



Junta de
Castilla y León

2004

Recomendaciones de proyecto y construcción de

firmes y pavimentos

Recomendaciones de proyecto y construcción de
firmes y pavimentos

2004



**Junta de
Castilla y León**

Consejería de Fomento
Dirección General de Carreteras
e Infraestructuras

Dirección: Luis Alberto Solís Villa

Redacción: Miguel Ángel del Val Melús
Jesús Díaz Minguela
Luis Alberto Solís Villa

Diseño Gráfico: 4C Comunicación
C/ Padilleros, 20, 1º C
37002 Salamanca
Telf.: 923 26 31 39

Impresión: Imprenta KADMOS

Deposito Legal:

Valladolid, abril de 2004

Presentación

En 1996, la Consejería de Fomento editó las primeras Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos, con el fin de adaptar la Instrucción 6.1 y 2 IC de secciones de firme de 1989 a las necesidades reales de las carreteras competencia de la Comunidad Autónoma y a sus marcos presupuestarios, bastante diferentes de las características físicas y de tráfico de las de titularidad estatal.

Las Recomendaciones de 1996 demostraron, ante todo el carácter marcadamente innovador de la Consejería de Fomento, por cuanto no había antecedentes similares en ninguna otra Comunidad Autónoma ni Administración de ámbito geográfico semejante.

Especialmente significativo fue la importancia atribuida a la explanada como cimiento del firme, configurándose unas soluciones completamente nuevas para la formación de las mismas, dándose una atención preferente a la solución de estabilización de los suelos.

El camino abierto y el éxito de la iniciativa hicieron que la experiencia fuera continuada posteriormente por otras Comunidades Autónomas, utilizando las Recomendaciones como modelo para elaborar documentos de carácter análogo.

Ocho años después, siguiendo esa línea innovadora y con la madurez acumulada en este tiempo que ha permitido conocer mejor las necesidades reales de nuestra red, atendiendo a la evolución tecnológica de los materiales y los nuevos sistemas específicos constructivos de pavimentación, la Consejería de Fomento vuelve a erigirse en punta de lanza técnica, avanzando un paso por delante con la elaboración de este nuevo documento.

En él se actualizan las secciones de firmes, optimizando la capacidad estructural a las condiciones económicas y ambientales de nuestra región; se regulan, asimismo, nuevas técnicas en las que la Consejería de Fomento tiene amplia experiencia aplicada en la red regional de Carreteras, como la construcción 'in situ' del suelocemento o la rehabilitación de pavimentos mediante el reciclado de firmes; se recogen sugerencias para la redacción de especificaciones que puedan introducirse en los pliegos de los proyectos y se optimizan los recursos existentes para mantener nuestras carreteras en un adecuado estado de calidad, seguridad y comodidad.

Para finalizar, me gustaría añadir que estas Recomendaciones, del mismo modo que las de 1996, persiguen un único objetivo: optimizar el empleo de los recursos para sacar el máximo rendimiento de los mismos, buscando la solución más idónea para cada problema.

Antonio Silván Rodríguez
CONSEJERO DE FOMENTO

Agradecimientos

Este documento ha sido elaborado por:

- Miguel Ángel del Val Melús
- Jesús Díaz Minguela
- Luis Alberto Solís Villa

Además, en ésta o anteriores ediciones han colaborado los siguientes técnicos:

- Alberto Bardesi Orúe-Echevarría (Repsol-YPF)
- José Calleja Carrete (IECA, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)
- Carlos Fernández Calvo (Junta de Castilla y León)
- Carlos Jofré Ibáñez (IECA, Instituto Español de Cemento y sus Aplicaciones)
- Miguel López-Bachiller Fernández (Soltec, S.A.)
- Pablo Sáez Villar (Conservación de viales, S.A.)
- Ángel Sampedro Rodríguez (ANCADE, Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España)

Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos

Actualización 2004

Indice

1. Objeto y ámbito de aplicación.	7
2. La red de carreteras de la Junta de Castilla y León.	11
3. El medio físico: geografía, geología y clima.	27
4. Análisis del tráfico.	41
5. El cimiento del firme.	49
6. Materiales y unidades de obra.	57
7. Secciones de firme de nueva construcción.	185
8. Rehabilitaciones superficiales y estructurales.	193
9. Ensanches.	199

Anejos

A1. Normativa de referencia	203
A2. Características mecánicas de los materiales del catálogo de secciones de firme	207
A3. Determinación del plazo de trabajabilidad de los materiales tratados con cemento	211

Capítulo 1



Objeto y ámbito de aplicación

Las presentes *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos* pretenden constituir una guía para proyectistas y directores de obra en todas las actuaciones de carreteras dependientes de la Consejería de Fomento de la Junta de Castilla y León. Por extensión, pueden servir también para actuaciones del mismo tipo dependientes de administraciones de ámbito geográfico más restringido dentro de la misma región. Las actuaciones a las que se hace referencia no son solamente carreteras de nueva construcción, sino también acondicionamientos de todo tipo: correcciones de trazado, ensanches y rehabilitaciones estructurales.

Cuando en 1989 se publicó la *Instrucción 6.1 y 2 IC de secciones de firme* hubo un consenso generalizado sobre la mejora que se producía en la concepción general de los firmes. Sin embargo, esa mejora respondía fundamentalmente a las necesidades que había en ese momento en el ámbito de actuación del Ministerio de Obras Públicas y era posible llevarla efectivamente a cabo en la medida en que un determinado marco presupuestario lo permitía. Sin embargo, la situación en la mayoría de las comunidades autónomas era algo diferente, tanto porque lo eran sus necesidades de actuación y sus respectivos marcos presupuestarios, como por el hecho de que la mayor parte de las carreteras bajo su competencia tienen unas características físicas y soportan unos tráfico muy distintos que en la red estatal. En consecuencia, ya desde 1989 se ha planteado permanentemente cómo poder adaptar la *Instrucción* a unas realidades algo diferentes a las que originaron su desarrollo.

Los trabajos que han conducido a esta publicación fueron iniciados en 1992 y han tenido en cuenta tanto la experiencia general en la aplicación de la *Instrucción* como la propia experiencia de la Consejería de Fomento en el proyecto y construcción de nuevas carreteras y de acondicionamientos.

Dado el actual marco de reparto de competencias entre el Estado y las Comunidades Autónomas, este documento carece necesariamente de carácter normativo en sentido estricto, no pudiendo por tanto considerarse como sustitutivo ni de la *Instrucción 6.1 y 2 IC de secciones de firme* de la Dirección General de Carreteras (MOPU, 1989) ni del Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes.

Con relación al primero de estos dos documentos de carácter estatal, las presentes recomendaciones tienen un carácter complementario y ofrecen al proyectista una serie de consideraciones que le pueden servir para mejor adaptar su trabajo a la realidad de la Comunidad Autónoma de Castilla y León. Independientemente de que siempre pueda ser una referencia válida que el proyectista puede voluntariamente tener en cuenta, las correspondientes órdenes de estudio y pliegos de base podrán señalar la obligatoriedad de utilizar en todo caso esta referencia y la manera de hacerlo.

Respecto al Pliego, aquí se recogen sugerencias para la redacción de especificaciones que deberán ser recogidas en cada caso en los Pliegos de prescripciones técnicas particulares de los proyectos. Análogamente a lo ya señalado, las órdenes de estudio y los pliegos de base podrán señalar la obligatoriedad de tener en cuenta este documento en la redacción de los pliegos de los proyectos.

Capítulo 2



La red de carreteras de la
Junta de Castilla y León

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Por Real Decreto 956/1984, de 11 de abril, de transferencia de funciones y servicios a la Comunidad Autónoma de Castilla y León en materia de carreteras, se transfirieron a esta Comunidad las carreteras nacionales en la región que se consideró que no debían formar parte de los itinerarios de interés general del Estado, constituyéndose así la primera red autonómica. Cuando se redactó el Plan Regional de 1992 se realizó un inventario de la red de titularidad de la Comunidad Autónoma, resultando una longitud total de 11.599,9 km.

La Ley 2/1990, de 16 de marzo, de Carreteras de la Comunidad Autónoma de Castilla y León establece que:

- Debe transferirse a las Diputaciones Provinciales y a los Ayuntamientos la titularidad de las carreteras de la red regional que tengan una función y atiendan una demanda esencialmente local (Disposición adicional primera).
- Debe promoverse la incorporación a la red de carreteras de la Junta de las vías provinciales y municipales que formen parte de itinerarios de interés regional, y en general las transferencias de titularidad entre Administraciones que mejoren la funcionalidad y explotación de la red viaria (Disposición adicional segunda).

En cumplimiento de las disposiciones anteriormente indicadas, en el período 1996-2002 se ha llegado a acuerdos de cambio de titularidad con las Diputaciones Provinciales y con algunos Ayuntamientos que han supuesto la transferencia de algunas carreteras a las Corporaciones Locales, así como la incorporación de otras a la Red Autonómica, de acuerdo con lo que se indica en la tabla 2.1.

TABLA 2.1 Cambios de titularidad de carreteras

Provincia	Longitud (km)	
	Incorporaciones a la Red Autonómica	Transferencias a las corporaciones locales
Ávila	7,7	1,3
Burgos	111,8	122,4
León	319,3	269,3
Palencia	72,0	71,6
Salamanca	100,7	115,0
Segovia	21,2	28,1
Soria	123,4	207,2
Valladolid	49,1	67,0
Zamora	85,1	86,1
TOTAL	890,3	968

Las redes de carreteras de Castilla y León, como consecuencia de la gran extensión del territorio, la baja densidad de población y el elevado número de núcleos de población, tienen en total una gran longitud y supone una alta dotación por habitante.

- La longitud global supera los 33.000 km, representando un 20% del total nacional y siendo la más extensa de las redes de las Comunidades Autónomas.
- La dotación territorial es de 0,35 km/km², un poco superior a la media nacional (0,31 km/km²).
- La dotación por habitante es de 13,84 km/1.000 habitantes, siendo la más alta de España y muy superior a la media.

La Red de Carreteras del Estado en Castilla y León tiene una longitud aproximada de 4.800 km, lo que supone el 14,5% de los 33.000 km que constituyen el total de las redes de la región. Por su parte, las carreteras gestionadas por las Diputaciones Provinciales, con una longitud próxima a los 17.000 km, se caracterizan sobre todo por una utilización media muy baja, con un valor medio de las intensidades medias diarias (IMD) inferior a 180 vehículos.

2. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Las modificaciones que se han producido en la red autonómica de carreteras obligan a una nueva distribución entre las dos redes, básica y complementaria, que fija la Ley 2/1990, de 16 de marzo, de Carreteras de la Comunidad Autónoma.

Los criterios con que se realiza la nueva distribución, de acuerdo con el Plan Regional Sectorial de Carreteras 2002-2007, son los siguientes:

1. La Red Básica debe constituir, junto con la Red de Carreteras del Estado, la Red fundamental de la Comunidad Autónoma, y como tal debe satisfacer las siguientes condiciones:
 - a) Servir al tráfico de largo recorrido a través del territorio de la Comunidad.
 - b) Asegurar la comunicación entre los principales centros de población de Castilla y León.
 - c) En las zonas limítrofes debe conectar con carreteras clasificadas como básicas o primarias en la red de la Comunidad Autónoma correspondiente.
2. La Red Complementaria está formada por las carreteras de la red regional no clasificadas como básicas. Es una red de una gran longitud y con tráficos muy desiguales; por ello, se establecen en ella dos categorías:
 - 2.1. Red Complementaria Preferente, formada por las carreteras que conectan todas las cabeceras comarcales y los núcleos de población superior a 1.500 habitantes, entre sí y con la Red Básica.
 - 2.2. Red Complementaria Local, formada por carreteras que sirven al tráfico de corto recorrido, aunque con una función un poco más general que la puramente local de las redes provinciales de las Diputaciones.

La Red Complementaria Local incluye así mismo tramos de pequeña longitud y sin ninguna función propia de carreteras, tales como travesías sustituidas por variantes, accesos a estaciones de ferrocarril sin tráfico ferroviario y otros tramos sin práctica utilización por circunstancias diversas. Estos tramos totalizan una longitud de 177,7 km.

La Red Básica y la Red Complementaria Preferente constituyen lo que en el Plan Regional 2002-2007 se denomina "Red Principal".

Aplicando los criterios anteriores queda establecida una Red Básica en la que están incluidas las carreteras de mayor tráfico, las que desempeñan un papel más significativo en la articulación territorial y las conexiones más importantes con:

- Portugal, desde Salamanca por Vitigudino y la Fregeneda y desde Zamora por Bermillo de Sayago y Fermoselle.
- Asturias, desde Ponferrada por Villablino y desde Riaño por el puerto de Tarna.
- Cantabria, desde Cervera de Pisuerga por el puerto de Piedrasluengas.
- El País Vasco, por el Valle de Mena.
- Aragón, desde Almazán por Monteagudo de las Vicarías.
- Castilla-La Mancha, desde Soria y Almazán por Barahona.
- Madrid, desde Segovia por el puerto de Navacerrada y desde Ávila por Las Navas del Marqués.
- Extremadura, por la carretera del Valle del Tiétar y desde Ciudad Rodrigo por el Puerto de Perales.

La longitud de cada una de las redes indicadas anteriormente (Básica, Complementaria Preferente y Complementaria Local) se indica en la tabla 2.2.

TABLA 2.2 . Longitud de las carreteras autonómicas de Castilla y León por clase de red

Provincia	Longitud (km)			
	Básica	Complementaria Preferente	Complementaria Local	Total
Ávila	228,3	411,7	361,7	1.001,7
Burgos	311,6	768,0	759,9	1.839,5
León	483,4	752,2	564,0	1.799,6
Palencia	358,1	398,9	795,4	1.552,4
Salamanca	262,5	615,3	391,1	1.268,9
Segovia	236,5	254,5	294,6	785,6
Soria	216,7	414,8	288,9	920,4
Valladolid	258,3	376,8	472,4	1.107,5
Zamora	201,1	467,1	484,6	1.152,8
TOTAL	2.556,5	4.459,3	4.412,6	11.428,4

3. DENOMINACIÓN Y NUMERACIÓN DE LAS CARRETERAS

La nueva denominación y numeración de las carreteras de la Red de titularidad de la Comunidad Autónoma se realiza con arreglo a los siguientes criterios:

- La Red Básica se identifica con el símbolo CL (Castilla y León), seguido de un número de tres cifras.

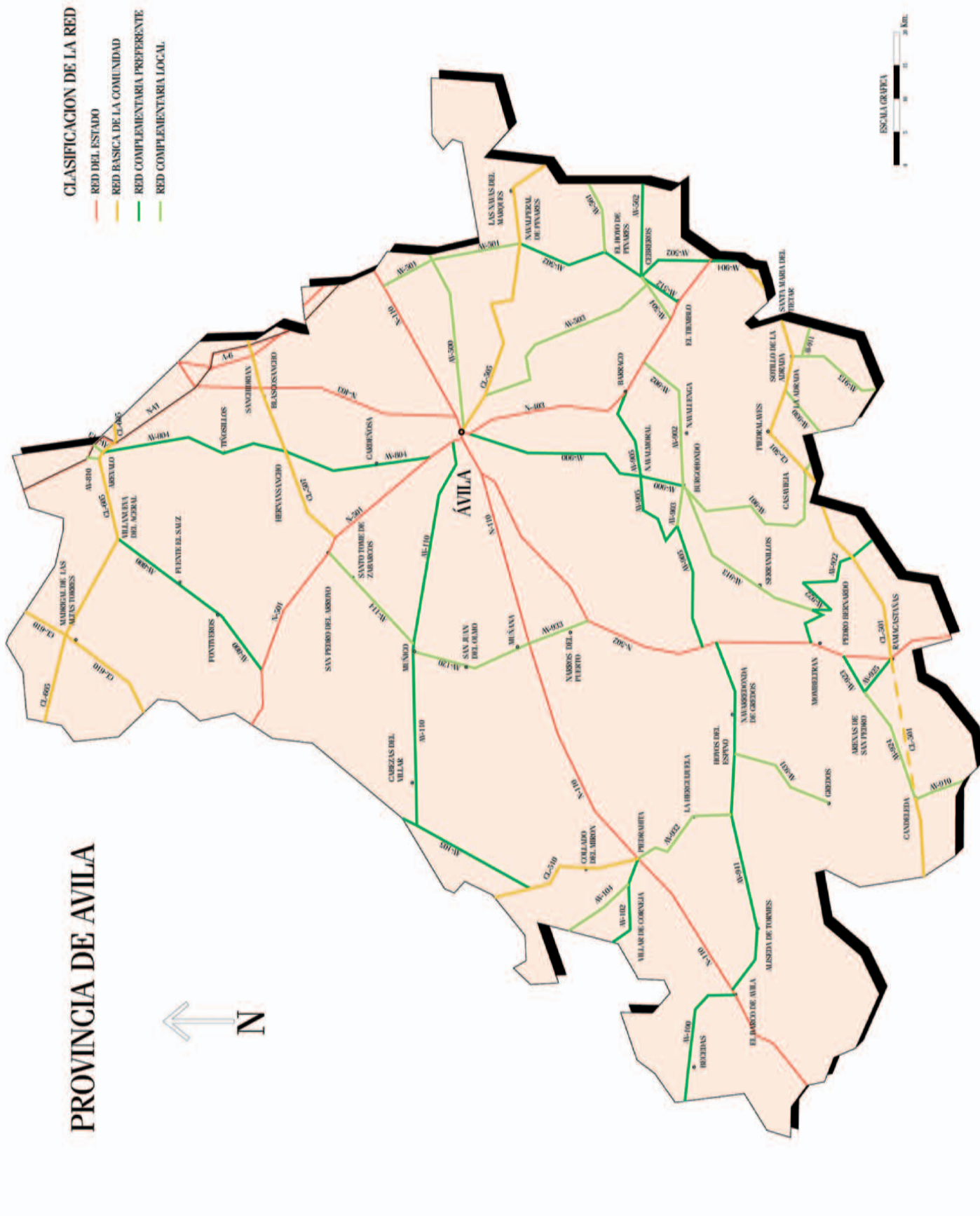
- La Red Complementaria se identifica con las letras correspondientes a la provincia respectiva, seguidas de un número de tres cifras que las diferencie.

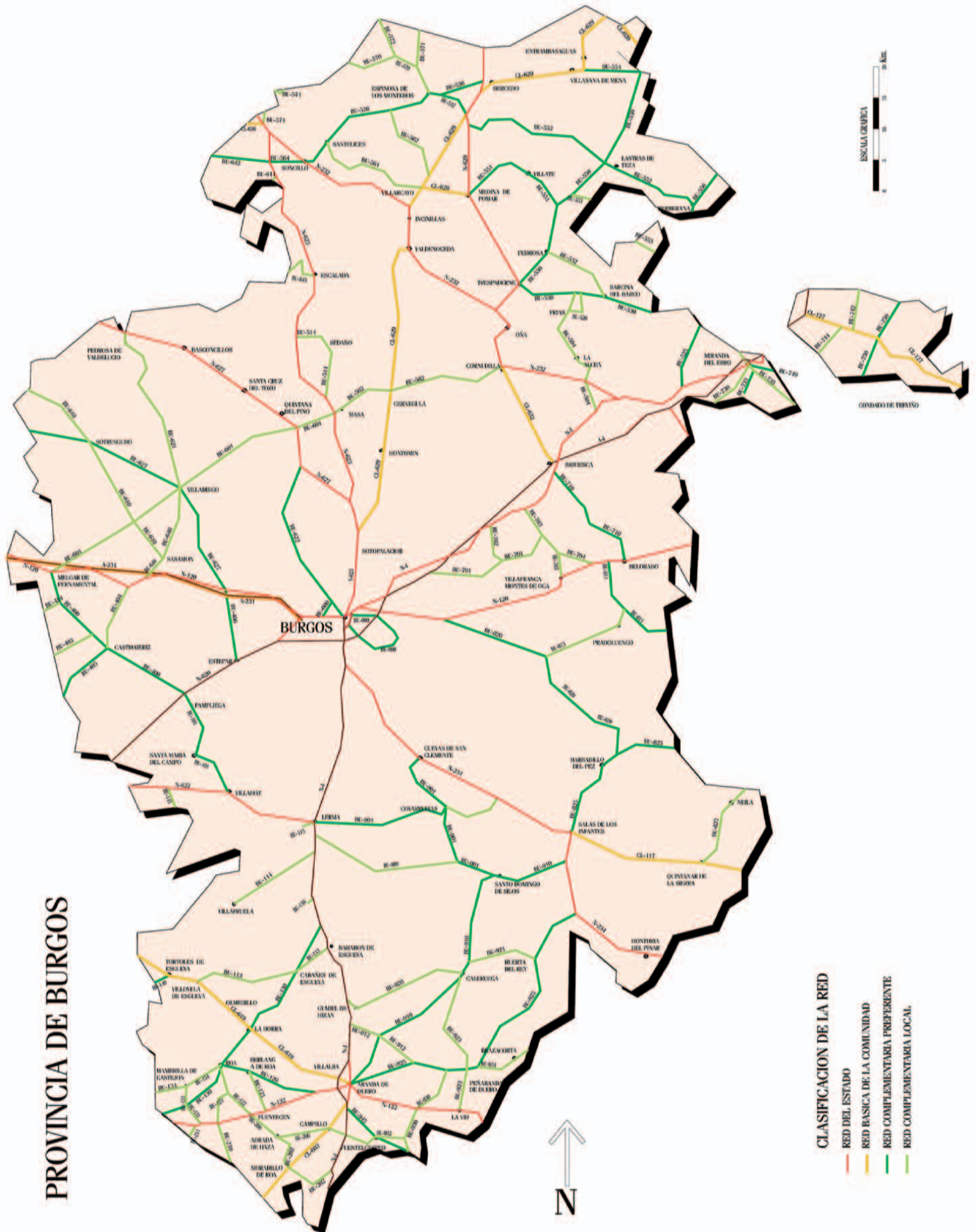
El número que sigue al símbolo de identificación se elige manteniendo el criterio de sectores utilizado en su día para la numeración tradicional, asimilando las carreteras integradas en la Red Básica a las antiguas carreteras comarcales y las de la Red Complementaria a las antiguas carreteras locales.

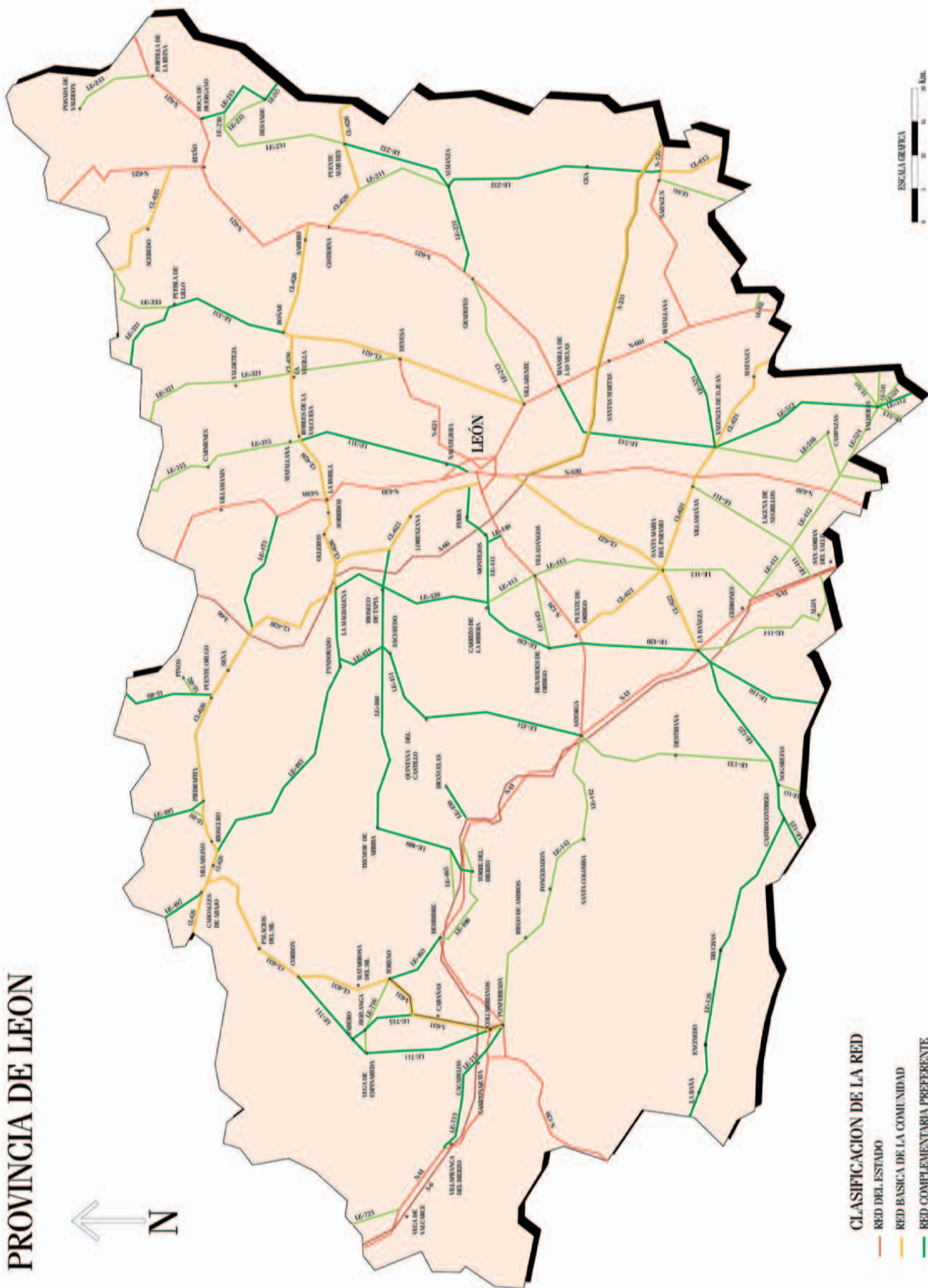
Los tramos de la Red Complementaria Local sin función propia como carreteras, a los que antes se ha hecho referencia, no son objeto de nueva numeración y denominación.



