	3.000	0,35		Completa
ZA	480	0,35	25	Completa
Cimiento	160	0,35	Infinito	-

MBC: Mezcla bituminosa en caliente. ZA: zahorra artificial.

Tabla 12. Resultados del cálculo

Sección	Espesor (cm)	e_r ($\times 10^{-5}$)	e_v (md)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
Época	Espesor MBC (cm)	e_r ($\times 10^{-5}$)	e_v (md)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
Verano (N1)	26	10,40	232	4.919.425	-
Primavera–Otoño (N2)	26	7,31	179	15.114.573	-
Invierno (N3)	26	5,72	150	44.152.644	-

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$). MBC: mezcla bituminosa en caliente.

En primer lugar debe comprobarse que en ninguna época del año se supera la deformación admisible por el cimiento (en este caso 275 md). A continuación, para calcular el número de ejes soportados por la sección, se aplica la Ley de Miner, según la cual, el final de la vida de servicio de la sección se producirá cuando:

$$S (n_i / N_i) = 1$$

siendo:

n_i Número de aplicaciones de la carga tipo sobre la sección de módulo E_i

N_i Vida de fatiga de la sección de módulo E_i

Suponiendo que la sección soportará N_{adm} ciclos de carga, los valores de n_i serían los siguientes:

$$\begin{aligned} n_1 &= N_{\text{adm}}/4 \\ n_2 &= 2 \times N_{\text{adm}}/4 \\ n_3 &= N_{\text{adm}}/4 \end{aligned}$$

Ya que cada año se aplican un cuarto de los ciclos de carga (12/3 meses) sobre la sección con módulo E1 (3.000 MPa), otro cuarto sobre la sección con módulo E3 (9.000 MPa) y la mitad restante sobre la sección con módulo E2

(6.000 MPa).

Por tanto, aplicando la Ley de Miner se obtiene el máximo número de ciclos de carga que admite la sección:

$$\frac{N_{adm}}{4 \times N1} + \frac{N_{adm}}{2 \times N2} + \frac{N_{adm}}{4 \times N3} = \frac{N_{adm}}{4 \times 4,92 \times 10^6} + \frac{N_{adm}}{2 \times 15,11 \times 10^6} + \frac{N_{adm}}{4 \times 4,41 \times 10^7} = 1$$

Resolviendo, se obtiene:

$$N_{adm} = 11.856.283 > TE = 10.603.175$$

Luego la sección cumple el criterio de la mezcla bituminosa con un coeficiente de seguridad en número de ejes, CS, de valor 1,12.

CASO 3

La particularidad principal del dimensionamiento de firmes con tráficos de baja intensidad (T4) es que sólo se comprobará el criterio de fallo del cimiento, salvo que se dispongan capas de cierta rigidez (mezcla bituminosa en caliente en espesor mayor de 5 cm, o materiales tratados con cemento) sobre cimiento de categoría BAJA. Esto es debido a que la flexibilidad de estos firmes hace que los materiales acompañen la deformación del conjunto de la sección.

Se calculará una sección formada por: un tratamiento superficial, una capa de gravaemulsión y una base granular formada por una capa de 25 cm de zahorra artificial. Por consiguiente, sólo se comprobará el criterio de fallo del cimiento. El modelo de cálculo será el definido en la tabla 13.

Tabla 13. Modelo de cálculo de la sección formada por doble tratamiento superficial, gravaemulsión y zahorra artificial

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
DTS	No se considera en el cálculo			
GE	2.500	0,35	A definir	Completa
ZA	300	0,35	25	Completa
Cimiento	100	0,35	Infinito	-

DTS: Doble tratamiento superficial. GE: gravaemulsión. ZA: zahorra artificial.

La máxima deformación vertical unitaria admisible en el cimiento es función de la categoría del tráfico de proyecto en que se encuentre, tal y como se define en la tabla 5.10 de la Instrucción. En este caso, para tráfico T4A, la máxima deformación admisible es de 700 md. Realizando el cálculo con el modelo adjunto y un espesor de la capa de gravaemulsión de 12 cm, se obtiene un valor de la deformación en el cimiento de 676 md, menor que el máximo admisible.