FIGURA 2.1 . Mapas provinciales de la red de carreteras de Castilla y león (Fuente: Plan Regional, 2003)







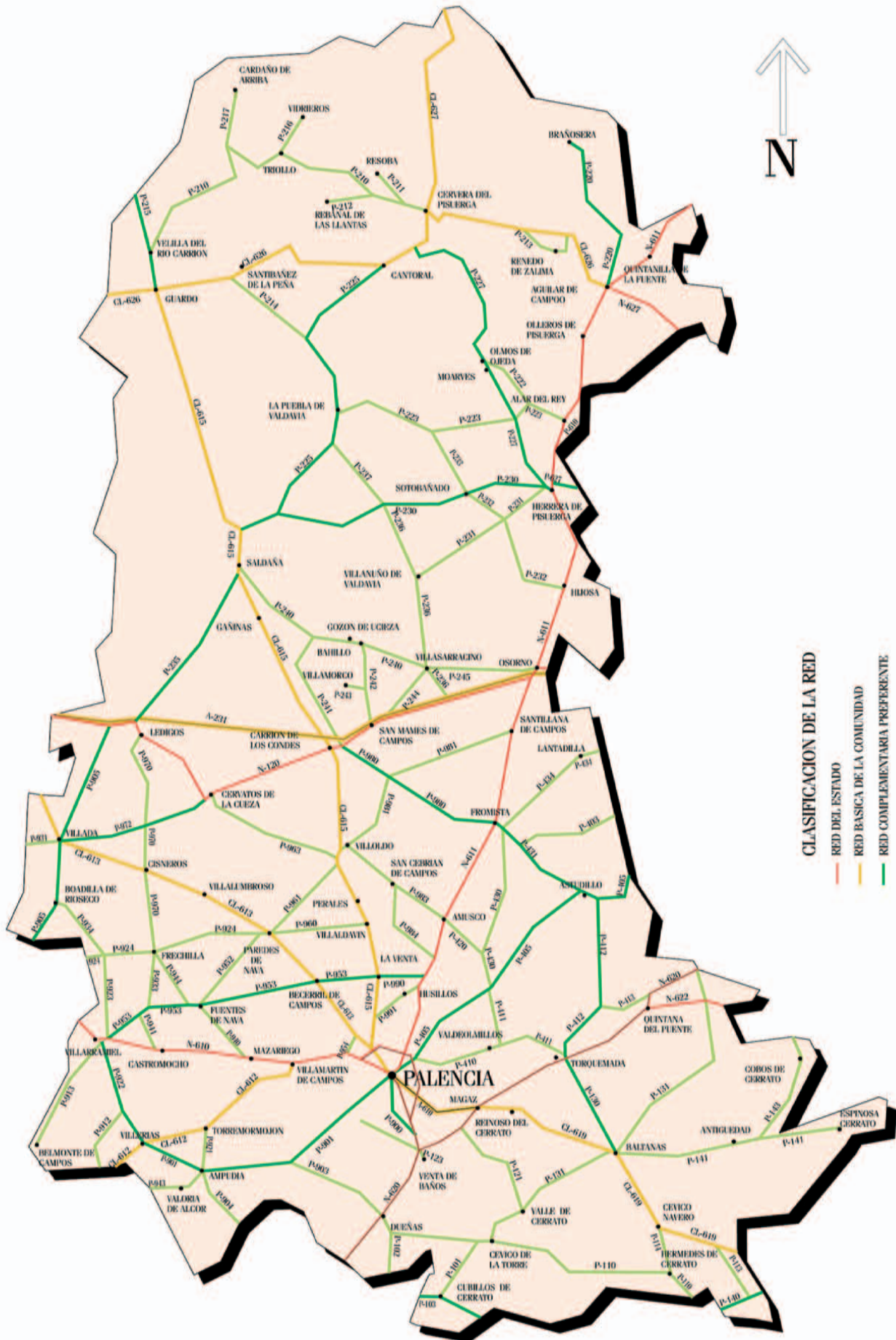
PROVINCIA DE LEON



- CLASIFICACION DE LA RED**
- RED DEL ESTADO
 - RED BASICA DE LA COMUNIDAD
 - RED COMPLEMENTARIA PREFERENTE
 - RED COMPLEMENTARIA LOCAL

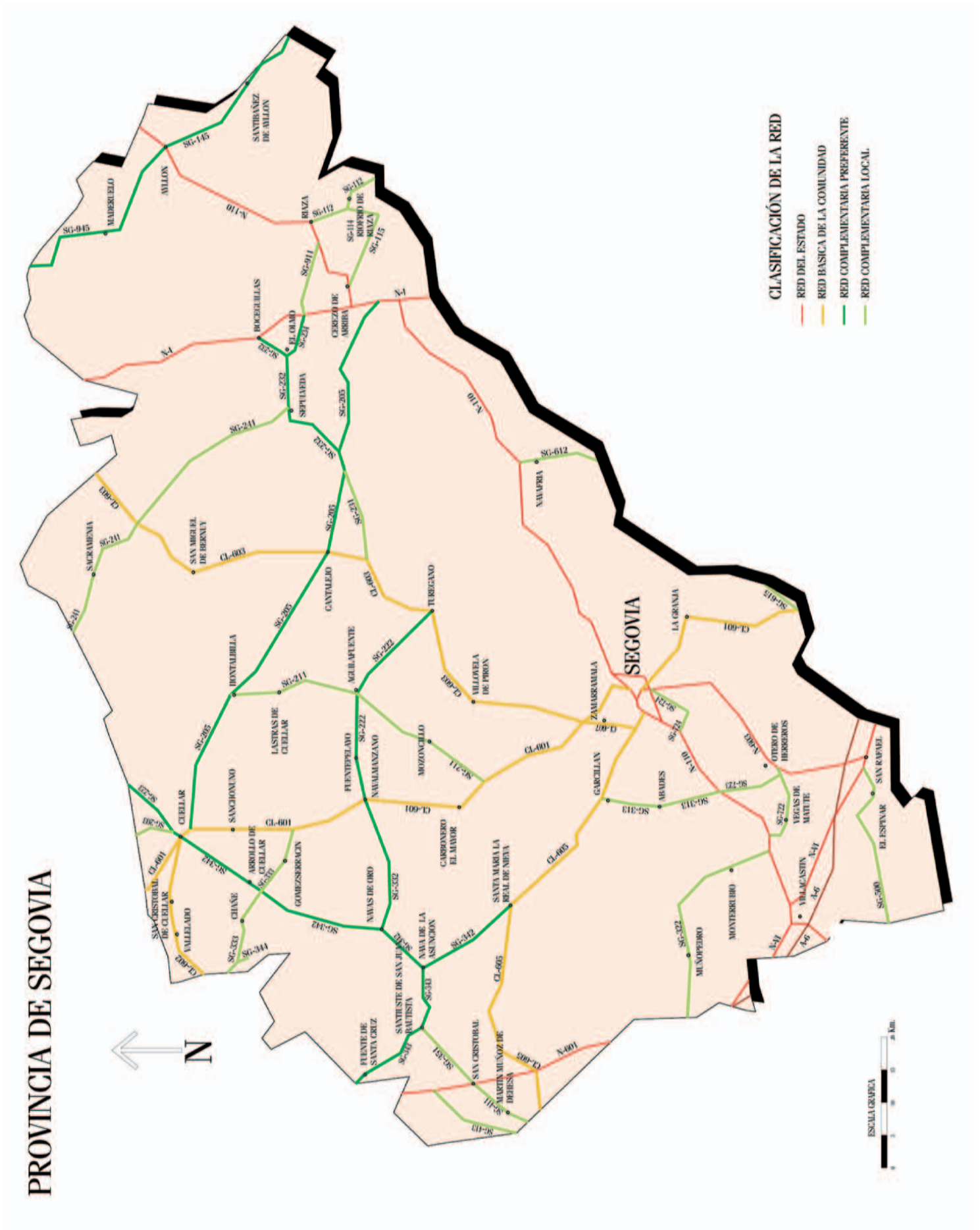


PROVINCIA DE PALENCIA

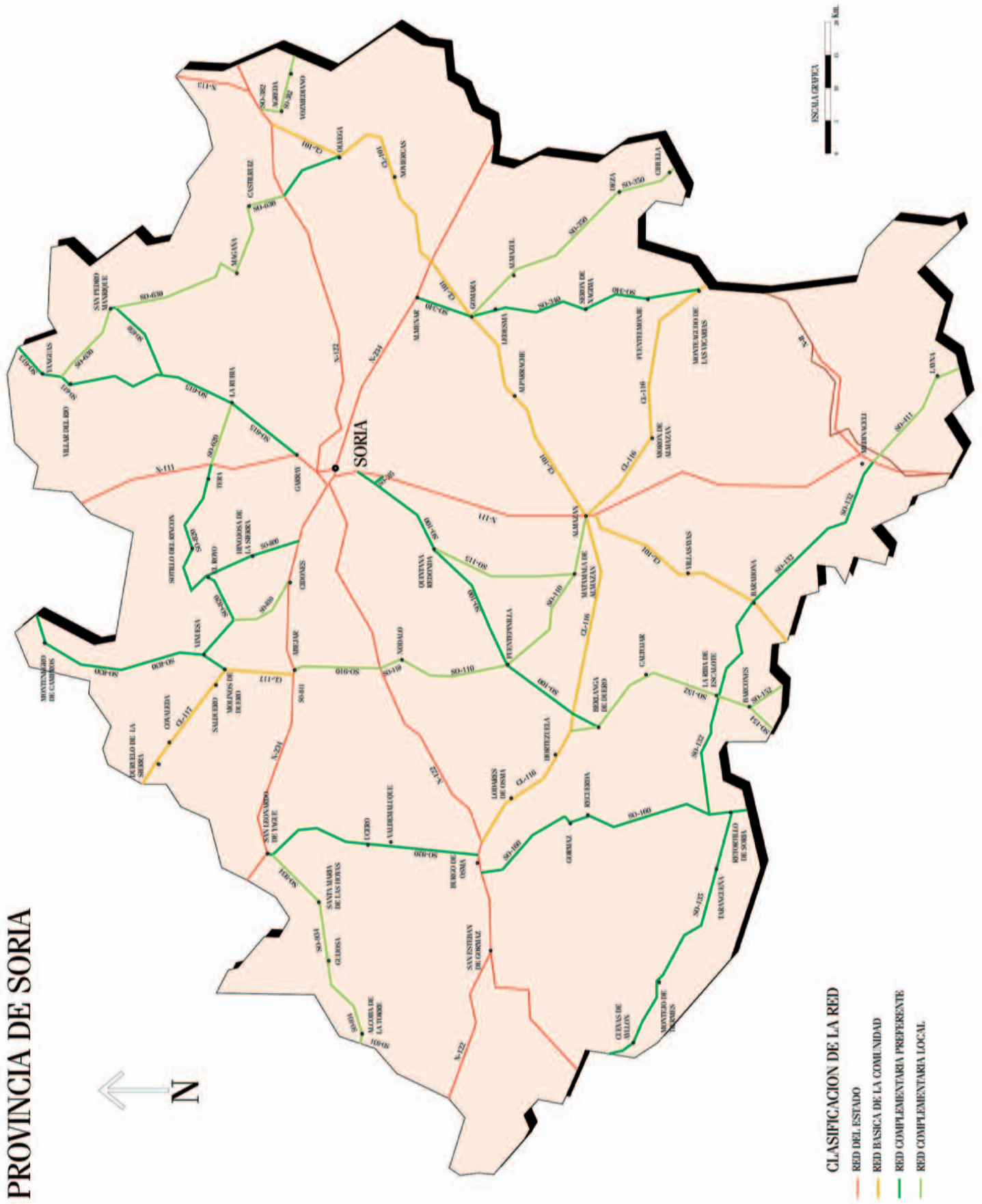


CLASIFICACION DE LA RED

- RED DEL ESTADO
- RED BASICA DE LA COMUNIDAD
- RED COMPLEMENTARIA PREFERENTE
- RED COMPLEMENTARIA LOCAL

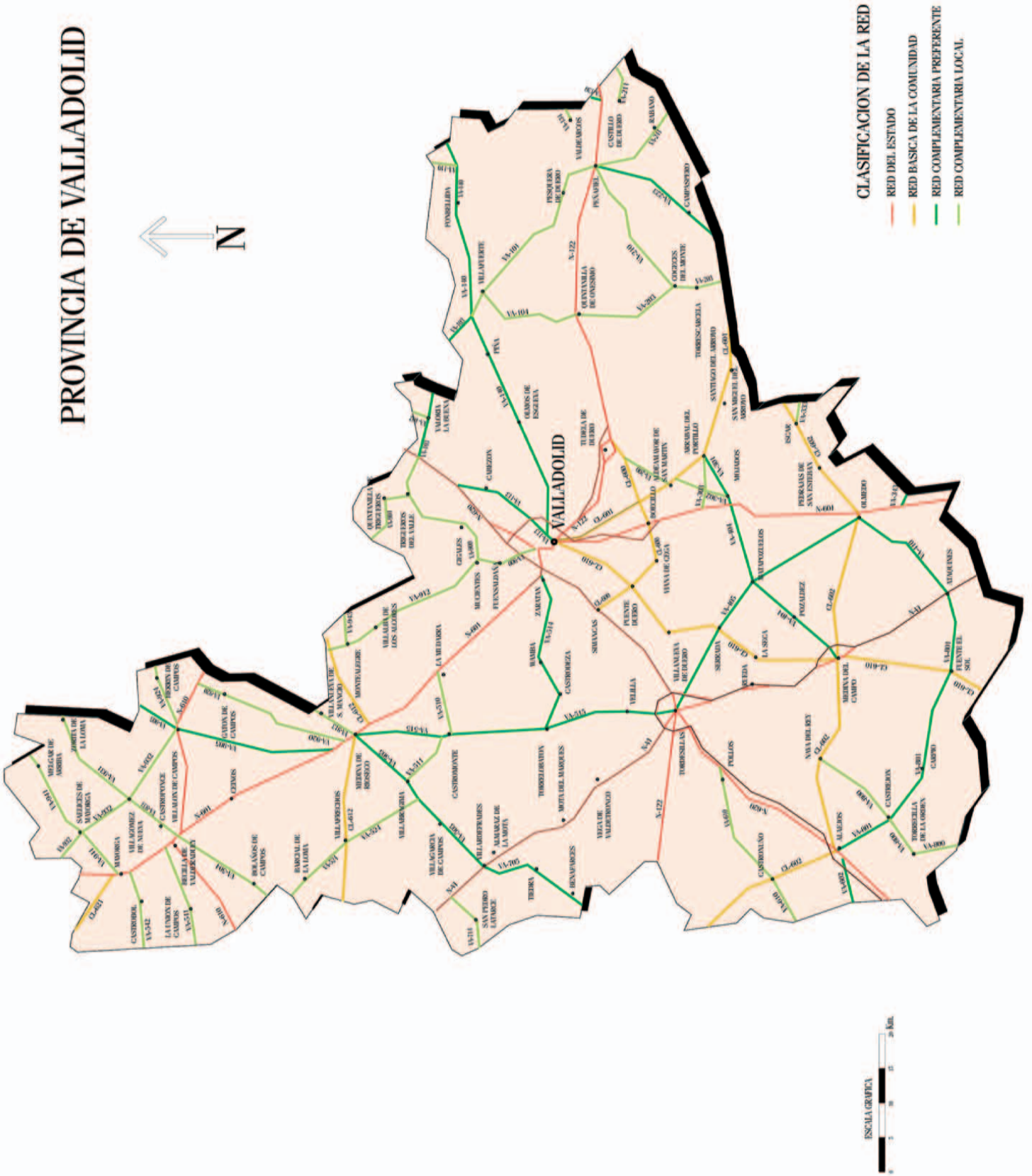


PROVINCIA DE SORIA

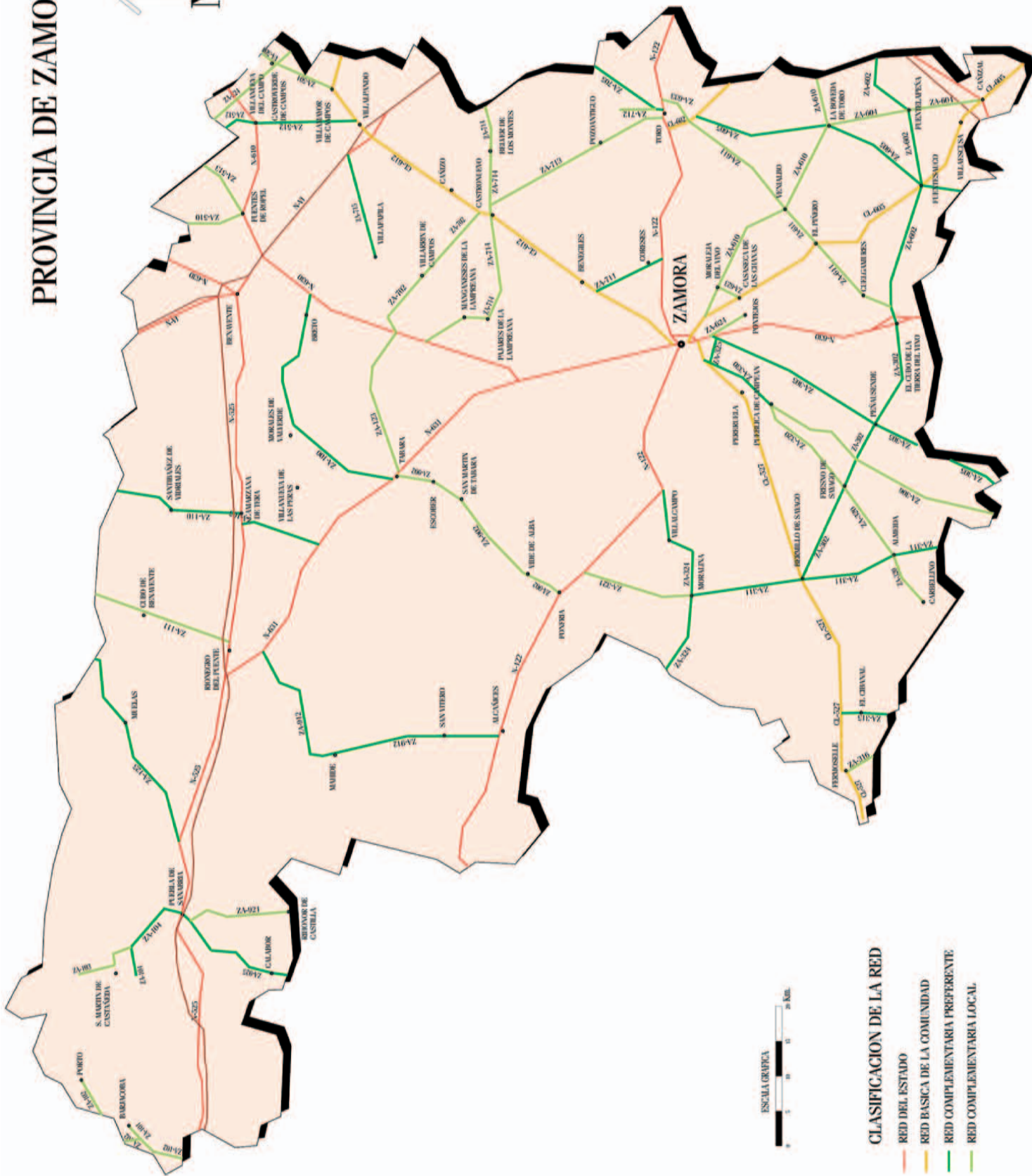


- CLASIFICACION DE LA RED**
- RED DEL ESTADO
 - RED BASICA DE LA COMUNIDAD
 - RED COMPLEMENTARIA PREFERENTE
 - RED COMPLEMENTARIA LOCAL

PROVINCIA DE VALLADOLID

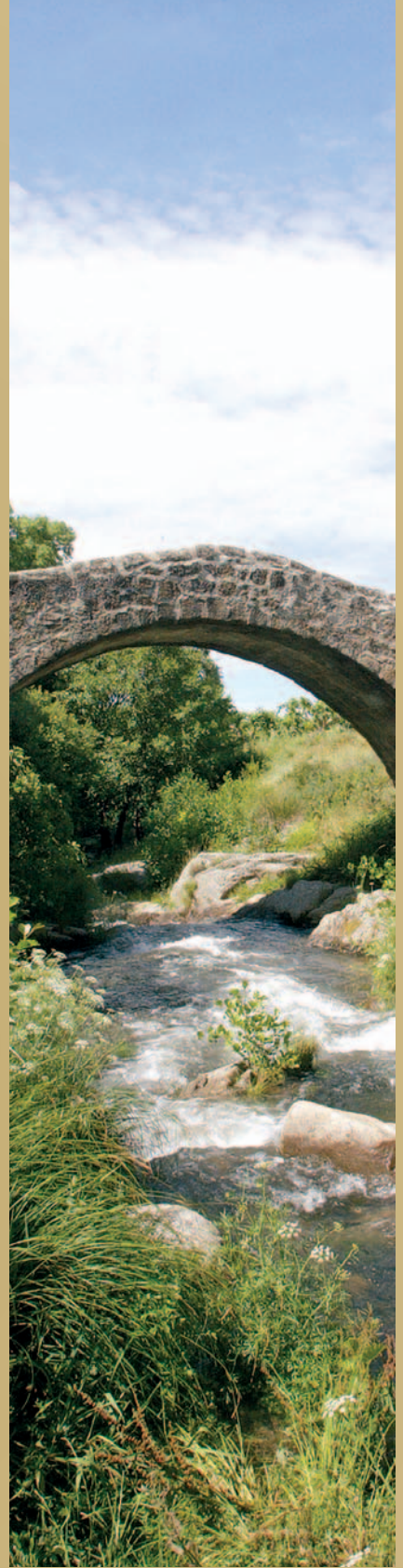


PROVINCIA DE ZAMORA



Capítulo 3

El medio físico: geografía, geología y clima



1. ORIGEN Y CONFIGURACIÓN

Geográficamente, puede considerarse la región castellano-leonesa como una altiplanicie limitada por cadenas montañosas que coincide a grandes rasgos con la cuenca del río Duero. Hay una correspondencia asimismo con la configuración geológica de la región: está constituida por materiales recientes terciarios y cuaternarios, dispuestos en estratos subhorizontales que descansan sobre un zócalo de materiales más antiguos, plegados y fracturados, constituyendo el conjunto una cubeta o fosa tectónica.

Dicha cubeta es el resultado de la orogenia alpina, que comenzó hace unos sesenta millones de años, entre el período Cretácico y el comienzo del Terciario, y que produjo la fracturación de los materiales pétreos existentes (rocas ígneas y metamórficas), dando lugar a bloques con escalonamientos sucesivos. Posteriormente, durante el Terciario, y como consecuencia de los procesos de erosión de la cubeta, fueron depositándose, con granulometrías decrecientes según la distancia a las cadenas montañosas, los materiales resultantes de la meteorización (gravas, gravillas, arenas, limos y arcillas), especialmente a partir de conos de sedimentación fluviales. A continuación, se produjo la formación de un gran lago interior, en el que tuvo lugar la precipitación de las sales disueltas en sus aguas (sulfatos y carbonatos, que dieron lugar, respectivamente, a la aparición de yesos y de calizas).

El relieve definitivo, y en particular la actual configuración fluvial y el vaciado parcial de la cuenca del Duero, es el resultado de los procesos acaecidos desde el final del Terciario, bajo condiciones climáticas particulares: épocas de grandes lluvias, períodos glaciales y de deshielo.

2. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

Por la génesis geológica de la región se deduce que la mayoría de los terrenos que desde el punto de vista práctico se denominan suelos se encuentran emplazados en el interior de la cuenca del Duero, ya que sus bordes están fundamentalmente constituidos por materiales rocosos de diversa procedencia, predominantemente ígneos y metamórficos. Es necesario, sin embargo, excluir algunos terrenos que entrarían dentro de la denominación de roca, como las areniscas de Zamora, algunos estratos conglomeráticos del Paleógeno, los estratos calizos del Páramo y algunas terrazas fluviales también muy cementadas.

2.1 Suelos paleozoicos

Dentro de los terrenos paleozoicos, los únicos que presentan un comportamiento asimilable a un suelo son los materiales pizarrosos que han estado sometidos a niveles bajos de metamorfismo o a una intensa meteorización; se encuentran relativamente dispersos por todo el borde de la cuenca del Duero. Estos suelos son geotécnicamente comparables a los compuestos por arcillas preconsolidadas fisuradas. Se encuentran fundamentalmente en las provincias de Palencia, León, Zamora, Salamanca, Segovia y Burgos (Sierra de la Demanda). En la zona norte de León y en Palencia corresponden a las pizarras carboníferas, compuestas por pizarras y lutitas compactas con distintos grados de meteorización.

En estas zonas se aprecian pequeños deslizamientos naturales de las laderas, particularmente en zonas muy tendidas y empapadas de agua, por lo que es preciso prestar una

atención especial a la pendiente de los taludes de excavación, así como prever medidas especiales de drenaje, tanto superficial como profundo.

2.2 Suelos mesozoicos

Los suelos más característicos son las margas yesíferas del Keuper (Triásico superior) y los materiales arcillosos, margosos y arenosos del Cretácico.

Los terrenos correspondientes al Keuper se formaron en un medio de sedimentación de aguas hipersalinas estando constituidos básicamente por arcillas margosas de color rojizo, con concentraciones localmente variables de yeso. Se encuentran fundamentalmente en zonas deprimidas (fondos de valles) y dan lugar a problemas serios de falta de permeabilidad, elevada plasticidad, contenido de sales y baja capacidad de soporte, con riesgo de deslizamientos. Se encuentran en el norte de Palencia (Aguilar de Campoo), este de Burgos (borde de la Sierra de la Demanda), este y sur de Soria (extremos de las ramas aragonesa y castellana de la Cordillera Ibérica) y Segovia (zona de Pradales). Su complejidad geotécnica es debida a su impermeabilidad, agresividad a los materiales de construcción y frecuentes deslizamientos.

Los suelos correspondientes al Cretácico están representados por materiales diversos: margas, arcillas y arenas, con frecuentes intercalaciones de calizas y conglomerados. Su heterogeneidad - consecuencia de haber sido depositados en un medio de sedimentación continental marino- junto con el plegamiento frecuente de los materiales, hace que su estudio sistemático sea complejo. El Cretácico aflora fundamentalmente en toda la zona de borde del Mesozoico, desde la parte nororiental de la provincia de León y continuando por Palencia, Burgos, Soria y Segovia. Las arcillas no poseen en general plasticidad elevada, pero pueden dar lugar a problemas de drenaje por su impermeabilidad.

2.3 Suelos terciarios

Ocupan la mayoría de la extensión de la región castellano-leonesa, salvo los depósitos fluviales de origen cuaternario. Responden en esencia al modelo de sedimentación de abanicos aluviales complejos: acumulación de sedimentos detríticos, en forma de gran cono al pie de los frentes montañosos generados como consecuencia de la orogenia alpina, que se extienden hacia el interior de la cubeta tectónica del Duero.

Se trata en general de materiales -gravas, arenas, limos y arcillas- con diferentes grados de compactación, consecuencia de los procesos diagenéticos a que se han visto sometidos tras su sedimentación: fundamentalmente consolidación por el peso de la columna que han soportado durante su historia, y cementación o procesos de mineralización.

Atendiendo al modelo de sedimentación, se puede hacer referencia a dos facies o ambientes sedimentarios:

- Facies proximales, que contienen los sedimentos más gruesos, con capas lenticulares y canalizadas; dentro de este grupo se incluyen los conglomerados del Paleógeno de la depresión del Duero.
- Facies distales, más alejadas de su fuente, con sedimentos más finos dispuestos en capas

laminares extensas y con menor proporción de niveles canalizados; a este grupo pertenecen las facies arenoarcillosas del Mioceno.

En general, el borde externo del abanico conecta con otros ambientes sedimentarios, en este caso de tipo lacustre, donde, por ausencia de aportes detríticos, se favorece la precipitación química y la decantación en la zona central de la cuenca. Están representados por las facies evaporíticas de yesos, margas y calizas de las cuevas y de los páramos castellanos.

Entre ambas facies citadas cabe distinguir dos tipos de depósito: los de corriente y las coladas de fango:

- Los depósitos de corriente se encuentran bien estratificados y tienen un bajo contenido de matriz arcillosa, siendo el resultado de procesos de sedimentación fluviales en régimen normal.
- Las coladas de fango son flujos gravitacionales de sedimentos constituidos por una matriz arcillosa dominante en la que flotan los clastos mayores. En conjunto presentan comportamientos viscosos (fenómenos de soliflucción).

El Paleógeno ocupa las zonas más externas de la depresión del Duero y está constituido por materiales detríticos gruesos más o menos cementados (gravas/conglomerados, arenas/areniscas), fundamentalmente silíceos en la zona oeste y calcáreos en la noreste. Se trata en general, de buenos terrenos para construcción de carreteras, si bien la cementación de los granos puede hacer que los terrenos no sean escarificables (areniscas de Zamora). Localmente pueden existir facies más finas que requieren un estudio más detallado.

El Neógeno está en general constituido por materiales de granulometría más fina: capas lenticulares de arenas y limos con matriz limoarcillosa. Hacia los bordes de la depresión las facies se hacen más gruesas en su granulometría, mientras que en la zona central tienden a aparecer las facies evaporíticas de margas yesíferas, coronadas siempre por los niveles de calizas del Páramo, en general de colores más claros. Estas facies reciben geológicamente nombres locales: facies Tierra de Campos, facies Dueñas, etc. Los terrenos neógenos son, en general, aptos para la construcción de carreteras, si bien su elevado contenido de finos hace necesario un buen drenaje y un estudio detallado de las variaciones de la humedad natural y de la influencia de ésta en la capacidad de soporte.

2.4 Suelos cuaternarios

Los depósitos cuaternarios son recubrimientos de escaso espesor relacionados con la progresiva configuración de la red fluvial actual. Según su origen cabe hablar de:

- Rañas: Formadas por mantos de depósitos de granulometría heterogénea (cantos y bloques con abundante matriz limoarcillosa). Cubren extensas superficies con suaves inclinaciones. Se sitúan principalmente al norte de León y de Palencia. La composición de los cantos puede ser cuarcítica, calcárea o areniscosa. Su alto contenido de finos puede dar lugar a problemas de drenaje.
- Terrazas: Son depósitos antiguos de la red fluvial asociados a las variaciones de sus niveles de

base. Suelen contener pocos finos por lo que su drenaje es en general bueno. Litológicamente suelen ser cuarcíticas, si bien en las terrazas más elevadas, situadas en el centro de la depresión del Duero, pueden encontrarse materiales calizos procedentes de la erosión de las calizas de los páramos. En ocasiones estos depósitos pueden estar encostrados y cementados.

- Aluviales: Son depósitos granulares ligados al cauce actual de los ríos y a sus pequeñas modificaciones (crecidas, meandros, islas, etc). Aparecen en espesores de 3 a 10 m. Por tratarse de materiales granulares muy flojos y saturados requieren un estudio especial de su capacidad de soporte.
- Coluviales: Son depósitos de piedemonte, formados por las aguas de escorrentía, acción gravitatoria y ciclos de hielo/deshielo. Presentan una granulometría lenticular engrosada hacia la base. Pueden estar saturados en su nivel inferior a causa de la impermeabilidad del sustrato terciario. En ocasiones pueden estar cementados por carbonatos.
- Arenas eólicas: Son formaciones arenosas fruto de la acción del viento, en general de espesor reducido (menos de 5 m), de permeabilidad elevada y saturadas en ocasiones si el sustrato terciario es impermeable. Se localizan preferentemente en las zonas de pinares del sur de la provincia de Valladolid y del norte de las de Ávila y Segovia. Son arenas de cuarzo, bien graduadas y limpias.
- Zonas endorreicas: Son zonas deprimidas, con escaso drenaje al exterior y que permanecen la mayor parte del año saturadas, compuestas por limos arcillosos ricos en materia orgánica, con vegetación de juncos y otras plantas freatofitas. Se trata en general de terrenos malos para la construcción de carreteras y requieren un estudio detallado de su capacidad de soporte, tratamientos recomendados y drenaje.

3. PRINCIPALES YACIMIENTOS DE ÁRIDOS

En general son abundantes los yacimientos de materiales aptos para su explotación y utilización en el cemento y en las capas del firme. En la tabla 3.1 se indican las distintas litologías utilizadas para la fabricación de áridos y su localización geológico-geográfica en la región. En resumen, se puede hacer referencia a:

- Litologías favorables: Granitos sanos, pórfidos, cuarcitas, calizas, gravas y arenas.
- Litologías dudosas: Gneises, esquistos, areniscas, conglomerados.
- Litologías desfavorables: Pizarras, margas, arcillas, yesos.

En la tabla 3.2. se incluyen los valores característicos (coeficientes de desgaste los Ángeles y de pulido acelerado) de los áridos representativos de canteras y graveras de Castilla y León.

TABLA 3.1 Principales yacimientos de áridos

Litología		Localización	Observaciones
Granitos sanos Granodioritas Adamellitas	Plutonismo Macizo Hespérico	Zamora, Salamanca, Ávila Segovia, León	Hay que analizar la Textura Tipo de grano Meteorización
Cuarzitas	Paleozoico	Palencia, León, Zamora, Salamanca, Burgos	Buenas, en general
Pórfidos	Plutonismo Macizo Hespérico	Ávila, León Segovia	Buenas, en general
Ofitas	Volcanismo triásico	Norte de Burgos y Palencia	Hay que analizar la Meteorización
Corneanas	Metamorfismo de contacto	Ávila, Salamanca y Segovia	Buenas, en general
Calizas / dolomías	Paleozoico (caliza de Montaña) Mesozoico (Jurásico-Cretácico) Terciario (caliza del Páramo)	Palencia, León Palencia, Segovia, Burgos, Soria, León Valladolid, Palencia, Burgos, Segovia	Calidad variable
Gravas y arenas	Mesozoico (Cretácico) Terciario (Paleógeno) Cuaternario (rañas, terrazas fluviales, aluviales, arenas eólicas)	Palencia, Burgos, Soria, Zamora, Salamanca Palencia, León, Burgos, Soria Toda la región	Hay que analizar la Comp. mineralógica Granulometría
Neises	Metamorfismo Macizo Hespérico	Zamora, Salamanca, Ávila, Segovia	Hay que analizar la Textura (foliación)
Esquistos	Metamorfismo Macizo Hespérico Cordillera Ibérica (Sierra de la Demanda)	Palencia, León, Zamora Salamanca, Ávila, Segovia Soria, Burgos	Hay que analizar la Mineralogía del cemento
Areniscas	Mesozoico (Triásico-Cretácico) Terciario (Paleógeno)	Palencia, Burgos, Soria, Segovia Zamora, Salamanca	Hay que analizar la Mineralogía del cemento
Conglomerados	Paleozoico Mesozoico (Cretácico) Terciario (Paleógeno)	León, Palencia Soria, Burgos Palencia, León, Zamora, Salamanca, Burgos, Soria	Hay que analizar la Mineralogía del cemento

TABLA 3.2 Valores característicos de los áridos de Castilla y León

CANTERAS

Litología	Edad	Unidad Geológica	Desgaste los Ángeles	Coef. pulido acelerado x 100
Cuarzitas	Preordovícico	Metasedimentos preordovícicos	23 (7)	48 (3)
	Cámbrico M-Ord Inf.	Fm. Barrios - Serie de los Cabos	25 (5)	48 (5)
	Ordovícico inferior	Cuarcita Armoricana	19 (6)	45 (4)
		Fm. Agüeira - Cuarcita de Vega	19 (4)	48 (4)
	Devónico	Fm. Camporredondo	27 (4)	
Calizas/ (dolomías)	Preordovícico	Metasedimentos preordovícicos	33 (6)	40*
		Fms. Vegadeo - Tamames - Láncara	34 (14)	39 (4)
		Fm. Caliza de la Aquiana	26 (2)*	30*
	Devónico	Fms. Santa Lucía - Portilla	26 (4)	36*
	Carbonífero	Fms. C. Montaña-Barcaliente-Cuevas	28 (6)	34 (7)
	Mesozoico	F. Musschelkalk	26*	
		Trias. Sup - Jur. Inf. (Carniolas)	29 (7)	37 (7)
		Jur. Sup (Dogger - Malm)	26 (1)*	43*
		Jur. Sup. - Cret. Inf. (Purbeck)	28 (8)	32 (4)
		Jur. Sup. - Cret. Inf. (G. Oncala)	26 (3)	43 (4)
		Cret. Sup. (Tramo inferior)	26 (6)**	32 (3)
		Cret. Sup. (Tramo superior)	30 (5)	35 (3)
		Serie Carb. Marina de Villarcayo	22 (2)*	36*
		Calizas de los Páramos	26 (7)	36 (4)
Granitos	Granitoides biotíticos	47 (16)	48 (7)	
	Leucogranitos			
Neises	Ortoneises y "Ollode sapo"	19 (5)	50 (2)	
Diques básicos	Diabasas, Microdioritas y Lamprófidos	16 (4)	51 (4)	
R. Volcánicas	Cuarzo filoniano	23 (7)	45 (3)	
	Metarriolitas	20 (4)*	51 (2)*	
	Ofitas	15 (5)	59 (7)	
R. Metamorfismo de contacto	Corneanas	14 (6)	56 (3)	

GRAVERAS

Edad	Litología	Unidad Geológica	Desgaste los Ángeles		Coef. pulido acelerado x 100
			Árido rodado	Árido triturado	
Mesozoico	Gravas y arenas cuarcíticas	Cretácico inferior detrítico	35 (4)	28 (4)	
		Fm. Arenas de Utrillas y similares	27 (3)	22 (6)	45 (1)
Cuaternario	Gravas y arenas poligénicas	Coluviones y depósitos glaciares	29 (8)	28 (13)	44 (8)
		Ab. aluviales, glacis y sup. complejas	27 (1)*	28 (5)	
	Gravas y arenas cuarcíticas***	Terrazas fluviales	29 (6)	25 (6)	46 (5)
		Aluviales y terrazas bajas	28 (6)	26 (7)	49 (4)

* Los datos son escasos, pero se consideran representativos

** Excluidas las dolomías de tipo arenoso por sesgar desfavorablemente los resultados

*** En zonas de cabecera de los ríos el material es más poligénico, con resultados peores y más dispersos

NOTA: Se indica el valor medio y entre paréntesis la desviación estándar o dispersión sobre dicho valor medio

4. CLIMA

Se reseñan a continuación las principales variables meteorológicas que deben ser consideradas en la redacción de los proyectos.

TABLA 3.3 Valores climatológicos (período 1971-2002)

Provincia	T	TM	Tm	P	H	DP	DN	DT	DF	DH	DD	I
Ávila	10,4	15,9	4,8	400	63	66	20	13	23	90	83	2.644
Burgos	10,1	15,9	4,4	555	72	85	20	18	38	88	52	2.183
León	10,9	16,4	5,3	556	68	78	14	16	28	74	83	2.624
Palencia	12,0	18,4	5,6	421	66	63	7	15	34	60	78	2.543
Salamanca	11,7	17,9	5,5	382	68	66	9	16	32	77	80	2.586
Segovia	11,9	17,0	6,7	464	63	76	13	14	14	56	78	2.480
Soria	10,6	16,7	4,6	502	68	80	25	23	19	89	64	2.511
Valladolid	12,3	18,6	6,2	435	65	71	8	17	42	61	76	2.534
Zamora	12,7	18,3	7,1	363	66	64	4	15	35	47	81	2.587

TTemperatura media anual (°C)

TM . . .Media anual de las temperaturas máximas diarias (°C)

Tm . . .Media anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)

PPrecipitación anual media (mm)

HHumedad relativa media (%)

DP . . .Número medio anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm

DN . . .Número medio anual de días de nieve

DT . . .Número medio anual de días de tormenta

DF . . .Número medio anual de días de niebla

DH . . .Número medio anual de días de helada

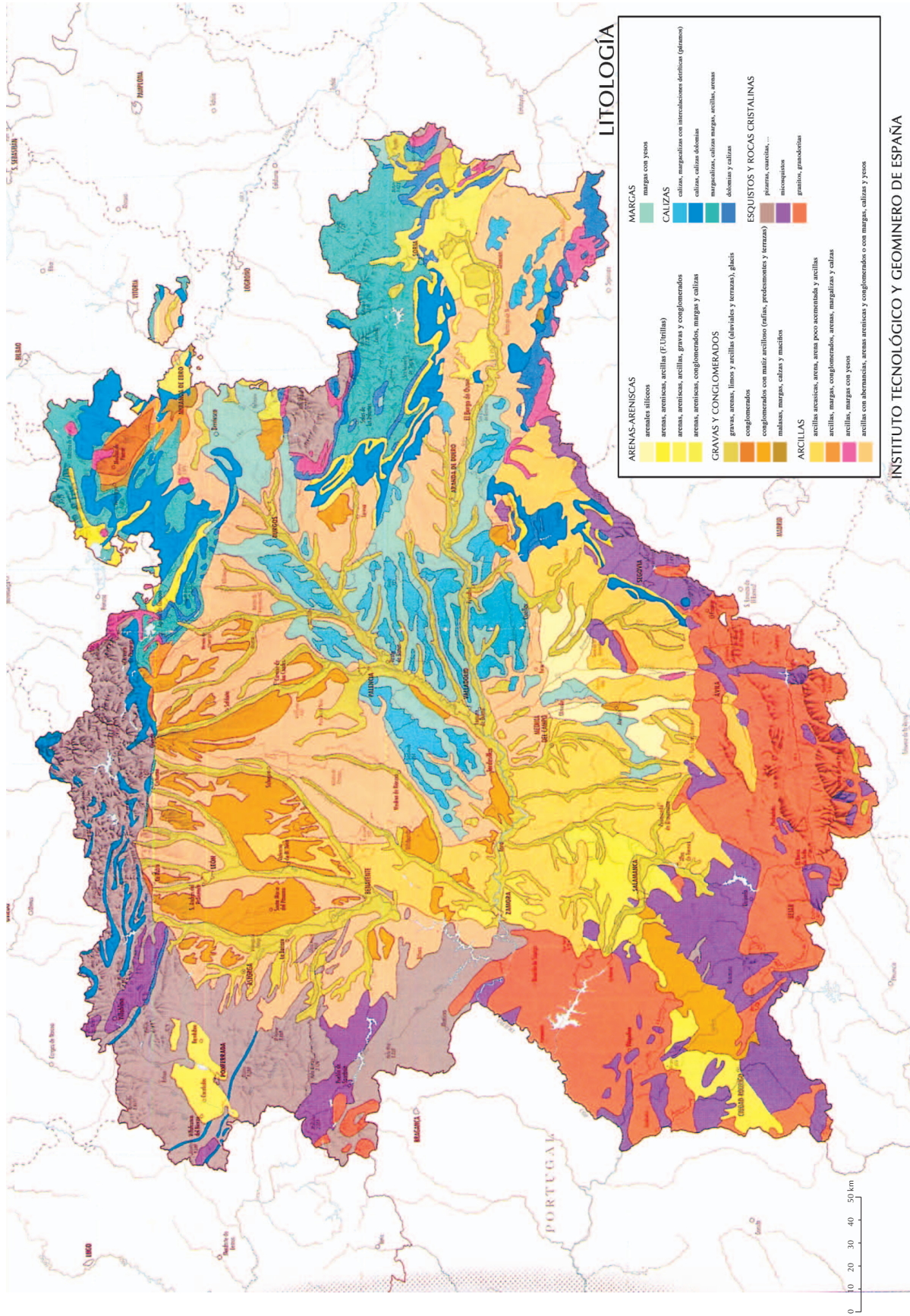
DD . . .Número medio anual de días despejados

INúmero medio anual de horas de sol

TABLA 3.4 Valores históricos de algunas variables climatológicas

Provincia	Precipitaciones intensas				Días de tormenta		Vientos históricos	
	Prec. Máx 24 h	Fecha	Prec. Máx. Mensual	Fecha	Nº máximo mes	Fecha	Racha máxima (km/h)	Fecha
Ávila	65,4	7-ago-81	331,0	may-38	11	jun-76	107	feb-89
Burgos	63,0	31-jul-61	203,0	ene-81	10	jun-76	127	mar-56
León	98,5	26-sep-87	253,3	ene-96	12	may-89 / jul-55	130	feb-89
Palencia	46,2	1-sep-78	173,1	jun-32	11	jun-76	78	nov-81
Salamanca	59,0	3-nov-55	189,0	nov-97	12	sep-79	137	1969
Segovia	63,0	6-ago-81	221,0	abr-18	11	jun-95	100	mar-93
Soria	70,0	13-jul-59	234,3	oct-60	13	ago-83	122	feb-89
Valladolid	104,0	8-jul-04	183,2	ene-70	11	jul-87	131	mar-52
Zamora	66,1	2-jul-61	212,6	dic-32	10	may-89	111	nov-81

FIGURA 3.1 Formaciones utilizables para la extracción de áridos en Castilla y León