CASO 4

En este caso se va a dimensionar una sección de firme con una capa de suelocemento. Como el firme está apoyado sobre un cimiento tipo BAJO, no bastará con comprobar el fallo del cimiento del firme, sino que se habrá de seguir el procedimiento general.

Se calculará una sección formada por: una capa de mezcla abierta en frío de 4 cm, una capa de zahorra artificial de 20 cm y una capa de suelocemento tipo SC-3. Por consiguiente, se comprobarán tanto el criterio de fallo del suelocemento como el del cimiento. El modelo de cálculo será el definido en la tabla 14.

Tabla 14. Modelo de cálculo de la sección formada por mezcla abierta en frío, zahorra artificial y suelocemento SC-3

Material	Módulo de Young (MPa)	Coef. de Poisson	Espesor (cm)	Adherencia
MAF	4.000	0,35	4	Completa
ZA	600	0,35	20	Completa
SC-3	1.000	0,25	A definir	Completa
Cimiento	60	0,35	Infinito	-

MAF: mezcla abierta en frío. SC-3: suelocemento tipo SC-3. ZA: zahorra artificial.

La máxima deformación admisible en el cimiento es de 700 md. Aplicando la ley de fatiga, del suelocemento tipo SC-3 se obtiene un valor de la tensión admisible de 0,292 MPa. Realizando el cálculo con el modelo adjunto se obtienen los resultados de la tabla 15.

Tabla 15. Resultados del cálculo

Sección	Espesor SC-3 (cm)	e_v (md)	s_r SC-3 (MPa)	$N_{\text{cálculo}}$	C.S. (1)
MAF/ZA/SC-3	16	588	0,285	398818	1,77

(1) C.S.: Coeficiente de seguridad en aplicaciones de carga. Representa la relación entre el número de ejes que soporta la sección antes de fatigarse y el tráfico de proyecto ($N_{\text{cálculo}} / TE$). MAF: mezcla abierta en frío; SC-3: suelocemento tipo SC-3. ZA: zahorra artificial.

En este anejo se presentan una serie de ejemplos de cálculo de firmes con pavimentos de hormigón con la intención de aclarar la metodología propuesta en el capítulo 5 de la Instrucción. Para ello se han elegido cuatro casos representativos que incluyen diversas categorías de tráfico y cimiento, y hormigones para el pavimento con diferentes resistencias a flexotracción.

FACTORES DE DISEÑO

Para el cálculo del tráfico de proyecto se ha considerado un período de proyecto de 30 años en todos los casos y un coeficiente de equivalencia de $CE=1$. Se dimensionarán varios tipos de carreteras cuyos datos de tráfico aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de tráfico

Caso	IMD _{PA}	TE (1)	Tráfico	Carretera
1	1550	31727260	T1	A
2	215	4389593	T2B	A
3	75	1535190	T3B	B
4	30	614076	T4A	B

(1) N° de ejes para un período de proyecto de 30 años, un coeficiente de equivalencia de 1 y una tasa anual de crecimiento del tráfico del 4%.

Se considerarán en el cálculo los factores de diseño indicados en la tabla 2. La categoría de la carretera y del cimiento del firme vienen impuestas en función de la categoría del tráfico de proyecto (ver tablas 4.1 y 5.14 de la Instrucción).

Tabla 2. Factores de diseño

Caso	Tráfico			Cimiento			Clima
	Tráfico	Carretera	N° ejes	Catg.	Última capa	K (MPa/m)	
1	T1	A	31727260	Alto	SC-2	120	ZT2
2	T2B	A	4389593	Alto	S4	110	ZT2
3	T3B	B	1535190	Medio	S4	80	ZT2
4	T4A	B	614076	Bajo	S3	50	ZT2

DIMENSIONAMIENTO DE SECCIONES

En primer lugar se deben caracterizar los materiales del firme, definir el tipo de arcén que se va a disponer (de hormigón u otro material), y cómo se van a unir las losas (juntas con o sin pasadores). El cálculo se realizará para varias de estas posibilidades.