INSTITUTO TECNOLÓGICO Y GEOMINERO DE ESPAÑA

FIGURA 3.2 Mapa Precipitación media anual

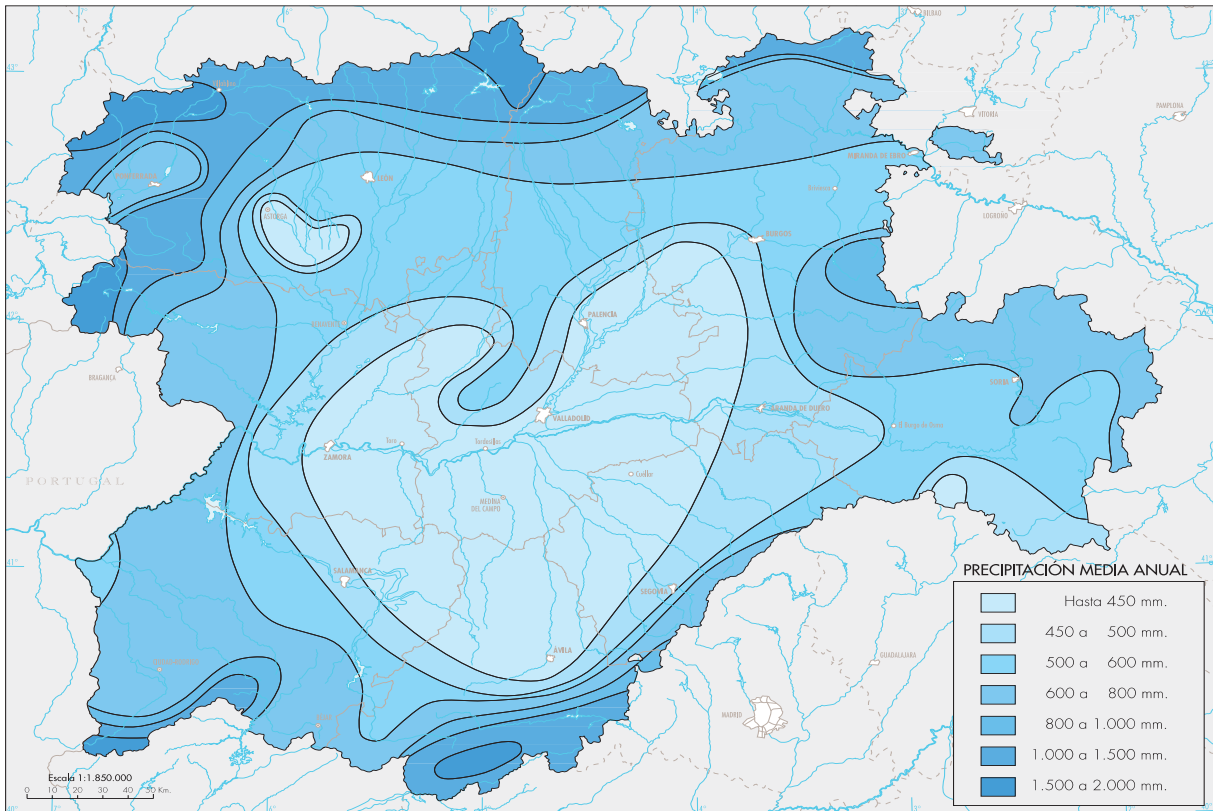


FIGURA 3.2 Mapa precipitación media primavera

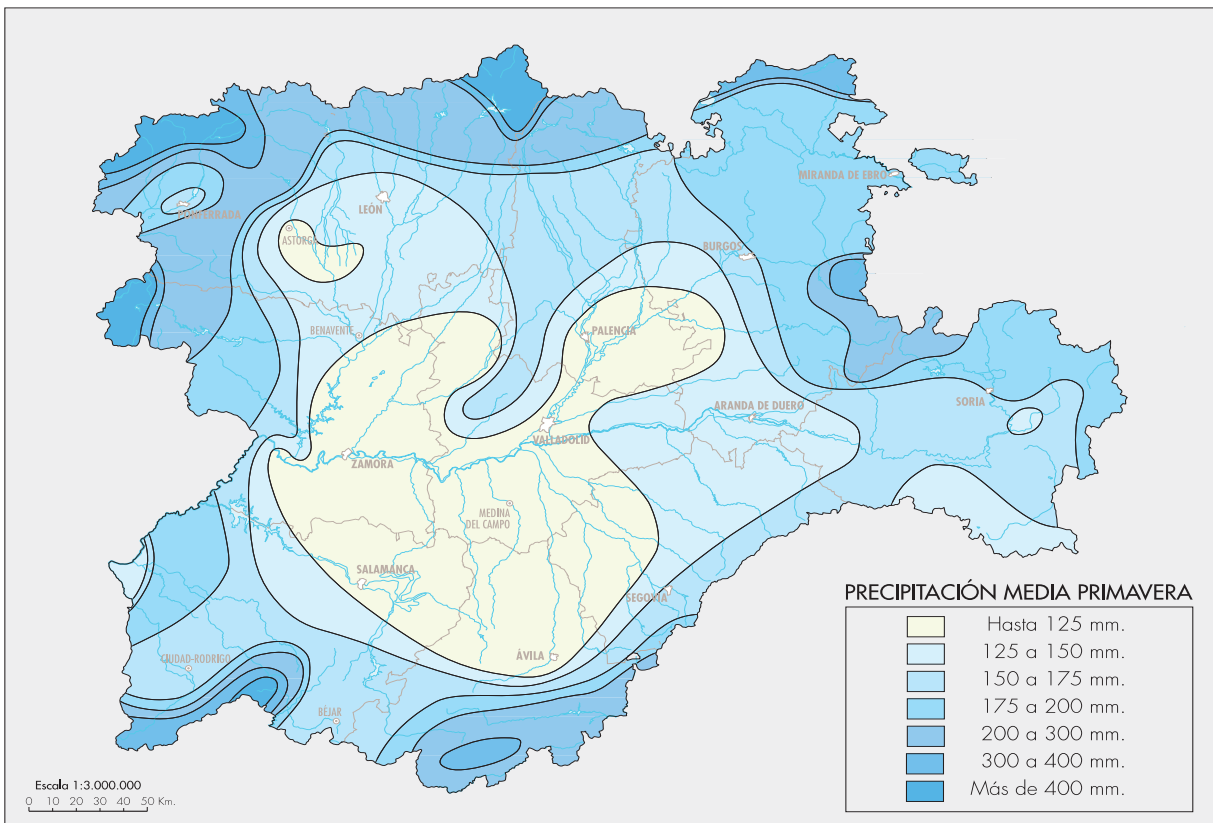


FIGURA 3.3 Mapa temperatura media enero

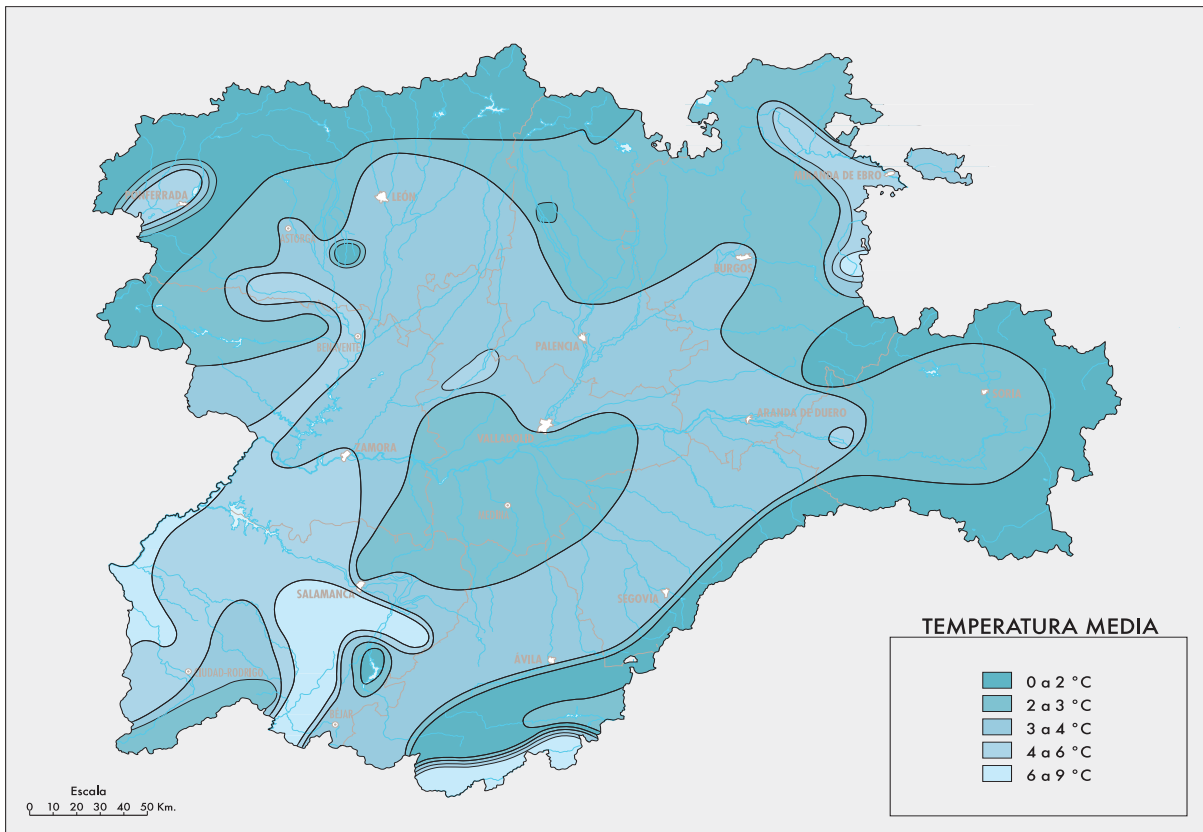
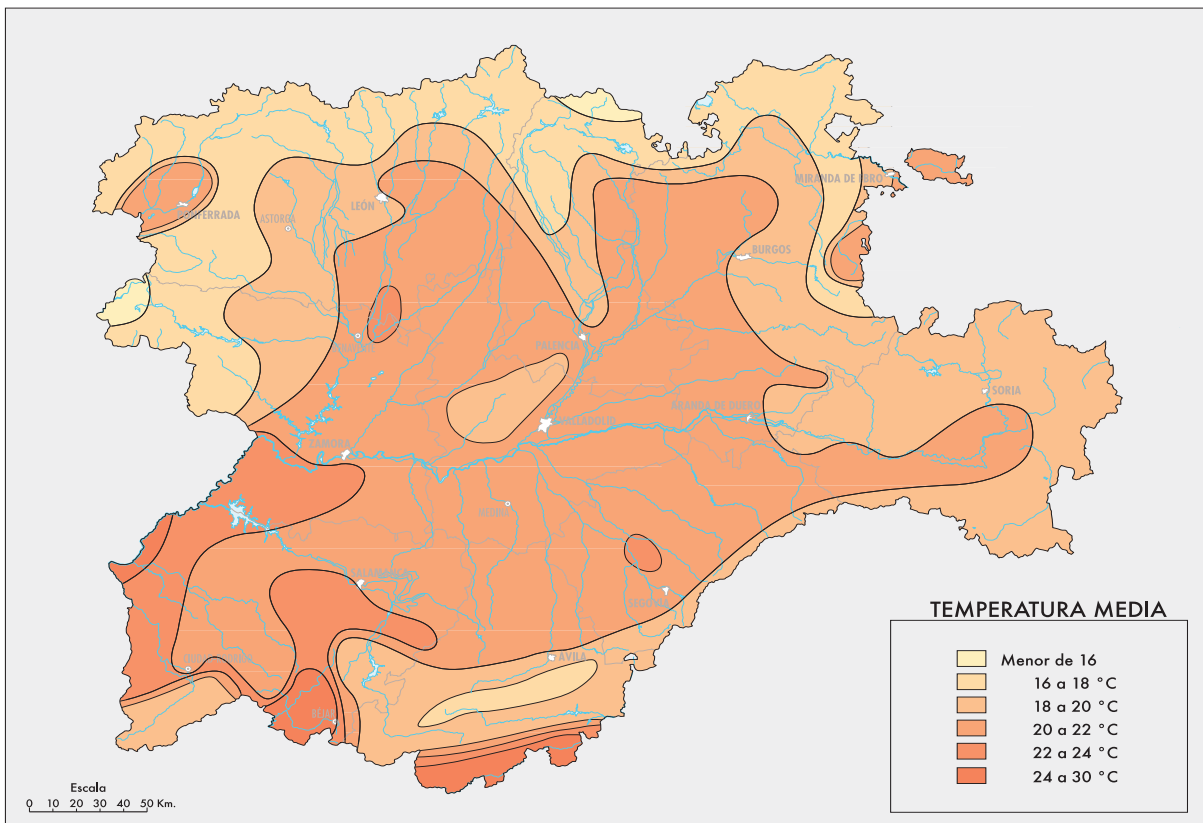


FIGURA 3.3 Mapa temperatura media julio



Capítulo 4



Análisis del tráfico

1. CLASIFICACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO

A los efectos de empleo de los catálogos de secciones estructurales (capítulos 7, 8 y 9) se establecen las categorías de tráfico pesado que figuran en la tabla 4.1. Los criterios de clasificación son básicamente los establecidos en las anteriores *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos* de la Junta de Castilla y León (1996 y actualización 2001) y que para tráficos ligeros han sido asimismo incorporados en las normas 6.1 *IC de secciones de firme* (O.C. 10/2002), y 6.3 *IC de rehabilitación de firmes* (O.C. 9/2002) del Ministerio de Fomento. Estas categorías se aplicarán tanto al proyecto de firmes de nueva construcción como al de rehabilitaciones.

TABLA 4.1 Categorías de tráfico pesado

Categoría	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
IMD _P *	800-2.000	400-800	200-400	100-200	50-100	25-50	0-25

* Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio.

La elección en cada caso de la categoría de tráfico pesado se hará teniendo en cuenta los siguientes criterios complementarios:

- En las carreteras con calzadas separadas no se admitirán categorías de tráfico pesado inferiores a la T21.
- En la Red Básica no se admitirán categorías de tráfico pesado inferiores a la T32.
- En los itinerarios preferentes de la Red Complementaria no se admitirán categorías de tráfico pesado inferiores a la T41.

FIGURA 4.1 Categoría de tráfico pesado según tipo de red

	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
Calzadas Separadas							
Red Básica							
Red Complementaria. Itinerarios Preferentes							
Red Complementaria. Itinerarios Locales							

En el caso particular de que los vehículos pesados que circulen por el tramo se encuentren claramente sobrecargados, como puede ocurrir en los accesos a minas o a canteras, se analizará la conveniencia de adoptar una categoría de tráfico superior a la inicialmente determinada.

2. DISTRIBUCIÓN DEL TRÁFICO EN LA RED DE CARRETERAS

La participación de las distintas redes en el tráfico total dentro de la Comunidad de Castilla y León, según los datos de tráfico obtenidos en el año 2002, ha resultado ser:

TABLA 4.2 Reparto del tráfico por tipo de red

	10º veh/km	%
Carreteras del Estado	11,68	67,01
Red Regional de Castilla y León	4,51	25,87
Redes de las Diputaciones Provinciales	1,24	7,12
TOTAL	17,43	100,00

Mientras que la media de las intensidades medias diarias (IMD) de la Red de Carreteras del Estado es de 6.630 vehículos/día, en la Red Regional de Carreteras de la Junta de Castilla y León, la IMD media es de 1.087 vehículos/día. El valor de IMD medio medido en la red regional para cada provincia resulta ser el incluido en la tabla 4.3. Este tráfico se reparte entre vehículos ligeros y pesados según se refleja en la tabla 4.4.

TABLA 4.3. IMD Media de la red regional por provincia y tipo de red

Provincia	Red básica		Red complementaria				Total red	
	km	IMD (media)	I. Preferentes		T. Locales		km	IMD (media)
			km	IMD (media)	km	IMD (media)		
Ávila	233,1	2.362	484,5	719	262,9	310	980,5	1.000
Burgos	188,0	2.147	926,7	1.059	697,9	539	1.812,6	971
León	369,0	2.240	691,1	2.007	742,2	802	1.802,3	1.558
Palencia	325,2	2.179	378,3	777	841,6	275	1.545,0	798
Salamanca	293,9	2.032	631,3	1.099	353,7	700	1.278,9	1.203
Segovia	176,4	3.995	407,2	1.002	206,7	677	790,3	1.585
Soria	199,1	1.900	340,2	628	379,3	375	918,7	799
Valladolid	231,4	2.633	319,4	1.122	543,2	471	1.094,0	1.118
Zamora	179,2	1.358	531,4	636	432,6	547	1.143,2	716
TOTAL	2.195,3	2.316	4.710,0	1.005	4.460,0	522	11.365,3	1.087

TABLA 4.4. Proporciones de vehículos ligeros y pesados por provincias y tipo de red

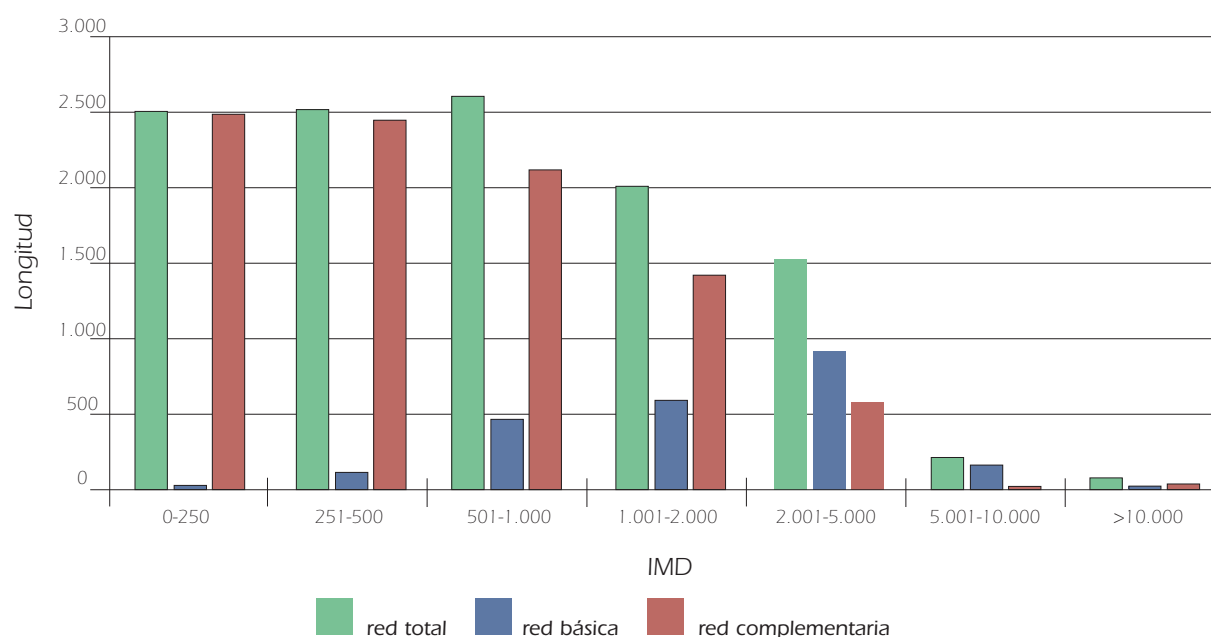
Provincia	Red básica					Red básica				
	IMD (media)	IMD-VL (media)	%	IMD-VP (media)	%	IMD (media)	IMD-VL (media)	%	IMD-VP (media)	%
Ávila	2.362	2.036	86	326	14	575	495	86	80	14
Burgos	2.147	1.937	90	210	10	835	740	89	96	11
León	2.240	1.943	87	294	13	1.383	1.246	90	137	10
Palencia	2.179	1.835	84	344	16	430	370	86	61	14
Salamanca	2.032	1.846	91	186	9	956	853	89	102	11
Segovia	3.995	3.512	88	483	12	893	760	85	133	15
Soria	1.900	1.225	65	674	35	495	441	89	54	11
Valladolid	2.633	2.289	87	345	13	712	631	89	81	11
Zamora	1.358	1.217	90	141	10	596	516	87	80	13
TOTAL	2.316	1.982	85	334	15	764	672	88	92	12

La distribución del tráfico en la Red Autonómica de carreteras de acuerdo con los datos obtenidos en el año 2002 se recogen en la tabla 4.5. En la figura 4.2 se representa el reparto de dicho tráfico entre las redes Básica y Complementaria.

TABLA 4.5. Longitud (km) de tramos de carretera pertenecientes a la red regional, clasificados por provincias y por IMD en el año 2002

Provincia	IMD							TOTAL
	0-250	251-500	501-1.000	1.001-2.000	2.001-5.000	5.001-10.000	>10.000	
Ávila	192,3	260,1	211,8	191,6	113,8	10,9	0,0	980,5
Burgos	474,8	415,2	397,6	325,0	163,4	29,7	6,9	1.812,6
León	196,7	280,9	424,7	387,6	465,4	16,8	30,2	1.802,3
Palencia	560,5	391,2	257,3	149,5	172,3	6,0	8,2	1.545,0
Salamanca	157,2	230,4	424,0	275,2	145,3	34,5	12,3	1.278,9
Segovia	96,6	149,0	151,8	177,0	170,6	45,4	0,0	790,3
Soria	279,6	188,3	221,8	169,9	59,1	0,0	0,0	918,7
Valladolid	286,8	281,5	203,0	138,9	159,2	24,6	0,0	1.094,0
Zamora	247,1	310,2	316,2	211,6	56,0	2,1	0,0	1.143,2
TOTAL	2.491,5	2.506,7	2.608,1	2.026,3	1.505,1	169,9	57,6	11.365,3
%	21,9	22,1	22,9	17,8	13,2	1,5	0,5	100,0

FIGURA 4.2. Longitud de tramos de la red regional clasificados por IMD y tipo de red (año 2002)



La distribución del tráfico pesado recogida por categorías es para cada provincia la que figura en la tabla 4.6

TABLA 4.6. Longitud (km) de tramos de carretera pertenecientes a la red regional, clasificados por categoría de tráfico pesado y por provincia (año 2002)

Provincia	Categoría de tráfico pesado							Total
	T42	T41	T32	T31	T22	T21	T1	
	12-25	26-50	51-100	101-200	201-400	401-800	> 800	
Ávila	173,3	168,7	257,5	154,4	178,0	13,8	34,8	980,5
Burgos	379,5	455,9	431,5	279,4	191,5	67,9	6,9	1.812,6
León	172,0	210,3	429,4	613,4	156,3	171,7	49,2	1.802,3
Palencia	360,2	370,1	363,0	210,6	157,8	73,3	10,1	1.545,0
Salamanca	130,6	282,4	392,4	220,1	206,7	34,5	12,3	1.278,9
Segovia	57,0	159,7	84,1	159,5	224,8	88,7	16,5	790,3
Soria	209,0	193,4	254,0	118,0	72,1	0,0	72,2	918,7
Valladolid	138,8	317,5	229,6	161,0	138,1	104,5	4,5	1.094,0
Zamora	156,9	373,9	274,7	231,0	98,9	5,6	2,1	1.143,2
TOTAL	1.777,3	2.531,9	2.716,2	2.147,4	1.424,2	559,9	208,6	11.365,3
%	15,6	22,3	23,9	18,9	12,5	4,9	1,8	100,0

3. EVOLUCIÓN DEL TRÁFICO EN LA RED

Desde la puesta en marcha del Plan Regional de Aforos en el año 1995 se ha producido un notable aumento en el tráfico, pasando de 3.620 millones de veh*km a 4.510 en el año 2002, lo que significa un incremento del 25% durante dicho período, tanto en la red Básica como en la Complementaria. Los datos año por año se recogen en la tabla 4.7.

TABLA 4.7 Evolución del tráfico por tipo de red

Tipo red	Tráfico total (10 ⁹ veh*km)							
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
R. Básica	1,44	1,45	1,47	1,62	1,62	1,66	1,72	1,83
R. Complementaria	2,18	2,30	2,23	2,33	2,38	2,34	2,62	2,68
Total red	3,62	3,75	3,70	3,95	4,00	4,00	4,34	4,51

La evolución de la IMD durante el período ha sido constante en su distribución por tipo de red. La Red Básica es la que soporta una mayor IMD (2.316 vehículos/día), mientras que la Red Complementaria la IMD baja notablemente, hasta los 764 vehículos/día. El valor medio de la IMD en el conjunto de la Red Autonómica se sitúa en 1.087 vehículos/día.

TABLA 4.8 Evolución del valor medio de la IMD por tipo de red

Tipo red	IMD _{media} por tipo de red							
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
R. Básica	1.854	1.865	1.891	2.030	2.065	2.112	2.169	2.316
R. Complementaria	637	672	648	688	691	680	750	764
Total Red Autonómica	862	892	876	943	972	969	1.043	1.087

Porcentualmente, la distribución del tráfico supone que la Red Básica soporta el 40% del tráfico total, representando su longitud algo menos del 20% del total de la Red Autonómica, mientras que la Red Complementaria soporta el 60% del tráfico con una longitud del 80% de dicha red.

TABLA 4.9. Reparto del tráfico por tipo de red (%)

Tipo red	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
R. Básica	39,80	38,66	39,72	41,01	40,50	41,50	39,63	40,66
R. Complementaria	60,20	61,34	60,28	58,99	59,50	58,50	60,37	59,33
Total Red Autonómica	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

De acuerdo con lo reflejado en las tablas se puede concluir con las siguientes afirmaciones:

- El tráfico en la Red Regional de carreteras ha crecido en los últimos años de forma constante. La tasa de crecimiento anual se sitúa en el 3%, coincidiendo con el crecimiento del tráfico en la Red de Carreteras del Estado.
- Del tráfico total de la Red Regional de carreteras el 40% se registra en la Red Básica y el 60% en la Red Complementaria.
- La IMD media en la Red Regional de carreteras es de 1.087 vehículos/día. Existe una notable diferencia en el valor de la IMD según el tipo de red: la Red Básica registra un valor medio de IMD de 2.316 vehículos/día, mientras que en la Red Complementaria sólo se alcanza una IMD media de 764 vehículos/día.
- Del total del tráfico registrado en las distintas redes de carreteras dentro del territorio de la Comunidad, la Red Regional soporta el 25%, representando su longitud el 34,5% del total de la red viaria de la Comunidad de Castilla y León.
- La distribución del tráfico por provincias en la Comunidad está claramente descompensado: la provincia de León, con un 22,7% del tráfico total, es la que más tráfico soporta, seguida de Burgos y de Salamanca, con un 14,3% y un 12,5%, respectivamente, mientras que Zamora y Soria registran únicamente el 6,6 y el 5,9%, respectivamente.

Capítulo 5

El cimiento del firme



1. INTRODUCCIÓN

La explanada, superficie de apoyo de un firme, constituye habitualmente la parte superior de su cimiento. El comportamiento de los materiales existentes bajo esa superficie depende básicamente de su naturaleza, de su estado (compacidad y humedad), de las cargas procedentes del tráfico pesado y de la propia rigidez de las capas del firme.

La caracterización de los materiales con los que se forman las explanadas suele hacerse a través de ensayos de laboratorio o de ensayos in situ. Debe intentarse reproducir en todo caso las condiciones que los materiales van a soportar bajo las capas del firme.

El parámetro fundamental de caracterización del cimiento es su deformabilidad. En los suelos, sean naturales o mejorados, depende básicamente además de su propia naturaleza de dos factores: la densidad y el contenido de humedad. El estudio en laboratorio de la variación de la capacidad de soporte de un suelo con la humedad no presenta mayores complicaciones; sin embargo, estimar la evolución de la humedad en la explanada una vez construido el firme requiere complejos análisis sobre el comportamiento de medios no saturados.

La incidencia de la explanada sobre el comportamiento estructural de las secciones de firme es tanto mayor cuanto mayor sea la flexibilidad de esas secciones, y sobre todo si la capacidad de soporte del cimiento no es muy alta: en esos casos, pequeñas variaciones de las condiciones del cimiento pueden provocar grandes cambios en el estado tensional del firme.

2. MATERIALES. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Los suelos para la construcción de terraplenes y fondos de desmonte se pueden clasificar de la siguiente forma, partiendo de las especificaciones contenidas en el artículo 330 del PG-3:

Suelos marginales e inadecuados: Son los que no cumplen las condiciones mínimas exigidas a los suelos tolerables. Para que un suelo pueda ser clasificado como marginal y ser susceptible de aprovechamiento, su contenido de materia orgánica y su hinchamiento libre en edómetro (UNE 103601) deben ser inferiores al 5% cada uno; además, el límite líquido (LL) debe ser inferior a 90, o en caso de ser superior, debe cumplir que el índice de plasticidad (IP) sea inferior a 0,73 (LL-20). El empleo de suelos marginales e inadecuados en la formación de explanadas sólo es posible si se estabilizan para lograr S-EST 1 o S-EST 2.

Suelos tolerables: Su límite líquido (LL) debe ser inferior en todo caso a 65. Si el LL es superior a 40, debe cumplirse además que el índice de plasticidad (IP) sea superior a 0,73 (LL-20). El contenido de materia orgánica debe ser inferior al 2%. El contenido de yeso debe ser inferior al 5% y el de otras sales solubles distintas del yeso inferior al 1%. El hinchamiento libre debe ser inferior al 3%.

Para poder emplear los suelos tolerables en la formación de explanadas sin tener que estabilizarlos, los valores de materia orgánica, sulfatos solubles (SO_3) e hinchamiento tienen que ser todos ellos inferiores al 1%. Además, el índice CBR debe ser como mínimo de 3.

Suelos adecuados: Deben carecer de elementos de tamaño superior a 100 mm; su cernido por el tamiz de 2 mm debe ser inferior al 80%, y su cernido por el tamiz de 0,080 mm debe ser inferior al 35% en masa. Su LL debe ser en cualquier caso menor que 40; si es superior a

30, debe cumplirse además que el IP sea superior a 4. El contenido de materia orgánica debe ser inferior al 1 % y el de sales solubles (incluido el yeso) inferior a 0,2%.

Si los suelos adecuados se emplean en la formación de explanadas su índice CBR debe ser como mínimo de 5. Si, además, su empleo es en la capa superior de las utilizadas en la formación de la explanada, el valor mínimo del CBR ha de ser de 6.

Suelos seleccionados: Deben carecer de elementos de tamaño superior a 100 mm. Su cernido por el tamiz de 0,40 mm debe ser inferior al 15% en masa; si no se cumple esta condición, debe cumplirse que los cernidos por los tamices de 2 mm, 0,40 mm y 0,080 mm sean respectiva y simultáneamente inferiores al 80%, 75% y 25%. A la vez el LL debe ser menor que 30 y el IP ser menor que 10.

Tanto el contenido de materia orgánica como el de sales solubles (incluido el yeso) deben ser inferiores a 0,2%.

Si los suelos seleccionados se emplean en la formación de explanadas, su índice CBR debe ser como mínimo de 10. Si, además, su empleo es en la capa superior de las utilizadas en la formación de la explanada, el valor mínimo del CBR ha de ser de 12. En los suelos que en el cuadro de formación de explanadas se denominan tipo 3, el anterior valor se eleva a 20. En ningún caso presentarán hinchamiento en el ensayo CBR.

TABLA 5.1 Resumen de las características exigidas a los suelos

	Suelos marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados
Granulometría (UNE 103101)			$D_{m\acute{a}x} \leq 100$ mm Pasa # 2 mm < 80% Pasa # 0,080 < 35%	$D_{m\acute{a}x} \leq 100$ mm Pasa # 0,40 mm < 15%, o bien: Pasa # 2 mm < 80% Pasa # 0,40 mm < 75% Pasa # 0,080 mm < 25%
Plasticidad (UNE 103103 UNE 103104)	LL < 90 Si LL > 90, IP < 0,73 (LL-20)	LL < 65 Si LL > 40, IP > 0,73 (LL-20)	LL < 40 Si LL > 30, IP > 4	(sólo exigible si pasa # 0,40 mm \geq 15%) LL < 30 IP < 10
Materia orgánica (UNE 103204)	< 5%	< 2% < 1% (*)	< 1%	< 0,2%
Sales solubles		Yeso < 5% Otras < 1% SO ₃ < 1% (*)	< 0,2%	< 0,2%
Hinchamiento libre (UNE 103101)	< 5%	< 3% < 1% (*)		
CBR (UNE 103502)		≥ 3 (*)	≥ 5 (*) ≥ 6 (**)	≥ 10 (*) ≥ 12 (**) ≥ 20 (***)

(*) Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la formación de explanadas

(**) Exigencia adicional para los suelos que se empleen en la capa superior de las utilizadas en la formación de explanadas

(***) Suelos tipo 3

Los suelos pueden proceder de las excavaciones de la propia obra o bien de préstamos próximos. En la actualidad, por encima de obvias consideraciones económicas, las de tipo ambiental fuerzan cada vez más a la compensación de los volúmenes de desmonte y terraplén, razón por la cual se debe forzar al máximo el aprovechamiento de los materiales procedentes de la propia obra, independientemente de su calidad.

3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Si los materiales de los que se dispone no son de calidad suficiente para alcanzar la categoría de explanada establecida, debe recurrirse a la estabilización in situ de los suelos mediante la adición de conglomerantes, habitualmente cal o cemento. Se pueden definir tres tipos de suelos estabilizados, si bien los dos primeros son propiamente suelos mejorados:

- S-EST 1: CBR de la mezcla a 7 días no inferior a 6.
Contenido de conglomerante (cal o cemento) no inferior al 2,5% si se incorpora en polvo, ni inferior al 2% si se incorpora en forma de lechada.
- S-EST 2: CBR de la mezcla a 7 días no inferior a 12.
Contenido de conglomerante (cal o cemento) no inferior al 3%.
- S-EST 3: Resistencia compresión a 7 días no inferior a 1,5 MPa.
Contenido de cemento no inferior al 3%.

Es recomendable recurrir a la estabilización de los suelos frente a su eventual sustitución por motivos técnicos (obtención de una explanada más uniforme y resistente a agentes externos), ambientales (ausencia de extracciones y de vertederos) y, habitualmente, incluso económicos. El incremento del espesor de la estabilización mejora notablemente el comportamiento de las capas del firme, especialmente a largo plazo, lo que es tanto más importante cuanto mayor sea la categoría de tráfico pesado.

4. CLASIFICACIÓN DE LAS EXPLANADAS

Las explanadas se clasifican en tres categorías, según los valores del módulo de compresibilidad que se obtenga en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (NLT-357):

TABLA 5.2. Clasificación de las explanadas

Categoría de explanada	Módulo en el segundo ciclo E_{v2} (MPa)
E1	≥ 60
E2	≥ 120
E3	≥ 300

La figura 5.1 muestra las diferentes formas para alcanzar una determinada categoría de explanada, según sean las características de los suelos disponibles.

En el caso de pedraplenes y rellenos todouno, y a los efectos de utilización de la figura 5.1, los materiales del núcleo y de la transición de los pedraplenes, y de los rellenos todouno siempre que éstos satisfagan las exigencias del artículo 333 del PG - 3, se asimilarán a un suelo seleccionado tipo 3 (salvo si se empleasen materiales marginales en su construcción). La coronación, con un espesor mínimo de 50 cm, se realizará en principio con un suelo seleccionado, obteniéndose así una explanada del tipo E2. Para conseguir una explanada E3, deberá estabilizarse su parte superior (S-EST 3) en un espesor de 25 cm si se emplean suelos del tipo 3, o en 30 cm si se emplean suelos del tipo 2. Únicamente en este caso de estabilizar un espesor de 30 cm se podrán emplear en la coronación suelos adecuados tipo 1. Alternativamente, se podrá formar también la explanada E3 disponiendo directamente sobre la transición un suelocemento fabricado en central con un espesor mínimo de 15 cm.

La superficie de la explanada debe quedar por encima del nivel freático a una distancia mínima que depende de la naturaleza de los suelos que constituyen el macizo de apoyo:

- 60 cm, en caso de suelos seleccionados
- 80 cm, en caso de suelos adecuados
- 100 cm, en caso de suelos tolerables
- 120 cm, en caso de suelos marginales o inadecuados

5. COMPROBACIÓN DE LA CATEGORÍA DE LA EXPLANADA

De acuerdo con los materiales realmente disponibles, y considerando que la formación de las explanadas se debe llevar a cabo preferentemente mediante la estabilización de suelos in situ, se debe elegir cuál es la disposición más adecuada (fig. 5.1) para conseguir la categoría de explanada que se pretende. Como es lógico, los suelos o los materiales estabilizados se deben caracterizar previamente en el laboratorio, realizándose las determinaciones correspondientes (apartados 2 y 3) con suficiente antelación a su eventual empleo.

Si los materiales satisfacen las especificaciones establecidas, se colocan en los espesores mínimos indicados en la figura 5.1 y finalmente se compactan hasta alcanzar los niveles exigidos, el valor del módulo de compresibilidad habrá de superar el mínimo indicado para la correspondiente categoría de explanada. Por ello, y hasta que se encuentren contrastados y suficientemente experimentados los dispositivos rápidos de control del módulo de compresibilidad exigido (como por ejemplo el ensayo de carga con placa dinámica), se deberán controlar y comprobar las condiciones exigidas a los materiales y las de puesta en obra (CBR, espesores, densidades, etc).

Dependiendo de la importancia de la obra, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del Proyecto podrá establecer la necesidad de determinar mediante el ensayo de carga con placa el módulo de compresibilidad EV_2 , definiendo las condiciones en las que se ha de realizar el ensayo. En explanadas estabilizadas, los ensayos deben realizarse deseablemente transcurridos al menos 14 días tras la ejecución.

Para que la ejecución de las explanadas se pueda llevar a cabo con los rendimientos esperados y sin sobresaltos, es preciso que en la fase inicial todos los procedimientos a los que se ha hecho referencia hayan sido contrastados y puestos a punto en el preceptivo tramo de prueba.

FIGURA 5.1. Formación de explanadas (Espesores mínimos en cm)

	Suelos Inadecuados o Marginales (IN)	Suelos Tolerables (0)	Suelos Adecuados (1)	Suelos Seleccionados (2) y (3)	Roca (R)
E1			<p>Espesor mínimo de 100 cm.</p>		
E2				<p>Espesor mínimo de 100 cm.</p>	
E3					

- IN Suelo inadecuado o marginal
- S-EST 1 Suelo estabilizado in situ
- SCC Suelocemento fabricado en central
- 0 Suelo tolerable
- S-EST 2 Suelo estabilizado in situ
- ZA Zahorra artificial (solo admisible exclusivamente si la capa inferior del firme es de zahorra)
- 1 Suelo adecuado
- S-EST 3 Suelo estabilizado in situ
- 2 Suelo seleccionado
- 3 Suelo seleccionado
- R Roca

Las capas de apoyo deberán tener un espesor mínimo de 100 cm. del material indicado en la tabla. En caso contrario, se seleccionará como base el material de inferior categoría

Capítulo 6 | Materiales y unidades de obra



ÍNDICE

- 6.0 ASPECTOS GENERALES
- 6.1 LIGANTES BITUMINOSOS
- 6.2 CONGLOMERANTES
- 6.3 ZAHORRA NATURAL
- 6.4 ZAHORRA ARTIFICIAL
- 6.5 MACADAM
- 6.6 SUELOS ESTABILIZADOS IN SITU CON CAL
- 6.7 SUELOS ESTABILIZADOS IN SITU CON CEMENTO
- 6.8 SUELOCEMENTO
- 6.9 GRAVACEMENTO
- 6.10 GRAVAEMULSIÓN
- 6.11 HORMIGÓN COMPACTADO
- 6.12 RIEGOS DE IMPRIMACIÓN
- 6.13 RIEGOS DE CURADO
- 6.14 RIEGOS DE ADHERENCIA
- 6.15 MACADAM BITUMINOSO POR PENETRACIÓN
- 6.16 RIEGOS CON GRAVILLA
- 6.17 LECHADAS BITUMINOSAS
- 6.18 MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO
- 6.19 MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE
- 6.20 PAVIMENTOS DE HORMIGÓN VIBRADO
- 6.21 RECICLADO DE FIRMES IN SITU CON CEMENTO
- 6.22 RECICLADO DE PAVIMENTOS BITUMINOSOS
IN SITU CON EMULSIÓN BITUMINOSA

En este capítulo se abordan los diferentes materiales y unidades de obra utilizables en la construcción y en la conservación de los firmes y pavimentos. No se trata de un pliego de prescripciones técnicas, sino de un conjunto de consideraciones y orientaciones para ayudar en su labor a los proyectistas y a los directores de las obras.

Se ha partido de los contenidos del PG-3, incluyendo las modificaciones aprobadas tan sólo mediante ordenes circulares (véase Anejo 1). Por otro lado, como es lógico, se ha tenido en cuenta la experiencia en la redacción de proyectos y en la ejecución de obras en Castilla y León.

Aunque ha habido un cierto esfuerzo de homogeneización, los materiales recogidos en este capítulo se han tratado con intensidad diferente, debido a que se ha hecho hincapié en los aspectos que han sido considerados en cada caso más importantes o que la experiencia muestra que a menudo se dejan de lado. No existe por otro lado una relación biunívoca entre los materiales analizados y la normalización de secciones estructurales recogida en los capítulos 7, 8 y 9. Es preciso aclarar finalmente que no se excluye el eventual empleo de otros materiales no contemplados aquí.

Este capítulo 6, dada su considerable extensión, se ha estructurado en veintidós subcapítulos, además de éste con carácter introductorio. Son los siguientes:

- 6.0 Aspectos generales
- 6.1 Ligantes bituminosos
- 6.2 Conglomerantes
- 6.3 Zahorra natural
- 6.4 Zahorra artificial
- 6.5 Macadam
- 6.6 Suelos estabilizados in situ con cal
- 6.7 Suelos estabilizados in situ con cemento
- 6.8 Suelocemento
- 6.9 Gravacemento
- 6.10 Gravaemulsión
- 6.11 Hormigón compactado
- 6.12 Riegos de imprimación
- 6.13 Riegos de curado
- 6.14 Riegos de adherencia
- 6.15 Macadam bituminoso por penetración
- 6.16 Riegos con gravilla
- 6.17 Lechadas bituminosas
- 6.18 Mezclas bituminosas en frío
- 6.19 Mezclas bituminosas en caliente
- 6.20 Pavimentos de hormigón vibrado
- 6.21 Reciclado de firmes in situ con cemento
- 6.22 Reciclado de pavimentos bituminosos in situ con emulsión bituminosa

1. INTRODUCCIÓN

En la técnica de carreteras se han empleado tradicionalmente distintos materiales derivados de la destilación de hullas y de petróleos como ligantes para distintas aplicaciones. En la actualidad, de todas las posibilidades existentes, se emplean sólo los betunes asfálticos y las emulsiones bituminosas. En ambos casos, además, se emplean tanto en estado puro como modificados mediante la incorporación de polímeros y ligantes. Las correspondientes especificaciones se pueden encontrar en la Orden Ministerial de 27 de diciembre de 1999 (BOE del 22 de enero de 2000) que aprueba, entre otros, los siguientes artículos del PG-3: 211 (Betunes asfálticos), 213 (Emulsiones bituminosas), 215 (Betunes asfálticos modificados con polímeros) y 216 (Emulsiones bituminosas modificadas con polímeros). Otros tipos de ligantes usados en el pasado, como los alquitranes y los betunes fluidificados y fluxados, están prohibidos o en desuso.

2. BETUNES ASFÁLTICOS

Los betunes asfálticos, puros o modificados, se emplean fundamentalmente para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente y ocasionalmente en la realización de riegos con gravillas. Las aplicaciones más habituales de los distintos tipos son las siguientes:

B 40/50 y B 60/70: Mezclas bituminosas en caliente convencionales.

B 80/100: Mezclas bituminosas en caliente flexibles.

B 150/200: Riegos con gravilla.

B 13/22: Mezclas bituminosas de alto módulo.

BM-1: Mezclas bituminosas de alto módulo.

BM-2: Mezclas bituminosas de altas prestaciones mecánicas.

BM-3a: Mezclas bituminosas drenantes.

BM-3b y BM-3c: Mezclas en caliente de granulometría discontinua para capas de rodadura de pequeño espesor y mezclas drenantes.

BM-4: Sistemas antirreflexión de fisuras tipo membrana y arenabetún.

BM-5: Riegos con gravilla especiales y sistemas antirreflexión de fisuras tipo membrana y geotextil impregnado.

3. EMULSIONES BITUMINOSAS

Son dispersiones coloidales de pequeñas partículas (algunas micras) de betún puro o fluidificado en agua con un agente emulsionante. Este agente puede ser de carácter aniónico (emulsiones EA) o catiónico (emulsiones EC) y permite obtener distintos niveles de estabilidad fisicoquímica, lo que da lugar a distintos tipos de emulsiones, caracterizadas en este sentido por su velocidad de rotura rápida (EAR o ECR), media (EAM o ECM) o lenta (EAL o ECL). Dentro de cada

grupo existen variantes según la concentración de ligante. Existen además unos tipos específicos para riegos de imprimación (EAI o ECI). Por otra parte, en algunos tipos puede interesar que el betún empleado esté modificado con polímeros (EXX-m).

Las principales aplicaciones de los diferentes tipos de emulsiones bituminosas son las siguientes:

EAR-0 y EAR-1: Riegos de adherencia y riegos de curado.

EAR-2: Riegos con gravilla con áridos de naturaleza básica.

EAM y EAM-m: Mezclas bituminosas abiertas en frío con áridos de naturaleza básica.

EAL-1: Mezclas con finos y gravaemulsión con áridos de naturaleza básica y riegos de imprimación.

EAL-2: Lechadas bituminosas, mezclas densas en frío y gravaemulsión con áridos de naturaleza básica.

EAI: Riegos de imprimación.

ECR-0, ECR-1 y ECR-1-m: Riegos de adherencia.

ECR-2, ECR-2-m, ECR-3, ECR-3-m: Riegos con gravilla.

ECM y ECM-m: Mezclas bituminosas abiertas en frío.

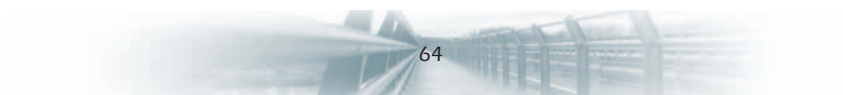
ECL-1: Mezclas con finos.

ECL-2: Lechadas bituminosas, mezclas densas en frío y gravaemulsión.

ECL-2-m: Lechadas bituminosas.

ECI: riegos de imprimación.

En cualquier caso, el empleo de las emulsiones asfálticas suele requerir, en general, una adaptación de su formulación al tipo de aplicación y al árido concreto que se va a utilizar. Por ello, resulta muy recomendable pedir en cada caso al suministrador de la emulsión un estudio específico.



1. INTRODUCCIÓN

En la técnica de carreteras se emplean diversos tipos de conglomerantes y otros materiales de naturaleza inorgánica y mineral, obtenidos a partir de materias primas naturales, y en su caso de subproductos industriales, que han sufrido algún proceso térmico. Como otros materiales se emplean también dichas materias primas y subproductos.

Las materias primas utilizables directamente son las puzolanas naturales de naturaleza volcánica; los subproductos industriales son las cenizas volantes de las centrales termoeléctricas y las escorias granuladas de horno alto.

Entre los conglomerantes citados destacan los hidráulicos, constituidos por los cementos y ciertas cales, y los aéreos integrados por ciertas otras cales.

2. MATERIAS PRIMAS Y SUBPRODUCTOS

2.1. Puzolanas naturales

Se pueden emplear en la construcción de bases y subbases de grava-puzolana o arena-puzolana, si bien su aplicación más habitual en España es formando parte como componentes principales de los cementos que las contienen, en cuyo caso deben cumplir las especificaciones que para ellas se estipulan en la Norma de Cementos Comunes UNE-EN 197-1:2000. Las puzolanas naturales se suelen activar con cal o con cemento.

2.2. Cenizas volantes

Se emplean generalmente en capas de bases y de subbases, como componentes de los materiales denominados grava-ceniza y arena-ceniza. Para su activación se puede utilizar cal o cemento en ciertas proporciones.

Otra aplicación de las cenizas volantes es la estabilización de suelos para la formación de explanadas.

No obstante, su empleo más frecuente es como componente de los cementos que las contienen, debiendo cumplir en tal caso las especificaciones que para las mismas se señalan en la Norma de Cementos Comunes UNE-EN 197-1:2000.

En el caso de que por circunstancias especiales se empleara como conglomerante una mezcla de cemento y cenizas silíceas realizada en obra, éstas deberán cumplir las siguientes prescripciones complementarias que serán sometidas diariamente a control de recepción, según el capítulo correspondiente del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3:

- contenido de inquemados inferior al 6%;
- superficie específica Blaine superior a 2.000 cm²/g;
- paso por el tamiz de 0,040 mm no inferior a 55%;
- características químicas constantes.

2.3. Escorias granuladas

Su principal aplicación es en el material denominado grava-escoria, utilizable en bases y subbases, aún cuando, como en el caso de las puzolanas naturales y las cenizas volantes, su utilización básica es como componente de los cementos que las contienen, para lo cual han de satisfacer las prescripciones que para las mismas señala la Norma de Cementos Comunes UNE-EN 197-1:2000.

Utilizadas para grava-escoria, en el correspondiente capítulo del PG-3 figuran las siguientes prescripciones complementarias que han de satisfacer:

- coeficiente de reactividad $\alpha > 20$;
- los valores máximos de agua h , respecto de la masa seca de la escoria, dependiendo de su coeficiente de actividad a , serán:

$20 < \alpha < 40$	$h < 15 \%$
$40 < \alpha < 60$	$h < 20 \%$
$60 < \alpha$	$h < 25 \%$
- curva granulométrica comprendida dentro de los límites indicados en la tabla 6.2.1.

En ocasiones, la grava natural componente de la grava-escoria se ha sustituido por escoria triturada, resultando así los materiales que, activados con cemento o cal, se denominan escoria-escoria-cemento o escoria-escoria-cal, respectivamente.

Como consideración final relativa a la utilización de las citadas materias primas y subproductos -puzolanas naturales, cenizas volantes y escorias granuladas de horno alto-, hay que tener en cuenta que su empleo resulta justificado desde un punto de vista económico, si sus fuentes de suministro se encuentran a una distancia razonable, generalmente no superior a 100 km del punto donde vayan a ser utilizadas, debiendo ser preparadas correctamente, es decir, seleccionadas, homogeneizadas y secadas, o tratadas térmicamente cuando proceda.

3. CEMENTOS

Los cementos son compuestos finamente molidos que, convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidratación e hidrólisis parcial de sus constituyentes, dando lugar a productos mecánicamente resistentes y estables tanto en el aire como bajo el agua.

Dentro de los cementos se distinguen los obtenidos a base de clinker portland, es decir, a partir de materias primas calizas y arcillosas, y los resultantes de clinker aluminoso, esto es, procedentes de materias primas calizas y bauxíticas, los cuales sólo son utilizables en aplicaciones muy concretas y restringidas.

Entre los cementos comunes a base de clinker portland figuran los propios cementos portland, que como consecuencia de las citadas reacciones de hidratación e hidrólisis de sus constituyentes forman productos hidratados estables; los cementos puzolánicos -clinker portland más materiales puzolánicos de naturaleza silicoaluminosa, bien naturales (puzolanas de origen

volcánico o bien subproductos (cenizas volantes de centrales termoeléctricas)-, los cuales en presencia de agua forman además, por combinación del material puzolánico con la cal de hidrólisis de los constituyentes del clinker, otros productos hidratados asimismo estables, con propiedades análogas o las de los originados por los constituyentes de los cementos portland; los cementos con escorias granuladas de horno alto -siderúrgicas-, las cuales aportan propiedades hidráulicas adicionales; y los cementos portland compuestos, y compuestos a secas, los cuales pueden contener tanto materiales puzolánicos como escorias granuladas de horno alto, además del clinker portland, y que tienen propiedades intermedias y comunes con los anteriores.

Todos estos cementos, con sus respectivas composiciones, son los incluidos en la tabla 6.2.2, reproducción de la correspondiente de la Norma UNE-EN 197-1:2000, cuyas prescripciones se recogen también en la Instrucción RC para la Recepción de Cementos, y en el Artículo 202 del PG-3.

Aparte de estos cementos llamados "comunes" y considerados como tales, hay otros, asimismo normalizados, los cuales tienen propiedades y características especiales o adicionales: los resistentes a sulfatos -Norma UNE 80303-1:2001-; los resistentes al agua de mar -Norma UNE 80303-2:2001-; los de bajo calor de hidratación -Norma UNE 80303-3:2001-; los blancos -Norma UNE 80305:2001-; los cementos para usos especiales -Norma UNE 80307:2001-; los naturales -Norma UNE 80309:94-; y los de aluminato de calcio -Norma UNE 8310:96-.

Todos estos cementos, salvo los de las tres últimas normas, deben tener el tiempo de fraguado y la estabilidad de volumen, así como las resistencias mecánicas normales N, o altas iniciales - a corto plazo- R, incluidos en la tabla 6.2.3. Las características químicas se recogen en la tabla 6.2.4.