Según se define en el apartado 8.3 de la Instrucción, para el pavimento se podrá utilizar: hormigón tipo HP-45 o HP-40 para tráfico T2 o superiores, y hormigón tipo HP-40 o HP-35 para tráfico T3 o inferiores. En este caso, se

empleará el tipo HP-45 para los casos 1 y 2, el tipo HP-40 para el caso 3, y el tipo HP-35 para el caso 4. Las resistencias a flexotracción a largo plazo vienen definidas en la tabla 5.14 de la Instrucción. Para HP-45 es de 4,95 MPa, para HP-40 es de 4,40 MPa, y para HP-35 es de 3,85 MPa.

Para el dimensionamiento se seguirá el procedimiento descrito paso a paso en el capítulo 5 de la Instrucción, comprobando en todos los casos los criterios de fallo del pavimento, por erosión y por fatiga. En la tabla 3 se muestran los resultados del cálculo. Hay que tener en cuenta que la utilización de pasadores en las juntas viene impuesta en función de la categoría del tráfico (apartado 4.4.3 de la Instrucción). En concreto, para el caso 1 las juntas irán provistas de pasadores (tráfico T1) no así para el resto de los casos. Finalmente, se elegirá el espesor del pavimento más restrictivo, y en aquellos casos en que sea posible, se tanteará la solución con una subbase de 15 cm de hormigón magro o gravacemento. En este último caso se rabajará el espesor de la losa del pavimento en 5 cm.

Tabla 3. Resultados del dimensionamiento de firmes rígidos

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Datos generales				
Tráfico de proyecto	31.727.260	4.389.593	1.535.190	614.076
Categoría de tráfico	T1	T2B	T3B	T4A
Categoría de la carretera	A	A	B	B
Coefficiente de balasto, K (MPa/m)	120	110	80	50
Tipo de hormigón / R_{FLP} (MPa)	HP-45 / 4,95	HP-45 / 4,95	HP-40 / 4,40	HP-35 / 3,85
Criterio de fatiga				
Relación entre tensiones, RS	0,221	0,255	0,315	0,331
Tensión equivalente, SE	1,094	1,262	1,386	1,274
Factor de corrección de tensiones, FCS	0,930	0,945	1,000	1,090
Tensión equivalente corregida, SEC	1,176	1,336	1,386	1,169
Espesor del pavimento (CAH) en cm.	22	20	20	22
Espesor del pavimento (SAH) en cm.	25	23	22	25
Criterio de erosión				
Factor de erosión, FE (CAH)	2,09	2,20	2,39	2,49
Factor de erosión, FE (SAH)	2,27	2,50	2,77	2,91
Factor de corrección de erosión, FE (CAH)	0,982	0,990	1,000	1,017
Factor de corrección de erosión, FE (SAH)	0,993	0,992	1,000	1,015
Factor de erosión corregido, FEC (CAH)	2,128	2,22	2,390	2,448
Factor de erosión corregido, FEC (SAH)	2,286	2,52	2,770	2,867
Espesor del pavimento (CAH) en cm.	25	28	24	23
Espesor del pavimento (SAH) en cm.	30	31	25	24
Resultados				
Espesor de cálculo del pavimento (CAH) en cm.	25 (ps)	28	24	23
Espesor de cálculo del pavimento (SAH) en cm.	30 (ps)	31	25	25
Espesor del pavimento (SAH) con subbase de 15 cm HM ó GC.	25 (ps)	26	-	-