De entre los "no comunes" merecen mención especial aparte por su mayor empleo en carreteras, los cementos "para usos especiales" de la Norma UNE 80307:2001 (ESP VI-1), cuya composición y características físicas y químicas se dan en las tablas 6.2.5, 6.2.6 y 6.2.7.

Hay que tener en cuenta que las clases de resistencia del cemento ESP VI-1: 22,5, 32,5, 42,5 - en todo caso N-, señalan las mínimas exigibles, no a 28 días, como en el caso de los cementos comunes, sino a 90 días, con las correspondientes mínimas a 28 días señaladas en la tabla 6.2.6.

La identificación de un cemento de cada una de las normas antes citadas (referida a los cementos comunes de la Norma UNE-EN 197-1:2000 incluidos en la tabla 6.2.2) se hace señalando su tipo -CEM I a CEM V-; el subtipo -A o B-, separado del anterior por una barra (/) y seguido, en algún caso entre paréntesis -()-, de los símbolos de los componentes principales -clinker K aparte: S, D, P, Q, V, W, T, L o LL de que conste, separados por guiones (-); y seguido a su vez de la indicación de la clase de resistencia del cemento, según las incluidas en la tabla 6.2.3 -32,5, 42,5, 52,5, N o R- según el caso; y finalmente, separada de lo anterior por un espacio, la indicación de la Norma que afecta al cemento, suprimiendo de ella el año de la misma por entenderse que, en todo caso, se trata de la última norma en vigor.

Así, por ejemplo, un cemento de tipo puzolánico (CEM IV) y subtipo B, constituido por ceniza volante silíceo V y caliza L -además de clinker-, esto es, con adición total de materiales puzolánicos (V+L) comprendida entre el 36% y el 55%, de clase de resistencia 32,5 N, según la Norma UNE-EN 197-1:2000, se expresaría e identificaría así:

CEM IV/B (V-L) 32,5 N UNE-EN 197-1

Y de modo semejante, según lo ya señalado, en los casos de otros cementos de otras normas.

4. CALES

Las cales se clasifican en aéreas e hidráulicas. Las primeras, obtenidas por calcinación de calizas con un contenido reducido de arcillas, están constituidas por óxido e hidróxido de calcio, endurecen por la acción del dióxido de carbono $-CO_2-$ atmosférico $-carbonatación-$ y generalmente carecen de propiedades hidráulicas, por lo cual no endurecen con el agua. Estas cales aéreas son las que se utilizan en la estabilización de suelos in situ.

Las cales hidráulicas, al contrario que las aéreas, sí endurecen con el agua, dando compuestos estables en contacto con ésta. Se obtienen por calcinación de calizas margosas o margas calizas, cuyo contenido de arcilla es superior al 30%.

Las prescripciones relativas a las cales aéreas están contenidas en las Normas UNE 80502:97, UNE-EN 459-1, 2 y 3, así como en la Instrucción RCA-92 para la recepción de cales en obras de estabilización de suelos y en el Artículo 200 del PG-3, todos ellos referentes al empleo de dichas cales utilizables en la estabilización de suelos.

En las citadas Normas UNE se distinguen los siguientes tipos de cales aéreas según su composición química.

- Cales vivas: compuestas principalmente por óxidos de calcio y de magnesio, este último en cantidad no superior al 5% y comercializadas con distintas granulometrías, o molidas finamente, e incluso micronizadas; en contacto con agua dan reacción exotérmica;
- Cales apagadas o hidratadas: compuestas principalmente por hidróxido de calcio resultante de la hidratación controlada $-apagado-$ de las correspondientes cales vivas; se comercializan en forma de polvo seco o como lechada de cal; en contacto con agua no dan reacción exotérmica.

Por otra parte, considerando el empleo específico de dichas cales en la estabilización de suelos, las citadas Normas UNE admiten los dos tipos siguientes de las mismas:

- Tipo I: Cales clase Q: cales vivas con alto contenido de calcio: CL80Q o CL90Q.
- Tipo II. Cales clase S: cales apagadas o hidratadas con alto contenido de calcio: CL80S o CL90S.

Dichas Normas incluyen también, para ambos tipos de cales, especificaciones relativas a composición química, granulometría y reactividad que se han incluido en las tablas 6.2.8, 6.2.9 y 6.2.10. La Norma UNE-EN 459-2 señala también los ensayos que deben ser llevados a cabo y las circunstancias a tener en cuenta para el control de recepción de los lotes o suministros de cal. La Norma UNE 80502 indica cómo llevar a cabo el ensayo de reactividad de las cales para el control de recepción de las mismas.

Además de las especificaciones apuntadas, el Artículo 200 del PG-3 indica que las cales para estabilización de suelos deben tener un contenido de MgO menor del 10%; y que si éste es

superior a 7% deben cumplir ciertas condiciones de estabilidad de volumen. Asimismo, el Artículo 515 del PG-3 señala las prescripciones que ha de cumplir la cal utilizable como activador de la escoria en las gravas-escoria.

5. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

5.1. Relativas a los cementos

Por lo que se refiere a los cementos para ser utilizados en carreteras, los más aconsejables son, en general, aquéllos que no tengan un fraguado y un endurecimiento muy rápidos, ni desarrollen en corto plazo unas resistencias muy elevadas -por no ser necesarias- ni un gran calor de hidratación.

La razón es que estos materiales deben permitir un margen de tiempo suficiente para las operaciones de su correcta puesta en obra y reducir a un mínimo la fisuración por retracciones de todo tipo, tanto térmico como hidráulico.

En consecuencia los cementos más aconsejables son los de mayor contenido de adiciones, y principalmente los tipo CEM III, CEM IV/B y CEM V/B de las Normas UNE-EN 197-1:2000 y el tipo ESP VI-1 de la UNE 80307:2001. En caso de no disponerse de cementos de este tipo se pueden utilizar los del tipo CEM II/B, CEM IV/A y CEM V/A, si bien las especificaciones admiten el empleo de cualquier tipo de cemento, a excepción de los de aluminato de calcio CAC/R. Estos cementos y sus hormigones no se deben mezclar ni entrar en contacto con cualesquiera otros cementos y sus hormigones.

Por la misma razón son más recomendables para firmes y explanadas los cementos de clase resistente más baja: 32,5 N en el caso de los comunes y 22,5 N en el caso del ESP VI-1, estando sólo justificado el empleo de cementos de clase resistente más alta, 42,5 N o 42,5 R, cuando se trate de obras que precisen una apertura rápida a la circulación, o bien en épocas o lugares muy fríos, y siempre bajo los controles adecuados.

Los cementos pueden ser utilizados en gran número de unidades de obra, pudiendo intervenir en todas las capas de un firme. Sus aplicaciones más habituales son las siguientes:

- en pavimentos de hormigón vibrado y capas de hormigón compactado;
- en bases de hormigón magro vibrado y compactado;
- en bases y subbases de grava-cemento;
- en bases y subbases de suelo-cemento;
- en la formación de explanadas con suelos estabilizados con cemento o con cal y cemento;
- con polvo mineral en mezclas bituminosas.

El control de recepción de los cementos se debe realizar con cada lote, mediante los ensayos que acreditan que se cumplen todas las prescripciones técnicas exigidas en las Normas (ensayos de composición, físicos, mecánicos y químicos). Según el Artículo 202 del PG-3 se considera como un lote la cantidad de cemento del mismo tipo y procedencia, recibida semanalmente en el caso de suministros continuos, o cada uno de los suministros en el caso de que éstos sean discontinuos.

No será necesario realizar ensayos de recepción cuando el cemento posea un distintivo de calidad oficialmente reconocido por la Administración competente de cualquier Estado del Espacio Económico Europeo (como por ejemplo la Marca N AENOR). La posesión del Mercado CE (obligatorio) no exime de la realización de los ensayos de recepción.

5.2. Relativas a las cales

En lo que atañe a las cales, tanto las vivas de tipo Q (CL80Q y CL90Q) como las apagadas e hidratadas de tipo S (CL80S y CL90S), encuentran sus principales aplicaciones en la estabilización de suelos para la formación de explanadas.

El control de recepción de las cales se lleva a cabo en cada lote de las mismas. Se entiende por lote la cantidad de cal de la misma clase y procedencia recibida semanalmente en suministros continuos, o cada uno de los suministros en el caso de que éstos sean discontinuos (art 200 del PG-3). Los ensayos de control de recepción están recogidos en las normas UNE-EN 459-2 (contenidos de óxidos de calcio y de magnesio, dióxido de carbono y finura) y UNE 80 502 (reactividad). Además deberá conservarse una muestra de cada suministro durante 100 días para posibles ensayos de contraste.

TABLA 6.2.1 Curva granulométrica de la escoria granulada para su empleo en gravaescoria

TAMIZ UNE-EN 933-2 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)
4	90-100
2	65-95
1	35-80
0,500	20-45
0,250	8-25
0,125	3-15
0,063	1-10

TABLA 6.2.2 Tipos de cementos y composiciones: proporción en masa¹⁾ (Norma UNE-EN 197-1:2000)

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa ¹⁾)													Componentes minoritarios	
			Componentes principales										Caliza ⁴⁾				
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D ²⁾	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	L	LL					
			Natural P	Natural Calcinada Q	Silíceas V	Calcáreas W											
CEM I	Cementos portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cementos portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5	
	Cementos portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Cementos portland con puzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5 0-5 0-5	
	Cementos portland con ceniza volante	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	6-20 21-35	-	-	-	0-5 0-5 0-5 0-5	
	Cementos portland con esquistos calcinados	CEM II/A-T CEM II/B-T	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5 0-5	
	Cementos portland con caliza	CEM II/A-L CEM II/B-L CEM II/A-LL CEM II/B-LL	80-94 65-79 80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20 21-35	-	6-20 21-35	0-5 0-5 0-5 0-5	
	Cementos portland compuesto ³⁾	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5	
	CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5 0-5
		Cemento puzolánico ³⁾	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
		Cemento compuesto ³⁾	CEM V/A CEM V/B	40-64 20-38	18-30 31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5

1) Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios (núcleo de cemento).

2) El porcentaje de humo de sílice está limitado al 10%

3) En cementos Portland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B los componentes principales diferentes del clinker deben ser declarados en la designación del cemento (véase artículo 5° de la Instrucción RC).

4) El contenido de carbono orgánico total (TOC), determinado conforme al EN 13639:1999, será inferior al 0,20% en masa para calizas LL, o inferior al 0,50% en masa para calizas L.

TABLA 6.2.3 Exigencias mecánicas y físicas de los cementos

Clase de Resistencia ¹⁾	Resistencia a compresión (N/mm ²) según UNE-EN 196-1:1996 ²⁾				Tiempo de fraguado según UNE-EN 196-3:1996		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3:1996
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio (min)	Final (horas)	Expansión (mm)
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	-					
42,5N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	-					
52,5N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0	-					

- 1) R = Alta resistencia inicial
N = Resistencia inicial normal
- 2) 1 N/mm² = 1 MPa

TABLA 6.2.4 Exigencias químicas de los cementos

Característica	Norma de ensayo	Tipo de cemento	Clase de resistencia	Prescripción ¹⁾
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2:1996	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2:1996 ²⁾	CEM I CEM III	Todas	≤ 5,0 %
Contenido de sulfatos (expresado como SO ₃)	UNE-EN 196-2:1996	CEM I CEM II ³⁾	32,5 N 32,5 R 42,5 N	≤ 3,5 %
		CEM IV CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	≤ 4,0 %
		CEM III ⁴⁾	Todas	
Contenido de Cloruros (CL ⁻)	UNE 80217:1991 (EN 196-21)	Todos ⁵⁾	Todas	≤ 0,10 % ⁶⁾
Puzolanicidad	UNE-EN 196-5:1996	CEM IV	Todas	Puzolanicidad a la edad de 8 ó 15 días

- 1) En el caso en que las prescripciones se expresan en porcentajes, estos se refieren a la masa del cemento final.
- 2) La determinación del residuo insoluble se realizará por el método basado en la disolución de la muestra en ácido clorhídrico y posterior ataque con disolución de carbonato de sodio.
- 3) El cemento tipo CEM II/B-T puede contener hasta el 4,5% de sulfato para todas las clases de resistencia.
- 4) El cemento tipo CEM III/C puede contener hasta el 4,5% en masa de sulfato.
- 5) El tipo de cemento CEM III puede contener más del 0,10% de cloruros, pero en tal caso el contenido real debe ser consignado en los sacos y albaranes de entrega.
- 6) Para aplicaciones de pretensado, el cemento puede haber sido fabricado expresamente con valores de cloruros inferiores al máximo admisible. En este caso, se debe expresar el valor real en los sacos y albaranes de entrega, reemplazando en su caso, el valor por defecto del 0,10% en masa.

TABLA 6.2.5 Cementos para usos especiales (Norma UNE 80307:2001):

Tipos de cementos y composiciones (proporción en masa)¹⁾

Tipos de cemento	Designación	Clínker (K)	Escorias de horno alto (S)	Puzolanas naturales ²⁾ (P)	Cenizas Volantes (V)	Componentes minoritarios adicionales ³⁾
ESP VI-1	ESP VI-1	25 - 55	45 - 75			0 - 5

1) Los valores de la tabla se refieren a % en masa respecto al núcleo de cemento, entendiéndose por tal, el clínker y las adiciones, con exclusión del sulfato de calcio (regulador de fraguado) y de los aditivos.

2) El contenido de puzolana natural no deberá ser superior al 40%.

3) Los componentes minoritarios adicionales pueden ser filler, o uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

TABLA 6.2.6 Cementos para usos especiales (Norma UNE 80307:2001). Exigencias mecánicas y físicas

Clases resistencia	Resistencia a compresión N/mm ² UNE-EN 196-1:1996		Tiempo de fraguado UNE-EN 196-3:1996		Estabilidad de Volumen UNE-EN 196-3:1996
	28 días	90 días	Inicio (min)	Final (horas)	Expansión (mm)
22,5	≥ 12,5	≤ 32,5	≥ 60	≤ 12	≤ 10
32,5	≥ 22,5	≤ 42,5			
42,5	≥ 32,5	≤ 52,5			

TABLA 6.2.7 Cementos para usos especiales (Norma UNE 80307:2001). Exigencias químicas

Tipo de cemento	Prescripciones	
	Contenido de sulfatos (expresado como SO ₃) UNE-EN 196-2: 1996	Contenido de cloruros (expresado como CL) UNE 80217:1991 (EN 196-21)
ESP VI-1	≤ 3,5%	≤ 0,10%

TABLA 6.2.8 Composición química de las cales para estabilización de suelos

Tipos de Cal	Contenido en [CaO+MgO]	MgO	CO ₂
CL 90Q CL 90S	> 90 %	< 5%	< 4%
CL 80Q CL 80S	> 80 %	< 5%	< 7%

Los valores se aplican a todos los tipos de cales. Para las cales vivas (Q) estos valores corresponden al producto acabado. Para las cales hidratadas (S), los valores se refieren al producto exento de agua libre y de agua combinada. Ver capítulo 4.1.5 de la Norma UNE EN 459-2 2001.

Los valores de la tabla se expresan en porcentajes en masa.

TABLA 6.2.9 Granulometría y reactividad de las cales vivas (clase Q) para estabilización de suelos

Propiedad	Valores especificados
Retenido por el tamiz de 3 mm	0 %
Retenido por el tamiz de 2 mm	5% máximo
Reactividad con agua t'60°C	15 min, máximo

TABLA 6.2.10 Granulometría y humedad de las cales apagadas (clase S) para estabilización de suelos

Propiedad	Valores especificados
Retenido por el tamiz de 0,2 mm	2 % máximo
Humedad	2 % máximo

1. INTRODUCCIÓN

La zahorra natural es un material granular de granulometría continua formado por áridos no triturados, suelos, productos inertes de desecho industrial o mezclas de éstos.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Los empleos más característicos de la zahorra natural son la formación de explanadas y las capas de subbase. En este sentido, la función estructural de una zahorra natural es la de asegurar un soporte de resistencia mecánica adecuada al pavimento.

El aporte estructural de la zahorra natural depende de sus características propias (granulometría y plasticidad), del espesor de la capa y, sobre todo, de la capacidad resistente del material subyacente. Así, a efectos de cálculo estructural, se admite que el módulo elástico de una zahorra natural es proporcional, con un factor multiplicador de 1,5 o 2, al módulo elástico de la capa inferior.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Se recogen en las tablas 6.3.1 y 6.3.2 las granulometrías recomendables y las características más destacadas a exigir a los áridos, respectivamente.

La denominación utilizada es la ZN(x), siendo x el tamaño máximo nominal de la zahorra natural expresado en milímetros (abertura del primer tamiz que retiene más de un diez por ciento en masa).

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

La zahorra natural puede constituir una alternativa ante la carencia de zahorras artificiales de adecuada calidad o a algunos materiales tratados, generalmente in situ, para la ejecución de subbases en carreteras de baja intensidad de tráfico. Su empleo resulta recomendable en el caso, poco habitual, de que se disponga de dichos materiales en cantidad y calidad suficiente, en un entorno muy próximo a la traza de la carretera, y su extracción sea poco costosa.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Debe prestarse atención antes de la extensión de la zahorra natural para que tanto la regularidad superficial como la compactación de la superficie de apoyo sean las adecuadas.

En los puntos de extracción o de procedencia del material deberá acopiarse éste en cantidad suficiente para asegurar un suministro homogéneo a la obra. Naturalmente dicho acopio deberá ser controlado previamente a su empleo.

La extensión podrá efectuarse mediante motoniveladoras o extendedoras, en espesores no superiores en principio a 30 cm, salvo que se compruebe que se consiguen los valores exigidos en la tabla 6.3.3 con los equipos de compactación disponibles.

La humectación de la zahorra natural, para alcanzar el óptimo del ensayo Proctor modificado, podrá realizarse en central o in situ, pero en cualquier caso antes de empezar la compactación. Se admitirá una tolerancia máxima del 1 % respecto al óptimo, y se preferirá el lado seco al húmedo.

La compactación se realizará con rodillos vibratorios o compactadores de neumáticos pesados, realizando un tramo de prueba previo que permita determinar el número de pasadas y el nivel de humedad más adecuado al equipo disponible.

Una vez terminada la compactación y realizadas las comprobaciones pertinentes, se evitará, en lo posible, el paso del tráfico antes de la realización de la capa superior. En caso de que esto no fuera posible y se produjeran alteraciones del acabado, o el perfil obtenido no fuera suficientemente bueno, deberá corregirse éste mediante un ligero escarificado seguido de reperfilado y compactación.

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de la zahorra natural se realiza mediante la comprobación de las características del material, de la densidad obtenida, del módulo E_{v2} en el ensayo de carga con placa y de la terminación geométrica. Las limitaciones recomendadas son las recogidas en las tablas 6.3.2 y 6.3.3.

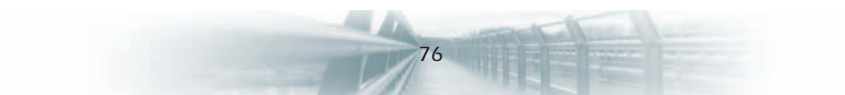


TABLA 6.3.1 Granulometrías de zahorras naturales

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO ACUMULADO (% EN MASA)		
	ZN (40)	ZN(25)	ZN(20)
50	100	-	-
40	80-95	100	-
25	60-90	75-95	100
20	54-84	65-90	80-100
8	35-63	40-68	45-75
4	22-46	27-51	32-61
2	15-35	20-40	25-50
0,500	7-23	7-26	10-32
0,250	4-18	4-20	5-24
0,063	0-9	0-11	0-11

El cernido por el tamiz de 0,063 mm deberá ser inferior a los dos tercios del cernido por el tamiz de 0,250 mm.

TABLA 6.3.2 Características de los áridos de una zahorra natural

Características	Norma UNE	Calzadas T2-T3	Calzadas T4 Arcenes T2	Arcenes T3-T4
Desgaste Los Angeles	EN 1097-2	≤ 35	≤ 40	≤ 45
Equivalente de arena	EN 933-8	> 35	> 30	> 25
Plasticidad	103103-103104	NP	IP < 6 LL < 25	
CBR	103502	> 60	> 40	> 30

TABLA 6.3.3 Control de calidad de las capas de zahorra natural

Características	Norma	Calzadas T2-T3	Calzadas T4 Arcenes T2	Arcenes T3-T4
Densidad/Densidad óptima P.M.	UNE 103501	≥ 98%	≥ 97%	≥ 95%
Módulo E _{v2} (MPa)	NLT-357	≥ 80	≥ 60	≥ 60
Diferencia del perfil obtenido respecto del perfil teórico		≤ 20 mm	≤ 25 mm	≤ 30 mm

1. INTRODUCCIÓN

La zahorra artificial es un material granular de granulometría continua formado por áridos triturados total o parcialmente.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las zahorras artificiales se emplean para la formación de capas de base o subbase con cualquier categoría de tráfico pesado.

Las zahorras artificiales son materiales sin cohesión que resisten por rozamiento interno. Por tanto, la aportación estructural de una capa de zahorra artificial dependerá de su espesor, de su coeficiente de rozamiento interno y de la capacidad resistente de la capa sobre la que se apoya. En este sentido, suele admitirse que el módulo elástico de una zahorra artificial es proporcional, con un factor multiplicador de 2 a 3, al módulo de la capa inferior.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Se recogen en las tablas 6.4.1 y 6.4.2 las granulometrías recomendables y las características de los áridos más destacadas, respectivamente.

La denominación utilizada es la ZA(x), siendo x el tamaño máximo nominal del árido expresado en milímetros (abertura del primer tamiz que retiene más de un diez por ciento en masa). Además se recoge un tipo designado como ZAD destinado a ser utilizado como capa granular drenante.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

La zahorra artificial es uno de los materiales más tradicionales para la ejecución de capas de base, especialmente en firmes con intensidades medias y bajas de tráfico pesado. El funcionamiento correcto de una zahorra artificial depende de la calidad del árido y de una colocación correcta, especialmente de una buena compactación. Estas condiciones deben mantenerse en el tiempo, por lo que es imprescindible que el soporte de la zahorra artificial no contamine ésta.

Son especialmente recomendables las zahorras artificiales con bajo contenido de finos, ya que a pesar de sus dificultades de puesta en obra, permiten obtener capas menos sensibles a la acción del agua que mejoran el funcionamiento del firme.

Respecto a otros materiales alternativos, la zahorra artificial resulta un material técnica y económicamente adecuado siempre y cuando pueda obtenerse en las proximidades de la traza.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Debe prestarse atención antes de la extensión de la zahorra artificial para que tanto la regularidad superficial como la compactación de la superficie de apoyo sean las adecuadas.

En los puntos de extracción o de procedencia del material deberá acopiarse éste en cantidad

suficiente para asegurar un suministro homogéneo a la obra. Naturalmente dicho acopio deberá ser controlado previamente a su empleo.

La extensión podrá efectuarse mediante motoniveladoras o extendedoras, en espesores no superiores en principio a 30 cm, salvo que se compruebe que se consiguen con los equipos de compactación disponibles los valores exigidos en la tabla 6.4.3 en todos los casos.

La humectación de la zahorra artificial, para alcanzar el óptimo del ensayo Proctor modificado, podrá realizarse en central o in situ, pero en cualquier caso antes de empezar la compactación. Se admitirá una tolerancia máxima del 1 % respecto al óptimo, y se preferirá el lado seco al húmedo.

La compactación se realizará con rodillos vibratorios o con compactadores de neumáticos pesados, realizando un tramo de prueba previo que permita determinar el número de pasadas y el nivel de humedad más adecuado al equipo disponible.

Una vez terminada la compactación y realizadas las comprobaciones pertinentes, se evitará, en lo posible, el paso del tráfico antes de la realización de la capa superior. En caso de que esto no fuera posible se dispondrá un riego de imprimación protegido con árido, que se barrerá y limpiará antes de disponer la capa superior. Si se produjeran alteraciones del acabado, o el perfil obtenido no fuera suficientemente bueno, deberá corregirse éste mediante un ligero escarificado seguido de reperfilado y compactación.

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de la zahorra artificial se realiza mediante la comprobación de las características del material, de la densidad obtenida, del módulo E_{v2} en el ensayo de carga con placa y de la terminación geométrica. Las limitaciones son las recogidas en las tablas 6.4.2 y 6.4.3.

TABLA 6.4.1 Granulometrías de zahorras artificiales

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)		
	ZA (25)	ZA (20)	ZAD (20)
40	100	-	-
25	75-100	100	100
20	65-90	75-90	65-100
8	40-63	45-73	30-58
4	26-45	31-54	14-37
2	15-32	20-40	0-15
0,500	7-21	9-24	0-6
0,250	4-16	5-18	0-4
0,063	0-9	0-9	0-2

El cernido por el tamiz de 0,063 mm deberá ser inferior a los dos tercios del cernido por el tamiz de 0,250 mm

TABLA 6.4.2 Características de los áridos de una zahorra artificial

Características	Norma UNE	Calzadas T2-T3	Calzadas T4 Arcenes T2	Arcenes T3-T4
Áridos con 2 o más caras fracturadas	EN 933-5	> 75%	> 60	> 50
Índice de lascas	EN 933-3	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Desgaste Los Angeles	EN 1097-2	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Equivalente de arena	EN 933-8	> 40	> 35	> 30
Plasticidad	103103-103104	NP	NP	NP
CBR	103502	> 80	> 60	> 40

TABLA 6.4.3 Control de calidad de las capas de zahorra artificial

Características	Norma	Calzadas T2-T3	Calzadas T4 Arcenes T2	Arcenes T3-T4
Densidad/Densidad óptima P.M.	UNE 103501	≥ 100%	≥ 98%	≥ 97%
Módulo E_v (MPa) en base	NLT-357	≥ 100	≥ 80	≥ 60
Diferencia del perfil obtenido respecto del perfil teórico		≤ 15 mm	≤ 15 mm	≤ 20 mm

1. INTRODUCCIÓN

El macadam es un material granular constituido por un conjunto de áridos de granulometría discontinua, que se obtiene extendiendo y compactando un árido grueso de granulometría uniforme cuyos huecos, al menos en la parte superior de la capa, se rellenan con un árido fino denominado recebo.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El macadam se emplea para la formación de capas de base de firmes en vías con tráficos pesados de intensidades medias y bajas. Tradicionalmente el comportamiento del macadam para tal fin ha resultado en general satisfactorio, de tal forma que está considerado un excelente material de base para firmes flexibles. El funcionamiento resistente de un macadam es similar al de las zahorras artificiales, pero, debido a sus características propias, su aportación estructural puede considerarse incluso algo superior a la de aquéllas para un mismo espesor.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Se recogen en las tablas 6.5.1 y 6.5.2 las granulometrías recomendables para el árido grueso y para el recebo, y las características más destacadas exigibles a ambos, respectivamente.

La denominación utilizada es M(x), siendo x el tamaño máximo del macadam expresado en milímetros.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El macadam constituye, como se ha indicado, una de las alternativas de mayor calidad para la construcción de capas de base en firmes flexibles. Sin embargo, su correcta ejecución no es sencilla, además de difícilmente mecanizable, por lo que únicamente deberá emplearse cuando se disponga de contratistas muy experimentados y áridos adecuados.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Tradicionalmente el macadam se ha utilizado en capas de 10 a 20 cm. El tipo de macadam está en relación con el espesor de la capa, siendo lo más recomendable el empleo de un macadam con un tamaño máximo del orden de la mitad a la tercera parte del espesor de capa. Como árido fino debe utilizarse una arena 0/5 o 0/3, preferentemente obtenida mediante trituración.

Previamente a la extensión del árido grueso, deberá comprobarse que el soporte reúne unas condiciones adecuadas: en el caso de obras nuevas, que la capa inferior tiene una regularidad y una compactación suficientes, así como que en el futuro no habrá peligro de contaminación del macadam; en el caso de refuerzos, habrá que realizar un saneamiento previo de los blandones y, preferentemente, una escarificación del firme existente.

La extensión del árido grueso puede realizarse mediante unos distribuidores específicos de macadam (acoplados a la parte posterior de la caja de un camión volquete) o bien con una motoniveladora. En este último caso debe evitarse un número excesivo de pasadas que pudieran producir el redondeo del árido. Una vez extendido el árido grueso se procederá a su

compactación empezando por los bordes exteriores y solapando cada pasada con la anterior. Se utilizarán compactadores de rodillos metálicos o mixtos. La compactación se continuará hasta que el árido grueso quede bien trabado, pero sin utilizar la vibración.

La extensión del árido fino, que debe estar lo más seco posible, se realizará mediante distribuidores de gravilla o a mano. La dotación total del recebo, que será aproximadamente del 30 al 40 % en volumen del árido grueso, se repartirá en dos o más aplicaciones. Tras cada una de las aplicaciones de árido fino se compacta, preferentemente por vibración, y se riega con agua hasta conseguir que penetre totalmente entre los huecos del árido grueso. Deberá evitarse un exceso de vibración que produzca la descompactación del macadam. Las zonas que hayan quedado con algún defecto en el recebo podrán retocarse manualmente con ayuda de cepillos.

En el caso de que el macadam vaya a soportar la acción directa del tráfico antes de la ejecución del pavimento (riego con gravilla o mezcla bituminosa), se evitará la canalización del tráfico y se dejará un exceso de recebo en la superficie, el cual deberá ser barrido antes de las operaciones posteriores.

6. CONTROL DE CALIDAD

Independientemente de los controles propios de los materiales y de la ejecución, se comprobará que el perfil de la superficie acabada no difiere del perfil teórico en más de 20 mm.

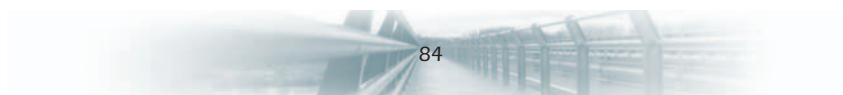


TABLA 6.5.1 Husos granulométricos para capas de macadam

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)			
	M (60)	M (50)	M (40)	Recebo
80	100	–	–	–
63	85-100	100	–	–
50	–	85-100	100	–
40	–	–	85-100	–
25	0,15	0,15	–	–
20	–	–	0,15	–
8	0,5	0,5	0,5	100
4	0,2	0,2	0,2	75-100
0,063	–	–	–	10-20

TABLA 6.5.2 Características de los áridos para capas de macadam

Características	Norma UNE	Árido grueso	Recebo
Elementos con 2 o más caras de fractura	EN 933-5	> 75%	
Índice de lajas	EN 933-3	< 30	
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	≤ 30	
Equivalente de arena	EN 933-8		> 35
Índice de plasticidad	103103-103104		NP

1. INTRODUCCIÓN

El suelo estabilizado in situ con cal es el material resultante de la mezcla uniforme y homogénea de un suelo, cal y eventualmente agua, realizada sobre la misma traza de la carretera y convenientemente compactada, cuyo fin es disminuir la sensibilidad al agua y aumentar la capacidad de soporte del suelo.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La utilización habitual de los suelos estabilizados in situ con cal es en la formación de explanadas, aunque pueden emplearse también para construir terraplenes con suelos marginales o inadecuados, o para reducir la humedad de un suelo permitiendo transitar por él.

Se pueden definir dos tipos de suelos estabilizados in situ con cal:

- S-EST 1: CBR de la mezcla a 7 días ≥ 6 ;
contenido de cal $\geq 2,5\%$ (puede reducirse hasta el 2,0% si se dosifica en lechada).
- S-EST 2: CBR de la mezcla a 7 días ≥ 12 ;
contenido de cal $\geq 3\%$;

Ambos tipos de suelo estabilizado in situ con cal se comportan a corto plazo como materiales granulares. No obstante, las reacciones puzolánicas que se generan entre la cal y algunos silicatos y aluminatos de los suelos arcillosos conducen a que, a largo plazo, el suelo estabilizado in situ con cal se transforme en un material relativamente rígido, cuya resistencia mecánica va creciendo con el tiempo.

La estabilización con cal permite utilizar suelos inadecuados o tolerables en la capa superior de las empleadas en la formación de explanadas E1 o E2, en las que, en caso de no recurrirse a dicha técnica, habría que disponer respectivamente suelos adecuados o seleccionados. Al aumentar la categoría de explanada es posible, según el tipo de firme utilizado, disminuir el espesor de una o varias de las capas e incluso prescindir de la subbase en algunos casos.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Los suelos más adecuados para una estabilización con cal son los de granulometría fina y de plasticidad apreciable. Los suelos a emplear no deberán contener elementos de tamaño superior a 80 mm. Su cernido en masa por el tamiz de 0,063 mm no será inferior al 15%. El índice de plasticidad no deberá ser inferior a 12, mientras que en explanadas E2 tendrá un valor máximo de 40 (UNE 103104). Cuando dicho índice sea superior a 50, la mezcla del suelo con la cal se realizará en dos etapas. Por otra parte, deberán ser suelos exentos de materia vegetal; su contenido en masa de materia orgánica será inferior al 2% para los suelos estabilizados in situ con cal empleados en explanadas E1, o inferior al 1%, para su empleo en explanadas E2 (según UNE 103204) y su contenido en masa en sulfatos, expresado en SO_3 , no excederá del 1% (UNE 103201).

Si bien el PG-3 prescribe que debe utilizarse cal apagada, es frecuente el empleo de cal viva; ésta es más eficaz, ya que rebaja en mayor medida la humedad del suelo, es más densa y, a

igualdad de peso, contiene más iones calcio, lo que produce mayor reacción con el suelo. La cal apagada tiene, sin embargo, la gran ventaja de la seguridad de manejo. Por tanto, sólo deberá usarse cal viva cuando las operaciones de almacenamiento, transporte, extensión y mezcla estén muy automatizadas y no presenten peligro para los operarios.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizarán mediante ensayos de laboratorio, con muestras claramente representativas de las características del suelo. En el caso de que estas se modifiquen a lo largo de la traza, se dividirá en tramos homogéneos obteniendo una fórmula de trabajo para cada caso. Se partirá de la dotación mínima de conglomerante especificada para el caso a estudiar y se definirán con la misma la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Se determinará con la humedad óptima y el contenido mínimo de cal el índice CBR a los 7 días. Si el valor obtenido no es inferior al mínimo especificado, se adoptará dicho contenido de cal. En caso contrario, deberá aumentarse hasta obtener una dotación que permita cumplir con las prescripciones.

La fórmula de trabajo deberá señalar:

- la dosificación y el tipo de cal;
- en su caso, la humedad del suelo en el momento de su mezcla con la cal;
- la humedad de compactación;
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 97% de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado;

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El suelo estabilizado in situ con cal es una de las posibilidades existentes para la estabilización de suelos en la formación de explanadas. Su campo de aplicación más adecuado es el de las vías cuya traza esté constituida por suelos de granulometría fina y plasticidad apreciable, sin que se disponga de suelos tolerables o de categoría superior a una distancia que haga económicamente viable su transporte a obra, o suelos con contenidos muy elevados de agua, cuya humedad se quiera reducir para poderlos poner en obra.

Aunque, como ya se ha indicado, los suelos estabilizados in situ con cal están indicados para obtener explanadas E1 y E2, no hay que descartar la posibilidad de obtener una explanada E3 mediante un tratamiento mixto cal-cemento. El tratamiento previo con cal reduce la elevada cohesión del suelo, que podría provocar dificultades en el reparto del cemento, y disminuye el contenido de agua, que en muchas ocasiones es demasiado elevado. Por su parte, el tratamiento con cemento permite obtener a edades tempranas las resistencias mecánicas exigidas a los suelos estabilizados denominados S-EST 3.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El suelo a estabilizar se escarificará y disgregará previamente hasta que no presente terrones superiores a 80 mm.

La cal se distribuirá uniformemente, con la dosificación establecida, por medio de equipos mecánicos, a ser posible sincronizados con la velocidad de avance de su elemento tractor. Sólo se admitirá en el caso de superficies muy reducidas (inferiores a 1000 m²) la distribución manual de cal apagada. Salvo en el caso de ensanches estrechos, categoría de tráfico pesado T4, o que se pretenda reducir la humedad natural del suelo, la cal se deberá dosificar en forma de lechada. En dicho caso, en cada pasada se aprovechará para limpiar y comprobar el correcto estado de los difusores, realizándose dicha limpieza, al menos, al mediodía y al final de cada día. La cal en forma de lechada deberá aplicarse por pasadas sucesivas. En cada una de ellas la cal se mezclará con el suelo antes de realizar la siguiente pasada.

Si la mezcla del suelo con la cal se realiza en dos etapas, en cada una de ellas se aplicará la mitad de la dosificación total de cal prevista.

Los equipos más tradicionales para la realización de los suelos estabilizados in situ con cal son los mezcladores rotatorios de uno o varios ejes horizontales, bien arrastrados por un tractor agrícola o bien suspendidos en bastidores de vehículos concebidos expresamente para estabilizaciones (equipos tipo pulvimixer). Sin embargo, se dispone en la actualidad de equipos autopropulsados con potencia suficiente para garantizar una gran homogeneidad del tratamiento en toda su profundidad y en una sola pasada; estos equipos específicos de estabilización son los que deben utilizarse siempre, salvo en las obras de pequeña dimensión en las que la reducida superficie o anchura de trabajo limiten su empleo.

Si la cal se aplica en polvo, el agua necesaria se añadirá conforme se realice la mezcla. El sistema más eficaz para ello es el empleo de las barras regadoras integradas en los mezcladores. Si no se dispone de un equipo de estas características, puede recurrirse a un camión cisterna con barra regadora; sin embargo, el riego realizado de esta forma no es tan adecuado, ya que se forman regueros en las irregularidades del terreno y además el agua no penetra en éste de una manera uniforme. No se permitirá en ningún caso la extensión del agua con equipos que no controlen la dosificación aplicada y no realicen un reparto homogéneo.

Inmediatamente después de la distribución de la cal se deberá proceder a su mezclado con el suelo. Los elementos de mezclado adaptarán su velocidad para obtener la máxima eficacia y darán las suficientes pasadas hasta obtener una dispersión homogénea en el suelo de la cal aplicada, lo que se reconoce por un color uniforme y ausencia de grumos. La mezcla deberá hallarse suelta en todo su espesor. Todos los terrones deberán ser inferiores a 20 mm. Deberá comprobarse que los medios de mezclado alcanzan la profundidad establecida para la estabilización. En caso contrario, ésta deberá realizarse en varias tongadas.

Si la mezcla se realiza en dos etapas, el suelo estabilizado in situ con cal se dejará curar entre 24 y 48 horas, durante las cuales deberán evitarse variaciones de humedad, compactando ligeramente si hubiera riesgo de precipitaciones. Dicho plazo de curado deberá aumentarse si el índice de plasticidad del suelo fuera superior a 50.

No se permitirán segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, debiéndose detener los trabajos hasta que se elimine la causa que provoque el defecto.

Una vez realizado el mezclado se procederá a la compactación del material hasta alcanzar la densidad especificada en la fórmula de trabajo. En este tipo de materiales existe una dependencia

muy acusada entre la densidad obtenida y sus características de durabilidad y resistencia, por lo que deberá vigilarse que los equipos de compactación den el número de pasadas necesario hasta alcanzar los valores de densidad requeridos.

Al inicio de las obras se debe establecer en un tramo de prueba el plan de compactación, realizando diversas pasadas de rodillo (4 a 6 pasadas dobles) y midiendo con una sonda nuclear en varios puntos la densidad obtenida en cada pasada. Así se determinará el número de pasadas necesarias que tendrá que realizar cada rodillo para lograr la máxima compactación debiéndose mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo. Posteriormente, a lo largo de la obra se deberá corroborar el plan de compactación establecido.

Antes de terminar la compactación, se puede realizar un perfilado mediante refino con motoniveladora de los últimos centímetros para mejorar la rasante. Para ello se retirará parte del material, evitándose desplazamientos importantes del mismo para evitar segregaciones, y se evitará aportaciones en capa de pequeño espesor. Posteriormente se finaliza la compactación.

El conjunto de operaciones de mezclado, compactación y perfilado de todas las bandas de trabajo de una misma sección transversal deberán realizarse en un plazo, contado a partir de la humectación de la cal, que en general está comprendido entre 2 y 4 horas, dependiendo de la temperatura ambiente, no debiendo superar las 2 horas el plazo de construcción entre bandas contiguas.

Una vez compactada la capa de suelo estabilizado in situ con cal, deberá extenderse sobre ella un riego de curado. Si se realiza con agua, se deberá mantener la superficie húmeda con riegos constantes, al menos durante 7 días o hasta que se extienda la siguiente capa. En caso de tener que circular el tráfico se esperará hasta que no se produzcan deterioros superficiales y se protegerá el riego de curado con una capa de arena o gravilla, con una dotación de 4 a 6 l/m², que posteriormente se barrerá enérgicamente.

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad del suelo estabilizado in situ con cal debe atender principalmente a los siguientes puntos:

- comprobación de la dosificación y de la homogeneidad de la dotación de cal tras el paso de los equipos de distribución, mediante pesada al menos una vez a la semana sobre lonas o bandejas colocadas previamente a la extensión del conglomerante, y visualmente varias veces al día; además deberá controlarse el consumo diario de cal, obteniéndose la dotación media al dividir por los m² realizados.
- control de la densidad y humedad de referencia realizándose un ensayo Proctor modificado al inicio de la obra y otro cada 5.000 m³ de material o semana de trabajo;
- control de la densidad obtenida, que debe ser superior al 97 % de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, para lo que se debe disponer de equipos de control rápido en obra, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y corroborarse varias veces a lo largo del tiempo que dure la obra.

Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado;

- comprobación de la profundidad de tratamiento alcanzada, mediante la realización de calicatas en la banda estabilizada, tomando como referencia la banda sin estabilizar, que además servirán para comprobar la homogeneidad, humedad y color del material;
- medida de la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 20 mm;
- determinación del índice CBR a los 7 días, que deberán superar los mínimos establecidos para cada tipo de suelo estabilizado in situ con cal.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo estabilizado in situ con cemento es el material resultante de la mezcla uniforme y homogénea de un suelo, cemento y eventualmente agua, realizada sobre la misma traza de la carretera y convenientemente compactada, cuyo fin es disminuir la sensibilidad al agua y aumentar la capacidad de soporte del suelo, pudiendo incluso transformarle en un material relativamente rígido con un contenido adecuado de cemento.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La utilización habitual de los suelos estabilizados in situ con cemento es en la formación de explanadas, aunque puede emplearse para mejorar las características de cualquier suelo, y especialmente su capacidad de soporte.

Se pueden definir tres tipos de suelos estabilizados in situ con cemento:

- S-EST 1: CBR de la mezcla a 7 días ≥ 6 ;
contenido de cemento $\geq 2,5\%$, (podrá reducirse hasta el 2,0% si se dosifica en lechada);
- S-EST 2: CBR de la mezcla a 7 días ≥ 12 ;
contenido de cemento $\geq 3\%$;
- S-EST 3: resistencia a compresión a 7 días $\geq 1,5$ MPa;
contenido de cemento $\geq 3\%$;

Los dos primeros tipos de suelo estabilizado in situ con cemento pueden considerarse como materiales granulares, y son propiamente suelos mejorados con cemento. Por el contrario, el tercero es un material bastante rígido, dotado de una apreciable resistencia mecánica.

La estabilización con cemento permite utilizar suelos adecuados o incluso tolerables en la capa superior de las empleadas en la formación de explanadas E2 o E3, en las que, en caso de no recurrirse a esta técnica, habría que disponer suelos seleccionados. Permite además obtener explanadas E1 con suelos inadecuados o marginales. Al aumentar la categoría de explanada, es posible, según el tipo de firme utilizado, disminuir el espesor de una o varias de las capas e incluso prescindir de la subbase en algunos casos.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Aunque en principio prácticamente todos los suelos pueden estabilizarse con cemento, excepto los que tengan un contenido elevado de materia orgánica, sulfatos, o elementos inhibidores del fraguado del cemento, los más adecuados son los de tipo granular, con finos de plasticidad reducida, con los cuales es posible obtener, con una dotación moderada de cemento, las características exigidas. Los suelos a emplear no deberán contener elementos de tamaño superior a 80 mm. Su cernido en masa por el tamiz de 2 mm deberá ser superior al 20% y por el tamiz de 0,063 mm será inferior al 50%. Este último límite se bajará al 35% en el caso de los suelos estabilizados in situ con cemento empleados en explanadas E3. El índice de

plasticidad deberá ser inferior a 20, siendo recomendable que sea inferior a 15 para una mayor actividad del cemento (salvo excepciones, como la presencia de carbonatos), mientras que en explanadas E2 o E3 el límite líquido deberá ser además inferior a 40 (UNE 103104). Por otra parte, deberán ser suelos exentos de materia vegetal; su contenido en masa de materia orgánica no será superior al 2% para los suelos estabilizados in situ con cemento empleados en explanadas E1, ni al 1% en el resto de los casos (según UNE 103204) y su contenido en masa en sulfatos, expresado en SO_3 , no excederá del 1% (UNE 103201).

Los cementos a utilizar serán de clase resistente media o baja ($\leq 42,5$ MPa a 7 días), siendo más recomendable el empleo de cementos de alto contenido en adiciones. Si el contenido de sulfatos del suelo a estabilizar, expresado en SO_3 , fuera superior al 0,5%, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizarán mediante ensayos de laboratorio, con muestras claramente representativas de las características del suelo. En el caso de que éstas se modifiquen a lo largo de la traza, se dividirá en tramos homogéneos obteniendo una fórmula de trabajo para cada caso. Se partirá de la dotación mínima de conglomerante especificada para el caso a estudiar y se definirán con la misma la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Se determinará con la humedad óptima y el contenido mínimo de cemento el índice CBR a los 7 días o, en su caso, la resistencia a compresión a la misma edad. Si los valores obtenidos no son inferiores a los mínimos especificados, se adoptará dicho contenido de cemento. En caso contrario, deberá aumentarse hasta obtener una dotación que permita cumplir con las prescripciones.

La fórmula de trabajo deberá señalar:

- la dosificación y tipo de cemento;
- en su caso, la humedad del suelo en el momento de su mezcla con el cemento;
- la humedad de compactación;
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 97% de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado.
- el tiempo máximo de trabajabilidad de la mezcla, en el que deben quedar terminadas todas las operaciones de ejecución, que no debe ser inferior a 2 horas en ensanches o en el caso de estabilizar toda la sección a anchura completa, ni 3 horas en el caso de estabilizar por franjas.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El suelo estabilizado in situ con cemento es de las posibilidades existentes para la estabilización de suelos en la formación de explanadas, la solución más utilizada. Su campo de aplicación más adecuado es el de las vías que dispongan en la misma traza o en las proximidades de suelos con pocos finos, aptos para ser estabilizados con dotaciones moderadas de cemento, pero sin reunir las características de suelos adecuados o seleccionados, según los casos.

Si los suelos existentes tienen un contenido importante de finos y/o mucha humedad, no hay que descartar la posibilidad de un tratamiento mixto cal-cemento. El tratamiento previo con cal reduce la elevada cohesión del suelo, que podría provocar dificultades en el reparto del cemento, y disminuye el contenido de agua. Por su parte, el tratamiento con cemento permite obtener rápidamente las características de resistencia mecánica exigidas al material.

A pesar de estas indicaciones, antes de decidir el tipo de estabilización a realizar, se debe estudiar en el laboratorio el empleo de cemento y/o cal en todos los casos, siempre que los resultados obtenidos en el suelo (plasticidad y granulometría) se encuentren próximos a los límites indicados.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El suelo a estabilizar se escarificará y disgregará previamente, bien en la misma traza si es el suelo existente en ella, bien en el punto de extracción si se trata de un material de aportación. El suelo deberá disgregarse hasta que no presente elementos ni terrones con tamaños superiores a 80 mm.

En caso de que sea necesario, podrá procederse a una humectación del suelo para facilitar su escarificación; pero no podrá distribuirse el cemento mientras queden concentraciones superficiales de humedad. Por el contrario, si el contenido de agua es ligeramente superior al óptimo obtenido en el ensayo Proctor modificado, el suelo una vez disgregado deberá dejarse secar. Con humedades más elevadas puede ser aconsejable, como ya se ha mencionado, un tratamiento previo con cal.

Si por tener el suelo una componente arcillosa importante se recurre a una estabilización mixta cal-cemento, el tratamiento con cal se realizará siguiendo las recomendaciones correspondientes a las estabilizaciones de suelos con cal, permitiéndose emplear dosificaciones de cal en este caso superiores tan solo al 1%. Una vez obtenida la mezcla del suelo con la cal y efectuada su compactación, se dejará transcurrir un plazo entre 24 y 48 horas antes de proceder a la extensión del cemento.

El cemento se distribuirá uniformemente con la dosificación establecida, por medio de equipos mecánicos, a ser posible sincronizados con la velocidad de avance de su elemento tractor. Deberá evitarse en la medida de lo posible la distribución manual del cemento, siendo sólo factible en superficies muy reducidas (inferiores a 1.000 m²). Salvo en el caso de ensanches estrechos, categorías de tráfico pesado T4, o que la humedad natural del suelo sea superior a la necesaria, el cemento se deberá dosificar en forma de lechada. En dicho caso, en cada pasada se aprovechará para limpiar y comprobar el correcto estado de los difusores, realizándose dicha limpieza, al menos, al mediodía y al final de cada día.

Los equipos más tradicionales para la realización de los suelos estabilizados in situ con cemento son los mezcladores rotatorios de uno o varios ejes horizontales, bien arrastrados por un tractor agrícola o bien suspendidos en bastidores de vehículos concebidos expresamente para estabilizaciones (equipos tipo pulvimixer). Sin embargo, se dispone en la actualidad de equipos autopropulsados con potencia suficiente para garantizar una gran homogeneidad del tratamiento en toda su profundidad y en una sola pasada; estos equipos específicos de estabilización son los que deben utilizarse siempre, salvo en las obras de pequeña dimensión en las que la reducida superficie o anchura de trabajo limiten su empleo.