CAH: con arcén de hormigón; SAH: sin arcén de hormigón. HM: hormigón magro; GC: gravacemento; ps: juntas con pasadores.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Técnica de Carreteras. *Manual de capacidad de carreteras*. "Highway capacity manual, 1994". Special Report 209, 3ª edición. Transportation Research Board (TRB). Madrid, 1995.
- [2] Heras. R. *Manual de Ingeniería de regadíos*, Ministerio de Fomento. Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid, 1981.
- [3] Junta de Andalucía. Dirección General de Carreteras. Banco Oficial de Precios.
- [4] Junta de Andalucía. Dirección General de Carreteras. Circular 6/95 *Redacción de Proyectos de Construcción de Carreteras*. Sevilla, 1995.
- [5] Junta de Andalucía. Dirección General de Carreteras. *Plan General de Aforos de Andalucía*. Edición anual.
- [6] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Orden Circular 323/97 T. *Recomendaciones para el proyecto de actuaciones de rehabilitación estructural de firmes con pavimento bituminoso*. Madrid, 1997.
- [7] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. CEDEX. Centro de Estudios de Carreteras. Normas NLT. I. Ensayos de Carreteras. Madrid, 1992.
- [8] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. CEDEX. Centro de Estudios de Carreteras. Normas NLT. II. Ensayos de Suelos. Madrid, 1992.
- [9] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Refuerzo de Firmes. Instrucción de Carreteras. Norma 6.3. IC. Madrid, 1980.
- [10] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Secciones de Firme. Instrucción de Carreteras. Norma 6.1. y 2. IC. Madrid, 1990.
- [11] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Drenaje Superficial. Instrucción de Carreteras. Norma 5.2. IC. Madrid, 1990.
- [12] Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3/75, O.M. de 31 julio 1986, O.M. de 21 de enero de 1988, O.M. de 8 de mayo de 1989, O.M. de 28 de septiembre de 1989, O.C. 297/88 T, O.C. 299/89 T, O.C. 311/90 CyE, O.C. 322/97 T y O.C. 325/97 T)"
- [13] Ortega Sada. J. L. *Manual de explotaciones agrícolas*, Mapa. Madrid, 1983.
- [14] Portland Cement Association (PCA). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. 1984.

BIBLIOGRAFÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES

- 4th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements. Proceedings August 22 through 26, 1977, Horace H. Rackham Building, Lecture Hall, The University of Michigan. Ann Arbor, Michigan : The University, 1977.
- 5th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements. Proceedings August 23, 1982 through August 26, 1982, The Delf University of Technology, The Netherlands / Primary sponsor: The study Centre for Road Construction, The Netherlands 1982.
- 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements. Proceedings July 13 through 17, 1987, Horace H. Rackham Building, Lecture Hall, The University of Michigan. Ann Arbor, Michigan : The University, 1987.
- 7th International Conference on Asphalt Pavements (1992, Nottingham). *Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements: [held in Nottingham 16th-20th August 1992]*. Austin, Texas : International Society of Asphalt Pavements, cop. 1992.
- Asphalt Institute. *Thickness design-asphalt pavements for highways & streets*, manual series nº.1, 1991.
- ASSHTO. *Guide for design of pavement structures*. Washington, 1993.
- Burmister, D. M. *The theory of stresses and displacements on layered systems and application to the design of airport runways*. Proceedings, HRB, Vol. 23, 1943.
- Croney, D. & Croney, P. *Design and performance of road pavements, 3rd edition*. McGraw-Hill, 1997.
- Huyang, Y.H. *Pavement analysis and design*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1993.
- LCPC-SETRA. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique*. Décembre, 1994.

- Shell. *Shell pavement design manual. Asphalt pavements and overlays for road traffic*. Shell international Petroleum. London, 1978.
- Ullitdz, P. *Pavement analysis*. Elsevier science. New York, 1987.
- Westergaard, H. M. *Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis*. Public Roads, Vol. 7, 1926.
- Yoder, E.J. & Witzak, M.W. *Principles of pavement design, 2nd edition*. John Wiley & Son, Inc. New York, 1975.

© Junta de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes
Coordina la edición: Servicio de Publicaciones. Ana Flores
Nº de Registro: JOAP/ CR-06-2003
ISBN: 84-8095-329-2
Diseño y maquetación: Kaplan Diseño e Internet
Impresión: Gráficas La Madraza
Depósito Legal: GR-1141-2003

INSTRUCCIÓN para el diseño de firmes de la red de carreteras
de Andalucía / Dirección General de Carreteras.-Sevilla: Consejería de
Obras Públicas y Transportes, 2003.

176 p.:graf.,tabl.; 30 cm.

ISBN: 84-8095-329-2

1. Instrucciones y Recomendaciones para Carreteras - Andalucía - España
2. Normas Técnicas 3. Firmes y Pavimentos de Carreteras
- I. Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transportes
- II. Andalucía, Dirección General de Carreteras

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos sin el permiso previo y por escrito, de la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía.