En caso de que para alcanzar la humedad fijada en la fórmula de trabajo sea necesario añadir agua, ésta se incorporará conforme se realice la mezcla. El sistema más eficaz para ello es el empleo de las barras regadoras integradas en los mezcladores. Si no se dispone de un equipo de estas características puede recurrirse a un camión cisterna con barra regadora; sin embargo, el riego realizado de esta forma no es tan adecuado, ya que se forman regueros en las irregularidades del terreno y además el agua no penetra en éste de una manera uniforme. No se permitirá en ningún caso la extensión del agua con equipos que no controlen la dosificación aplicada y no realicen un reparto homogéneo.

Inmediatamente después de la distribución del cemento se deberá proceder a su mezclado con el suelo. Los elementos de mezclado adaptarán su velocidad para obtener la máxima eficacia y darán las suficientes pasadas hasta obtener una dispersión homogénea en el suelo del cemento aplicado, lo que se reconoce por la ausencia de terrones y por un color uniforme. La mezcla deberá hallarse suelta en todo su espesor. Deberá comprobarse que los medios de mezclado alcanzan la profundidad establecida para la estabilización. En caso contrario, ésta deberá realizarse en varias tongadas.

No se permitirán segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, debiéndose detener los trabajos hasta que se elimine la causa que provoque el defecto.

Una vez realizado el mezclado se procederá a la compactación del material hasta alcanzar la densidad especificada en la fórmula de trabajo. En este tipo de materiales existe una dependencia muy acusada entre la densidad obtenida y sus características de durabilidad y resistencia, por lo que deberá vigilarse que los equipos de compactación den el número de pasadas necesario hasta alcanzar los valores de densidad requeridos.

Al inicio de las obras se debe establecer en un tramo de prueba el plan de compactación, realizando diversas pasadas de rodillo (4 a 6 pasadas dobles) y midiendo con una sonda nuclear en varios puntos la densidad obtenida en cada pasada. Así se determinará el número de pasadas necesarias que tendrá que realizar cada rodillo para lograr la máxima compactación debiéndose mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo. Posteriormente, a lo largo de la obra se deberá corroborar el plan de compactación establecido.

Antes de terminar la compactación, se puede realizar un perfilado mediante refino con motoniveladora de los últimos centímetros para mejorar la rasante. Para ello se retirará parte del material evitándose desplazamientos importantes para evitar segregaciones, y evitando aportaciones en capa de pequeño espesor. Posteriormente se finaliza la compactación.

El conjunto de operaciones de mezclado, compactación y perfilado de todas las bandas de trabajo de una misma sección transversal deberán realizarse en un plazo, contado a partir de la humectación del cemento, inferior al de trabajabilidad del material, que en caso de no determinarse, no podrá sobrepasar las 2 horas. Para su determinación se puede llevar a cabo el ensayo de plazo de trabajabilidad definido en el anejo A3.

Una vez compactada la capa de suelo estabilizado in situ con cemento, deberá extenderse sobre ella un riego de curado. Si se realiza con agua, se deberá mantener la superficie húmeda con riegos constantes al menos durante 7 días o hasta que se extienda la siguiente capa. En caso de

tener que circular el tráfico se esperará hasta que no se produzcan deterioros superficiales y se protegerá el riego de curado con una capa de arena o gravilla, con una dotación de 4 a 6 l/m², que posteriormente se barrerá enérgicamente.

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad del suelo estabilizado in situ con cemento debe atender principalmente a los siguientes puntos:

- comprobación de la dosificación y de la homogeneidad de la dotación de cemento tras el paso de los equipos de distribución, mediante pesada al menos una vez a la semana sobre lonas o bandejas colocadas previamente a la extensión del conglomerante, y visualmente varias veces al día; además deberá controlarse el consumo diario de cemento, obteniéndose la dotación media al dividir por los m² realizados.
- control de la densidad y humedad de referencia realizándose un ensayo Proctor modificado al inicio de la obra y otro cada 5.000 m³ de material o semana de trabajo.
- control de la densidad obtenida, que debe ser superior al 97% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, para lo que se debe disponer de equipos de control rápido en obra, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y corroborarse varias veces a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado;
- comprobación de la profundidad de tratamiento alcanzada, mediante la realización de calicatas en la banda estabilizada, tomando como referencia la banda sin estabilizar, que además servirán para comprobar la homogeneidad, humedad y color del material, y posteriormente mediante la extracción de testigos;
- medida de la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 20 mm;
- determinación del índice CBR a los 7 días o, en su caso, de la resistencia a compresión a la misma edad obtenidas sobre probetas compactadas según la NLT-310 con la densidad exigida del 97% o la obtenida en obra si resultara inferior, que deberán superar los mínimos establecidos para cada tipo de suelo estabilizado in situ con cemento.

1. INTRODUCCIÓN

El suelocemento es el material para capa de firme resultante de la mezcla homogénea y uniforme de un suelo, cemento, agua y eventualmente aditivos, como un retardador de fraguado, realizada en central o en ocasiones in situ y convenientemente compactada, al que se le exigen una determinada resistencia mecánica y unas ciertas características de acabado.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las reacciones de fraguado y el posterior endurecimiento del cemento convierten un material suelto, como es el suelo, en otro rígido, mucho más resistente. La estructura final depende, entre otros factores, del tipo de suelo. En los de grano fino, como los limosos y los arcillosos, se crea una matriz de tipo celular o de panal, cuyos huecos están ocupados por grupos de partículas de suelo poco cementadas entre sí. En cambio, en los suelos de tipo granular, las estructuras que se forman son más parecidas a las de los hormigones. Sin embargo, a diferencia de estos últimos, la pasta de cemento no rellena completamente los huecos entre los granos de suelo, sino que únicamente se forman zonas cementadas en los puntos de contacto entre ellos.

Cuanto mejor graduada es la granulometría del suelo, más reducidos son los huecos entre sus partículas y más numerosos son los puntos de contacto, con lo que la cementación es más eficaz. Por ello, el suelocemento suele tener una resistencia y un módulo de elasticidad más reducidos que los de otros materiales como la gravacemento, en los que se utilizan áridos seleccionados con granulometría continua y un contenido muy limitado de finos.

La utilización típica del suelocemento es como subbase, e incluso como base en vías con tráficos pesados de intensidades medias o reducidas. Su apreciable rigidez se traduce en una notable disminución de las tensiones que se producen tanto en la explanada como en la capa superior, sobre todo si ésta se encuentra adherida a la capa de suelocemento. Por otra parte, bajo hormigones compactados o bajo bases de gravacemento debe disponerse una subbase de suelocemento, a fin de garantizar una compactación adecuada, un apoyo uniforme y estable y una disminución de las tensiones originadas por el tráfico pesado.

En general, por su reducida resistencia a la abrasión y su escasa capacidad de soporte inicial no permite el paso inmediato de vehículos directamente sobre la capa.

Al igual que ocurre con el resto de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, el comportamiento del suelocemento es muy sensible a un infradimensionamiento de la capa, tanto más cuanto mayor sea su rigidez. Por el contrario, un ligero sobreespesor proporciona una gran seguridad frente a ocasionales sobrecargas e incrementa notablemente la vida del suelocemento. Bajo mezclas bituminosas suelen disponerse espesores de suelocemento comprendidos entre 20 y 35 cm.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Aunque en principio prácticamente todos los suelos pueden mezclarse con cemento, excepto los que tengan un contenido apreciable de materia orgánica o de sulfatos, los más adecuados son los de tipo granular, con finos de plasticidad reducida, con los cuales es posible obtener con una dotación moderada de cemento (normalmente entre el 3 y el 5% en masa) las características de resistencia exigidas.

Los suelos no deberán contener elementos de tamaño superior a 50 mm, siendo recomendable que no excedan de 40 mm y que posean cierta continuidad granulométrica. Su cernido por el tamiz de 2 mm deberá ser igual o superior al 20% y por el tamiz de 0,063 mm será como máximo del 35%. El índice de plasticidad (UNE 103104) deberá ser inferior a 12 y el límite líquido (UNE 103103) inferior a 30, aunque deben evitarse suelos con valores próximos a esos máximos, por los problemas de ejecución que provocan y su mayor sensibilidad al agua. Por otra parte, deberán ser suelos exentos de materia vegetal; su contenido de materia orgánica (UNE 103204) no será superior al 1% en masa y su contenido en sulfatos (UNE-EN 1744-1), expresado en SO_3 , no excederá del 1% en masa.

La dotación de cemento será como mínimo del 3%. Se recomienda el empleo de cementos de alto contenido en adiciones (tipos III, IV, V o ESP VI-1) y clase resistente media-baja (32,5 o 42,5 MPa a 7 días). Si el contenido de sulfatos del suelo, expresado en SO_3 , fuera superior al 0,5%, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos.

La resistencia a compresión (NLT-305) del suelocemento no deberá ser inferior a 2,5 MPa a 7 días obtenida sobre probetas compactadas (NLT-108 o NLT-310) al 98% de la densidad máxima Proctor modificado. Si se emplean cementos de alto contenido en adiciones (tipos III, IV-B, V o ESP VI-1) y clase resistente media-baja, a fin de no ir a contenidos de conglomerante excesivos, la resistencia que debe alcanzarse a 7 días se reducirá a 2,1 MPa.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizará mediante ensayos de laboratorio. Se probarán como mínimo tres dotaciones distintas de conglomerante y se determinarán, con al menos una de ellas (mejor en todas), la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Por cada una de las dotaciones se confeccionarán probetas con la humedad óptima y el 98% de la densidad máxima, a fin de obtener la resistencia a compresión a 7 días. Por interpolación de los resultados podrá determinarse el contenido de conglomerante que permita alcanzar en obra el valor prescrito. Para ello, en laboratorio debe irse a la obtención de resistencias ligeramente superiores a las especificadas. Normalmente, un exceso entre el 10 y el 15% suele ser suficiente para compensar la disminución de resistencias en obra. Posteriormente, se comprobarán para la dotación elegida la humedad óptima y la densidad máxima del ensayo Proctor modificado y se estudiará la sensibilidad de la mezcla a la humedad confeccionando probetas con distintos contenidos de humedad (por ejemplo, la óptima aumentada y disminuida en un punto), las cuales se ensayarán a la edad especificada.

La fórmula de trabajo deberá señalar:

- la dosificación y el tipo de cemento, y en su caso la de aditivo (retardador de fraguado);
- el contenido de agua;
- en su caso, la humedad del suelo en el momento de su mezcla con el cemento y la humedad de compactación;
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 98 % de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado.

- el plazo de trabajabilidad de la mezcla, en el cual deben quedar terminadas todas las operaciones de ejecución, y que deberá ser superior a 2 horas en ensanches, y a 3 horas en caso de extendido a anchura completa o por franjas.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El suelo cemento es una de las posibilidades para la construcción de subbases en todo tipo de vías, así como de bases en carreteras con intensidades de tráfico pesado medias o bajas. Su ventaja fundamental reside en que la mezcla con cemento permite el aprovechamiento de una amplia gama de suelos, así como de materiales tales como residuos de canteras o escorias, lo que supone poder utilizar los materiales existentes en la propia traza o en préstamos próximos.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La mezcla del suelo con el cemento debe realizarse en principio en central, aunque en ocasiones es aceptable la mezcla in situ. Si bien con esta última opción se obtienen mayores rendimientos y resulta más económica, requiere un mayor control para asegurar los espesores y la calidad del material exigidos, especialmente la homogeneidad (del material y de sus resistencias) y la regularidad superficial.

Dada la excesiva sensibilidad del suelo cemento, y por tanto del conjunto del firme, a una reducción del espesor, si el suelo cemento se fabrica in situ, los espesores mínimos indicados en las tablas 7.1 a 7.6 (secciones de firme de nueva construcción) se incrementarán en 3 cm. Deberá tenerse en cuenta que dichos espesores son los mínimos una vez compactada la capa.

Este incremento de espesor de 3 cm no se debe traducir en un sobrecoste de la obra, dada la mayor economía de la técnica de fabricación in situ. Por tanto, para que no haya lugar a confusiones, en los cuadros de precios se debe indicar expresamente si se trata de un suelo cemento fabricado en central o de un suelo cemento fabricado in situ.

Si por circunstancias de la obra no previstas en el proyecto, resulta necesario cambiar un suelo cemento en central por un suelo cemento in situ, en la sección que se construya deberá incrementarse el espesor en 3 cm según se ha indicado, pero sin que el mayor volumen de este material suponga un mayor coste total de la capa.

Por otro lado, si debido al elevado espesor de la capa no resulta posible obtener la densidad exigida del 98% (medida con el vástago del densímetro introducido hasta el fondo de la capa), la extensión o fabricación in situ del suelo cemento se realizará en dos capas perfectamente adheridas. Si por las condiciones de la obra resultase muy dificultosa la ejecución en doble capa dentro del plazo de trabajabilidad, se permitirá la realización de una capa única siempre que la densidad obtenida, midiendo en el fondo de la capa, no resulte inferior al 96% de la densidad máxima Proctor modificado y que las probetas fabricadas con esta densidad del 96% cumplan las exigencias de resistencia establecidas.

5.1 Suelo cemento fabricado en central

Si el suelo cemento se fabrica en central, se debe tener acopiada una parte importante del suelo (el 100% en obras de menos de 70.000 m² o más del 30% en otro caso), que se

homogeneizará en la medida de lo posible. La amasadora puede ser de tipo continuo, con los ejes provistos de paletas que ejercen una acción de disgregación y mezclado, o discontinuo, como las hormigoneras convencionales. Mientras que en el primero de los casos se logran mayores rendimientos, en las centrales discontinuas se logra una mayor precisión en la dosificación y una mayor homogeneidad del material, lo que se traduce en una mayor calidad. En cualquiera de los casos, la dosificación del cemento se debe realizar en masa, y nunca por volumen, siendo recomendable dosificar también en masa el resto de los componentes.

En el caso de empleo de centrales de tipo continuo, con el fin de asegurar una homogeneidad adecuada del material, antes de iniciarse la fabricación se comprobará que disponen al menos de los sistemas siguientes:

- dosificación en masa del cemento, y deseable del suelo, como ya se ha expuesto;
- silos de cemento dotados de sistemas que impidan la formación de bóvedas y con los filtros apropiados;
- equipos de dosificación del agua (y del aditivo en su caso) de alta precisión;
- palpadores de seguridad que detengan automáticamente la instalación en caso de faltar alguno de los componentes;
- amasadora con el fondo y las paletas en correcto estado, con sistemas regulables que aseguren que el material es amasado durante el tiempo necesario;
- automatización de todo el proceso de fabricación con control y registro de los parámetros principales;

La extensión se realiza con extendedoras que deberán estar dotadas de equipos de elevada precompactación y trabajar a velocidad constante, disminuyendo al mínimo imprescindible cualquier interrupción para asegurar una buena regularidad superficial. En el caso de ensanches o superficies inferiores a 10.000 m² la extensión podría realizarse con motoniveladora, salvo si se detectaran segregaciones o no se consiguiera la regularidad superficial requerida.

El proceso de compactación debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material, es decir, antes de que se inicien los enlaces debidos al fraguado del conglomerante. La temperatura ambiente tiene una gran influencia en dicho plazo, que puede determinarse en laboratorio midiendo el tiempo pasado el cual la densidad seca que se alcanza en una probeta con la humedad óptima, sometida al proceso de compactación normalizado, desciende dos puntos por debajo de la máxima. Los ensayos se realizarán a la temperatura a la que se prevea que se va a desarrollar la obra (véase la descripción del ensayo en el anejo 3). En caso de no realizarse el ensayo, el material debe quedar correctamente compactado y terminado antes de que transcurran 2 horas desde su fabricación.

Para la compactación se empleará al menos un rodillo metálico vibratorio con una masa superior a 15 t, y una carga estática sobre la generatriz mayor de 300 N/cm. Para cerrar mejor la parte superior se debería emplear además un rodillo de neumáticos.

5.2 Suelocemento fabricado in situ

En caso de realizar el suelocemento in situ, se exigirá que el suelo sea homogéneo en todas sus características, realizándose la disgregación, premezclado o incluso sustitución del mismo en caso necesario. Esta homogeneidad se comprobará obteniendo las características prescritas en el apartado 3 (granulometría, plasticidad, materia orgánica y sulfatos) sobre un total de 1 muestra cada 2.000 m². Salvo autorización expresa del Director de las Obras no se admitirán variaciones de los resultados obtenidos superiores al 20% del valor medio obtenido.

Para la realización del suelocemento in situ se emplearán equipos específicos (del tipo de los empleados para el reciclado) que efectúen todas las operaciones en continuo, sin intervención manual (fresado, dosificación, distribución del cemento, mezclado y extensión), y que deberán encontrarse en correcto estado de uso (sin ningún tipo de pérdidas). La dosificación del cemento se realizará siempre en forma de lechada, aportando la humedad necesaria mediante equipos que dosifiquen en masa, cuyos inyectores se mantendrán siempre limpios.

El mezclado se realizará durante todo el tiempo que resulte necesario para lograr la homogeneidad exigida, por lo que la velocidad de avance de los equipos se mantendrá por debajo de los 10 m/min. Siempre que se observe una heterogeneidad o defecto repetido en el mezclado, como cambios de granulometría, defectos de dosificación, etc, se detendrán los trabajos hasta eliminar la causa (desgaste de picas, suciedad de los inyectores, etc).

Dado que en este caso la anchura de trabajo de los equipos obliga a trabajar por bandas, se cuidará muy especialmente los solapes, que serán de unos 20 cm, para que no quede suelo sin tratar, evitándose sobredosificaciones y controlando que no queden con diferente humedad que el resto.

Para poder lograr una regularidad superficial aceptable en la ejecución in situ, antes de terminar la compactación se debe realizar un refino con motoniveladora, que en el caso de obras de más de 20.000 m² (salvo ensanches) deberá estar dotada de equipos auxiliares de nivelación, (por ejemplo 3D), que faciliten las operaciones de obtención de la rasante, sin depender de la habilidad del maquinista. Con el refino se deberá retirar parte del material, sin realizar aportaciones en capa de pequeño espesor, evitándose desplazamientos importantes del material para evitar segregaciones. Posteriormente, se finalizará la compactación.

Todo el proceso debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material. En caso de no realizarse el ensayo descrito en el anejo 3, este plazo no superará las 2 horas, por lo que se limitará la longitud de las bandas de trabajo a 100 m, para que no lleguen a transcurrir estas 2 horas desde que se inició la mezcla de la primera banda hasta que se termina la compactación de la última banda de la sección. Esta longitud podrá ampliarse si se comprueba que la ejecución se realiza correctamente y la temperatura ambiente no supera los 30°C.

Las paradas se realizarán en secciones completas, evitándose la aparición de juntas frías entre bandas.

Para la compactación se debe disponer un rodillo de al menos 17 t de masa, que realice una o dos pasadas dobles vibrando detrás del equipo mezclador y un segundo rodillo de masa superior a 15 t detrás de la motoniveladora que realice el refino. Para que la superficie quede correctamente cerrada, se debería disponer además un rodillo de neumáticos.

5.3 Aspectos constructivos generales

No se permitirá el extendido o fabricación in situ cuando aparezcan segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, deteniéndose los trabajos hasta eliminar la causa que provoque el defecto.

Al inicio de las obras se debe establecer en un tramo de prueba el plan de compactación, realizando diversas pasadas de rodillo (4 a 6 pasadas dobles) y midiendo con una sonda nuclear en varios puntos la densidad obtenida en cada pasada. Así se determinará el número de pasadas necesarias que tendrá que realizar cada rodillo para lograr la máxima compactación debiéndose mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo. Posteriormente, a lo largo de la obra se deberá corroborar el plan de compactación establecido.

Si tras haber modificado en su caso todos los parámetros de compactación (frecuencia y amplitud, número de pasadas, etc) e incluso cambiado los equipos por otros supuestamente más adecuados, resultase imposible alcanzar el 98% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado con los equipos disponibles en obra, las probetas para el control de resistencias se compactarán en el laboratorio a la densidad obtenida realmente en la obra, a fin de que resulten representativas. Si la resistencia resultase inferior a la prescrita se deberá dosificar algo más de cemento para compensar la falta de densidad del material.

En el caso de colocación del suelocemento en dos capas, la superior deberá terminarse siempre dentro del plazo de trabajabilidad de la inferior, asegurando en todo caso la correcta adherencia entre ambas para que su comportamiento estructural sea monolítico.

El resto de las operaciones de puesta en obra son muy similares a las de una gravacemento o un hormigón compactado. Al igual que en estos dos materiales, conviene insistir en varios aspectos esenciales para un correcto comportamiento del material:

- la importancia de conseguir una adecuada compactación, pues la resistencia mecánica del suelocemento está muy ligada a su densidad. Se debe pues definir el proceso óptimo de compactación en el tramo de prueba y corroborarlo cada cierto tiempo en la obra.
- el contenido de agua debe presentar unas desviaciones reducidas con respecto al definido como óptimo en la fórmula de trabajo, por su influencia en la posibilidad de conseguir las densidades requeridas y por tanto las resistencias necesarias; no se podrá realizar la ejecución in situ si la humedad del suelo supera la óptima menos dos puntos porcentuales (imprescindibles para dosificar el cemento en lechada).

Durante la compactación y hasta el riego de curado debe evitarse la desecación de la capa, especialmente si la puesta en obra se realiza por bandas o semianchos, en tiempo cálido o con viento. Para ello se regará la superficie con un equipo de pulverización de agua, que deberá crear una neblina y evitar la formación de charcos o de regueros.

El riego de curado debe extenderse tan pronto como sea posible (como mínimo dos veces al día) y protegerse convenientemente de la acción del tráfico, si se va a permitir la circulación, mediante la extensión de una capa de árido 2-4 mm con una dotación de 4 a 6 l/m², seguida de su compactación y un posterior barrido. No obstante, el tráfico pesado no circulará sobre la capa así protegida hasta

transcurridos 7 días desde su terminación, ni aun el tráfico ligero si se observasen desprendimientos superficiales.

Antes de extender la capa superior se debe realizar un enérgico barrido, retirando todos los áridos sueltos que hayan quedado en superficie y la emulsión de curado que no esté perfectamente adherida.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los suelos (granulometría y plasticidad cada día, y materia orgánica y sulfatos cada semana de trabajo), se controlarán los siguientes puntos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la amasadora o cámara de mezclado, realizándose además un ensayo Proctor modificado al inicio de la obra y otro cada 5.000 m³ de material o semana de trabajo, a fin de corroborar la densidad máxima y la humedad óptima de la fórmula de trabajo.
- la dosificación de cemento y la homogeneidad de su dotación (comprobación del correcto funcionamiento y reparto de los inyectores, en el caso de realización in situ, visualmente 2 veces al día y mediante medición por bandeja al menos una vez a la semana). Además deberá controlarse el consumo diario de cemento, obteniéndose la dotación media al dividir por los m³ realizados.
- la densidad obtenida (al menos un punto cada 500 m²), que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, y la humedad de compactación, por lo que se debe disponer de equipos de control rápidos, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y corroborarse varias veces a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado.
- el espesor de la capa, que en el caso de fabricación in situ se comprobará mediante la apertura de calcatas antes de finalizar la compactación (al menos una cada 4.000 m²), que además servirán para comprobar la homogeneidad de la granulometría, la humedad y el color del suelo. Independientemente del sistema de fabricación del suelocemento posteriormente se comprobarán los espesores y la homogeneidad mediante la extracción de testigos.
- la resistencia a compresión exigida a 7 días, sobre un total de dos series de 3 probetas confeccionadas cada día (mañana y tarde), con la densidad media obtenida en obra; algunas probetas podrán romperse a la edad de 90 días a título informativo.
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm en el caso de tratarse de una base, ni de 20 mm en una subbase. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades cuando se pase la regla de 3 m superiores a 8 mm en el caso de una base, ni a 12 mm en el caso de una subbase. Estos valores podrán aumentarse respectivamente a 20 y 30 mm (12 y 22 mm comprobados con la regla de 3 m), en tramos de velocidad máxima no superior a 60 km/h.

1. INTRODUCCIÓN

La gravacemento es el material resultante de la mezcla homogénea y uniforme de áridos, cemento, agua y eventualmente aditivos, realizada en central con un contenido de cemento reducido (comprendido normalmente entre el 3 y 5% de la masa seca de los áridos) y un contenido de humedad que permite el paso de rodillos sobre ella. A dicha mezcla, convenientemente compactada, se le exige una determinada resistencia mecánica que la hacen apta para ser utilizada en capas de base.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La limpieza y la calidad exigidas a los áridos utilizados en la gravacemento, así como su granulometría bien graduada, dan lugar a que sus resistencias sean normalmente bastante superiores a las de un suelocemento, aun siendo sus contenidos de cemento más reducidos. En consecuencia, la gravacemento es un material de una gran rigidez (el módulo de elasticidad supera fácilmente los 20.000 MPa), con una significativa resistencia a flexotracción y una apreciable capacidad de reparto de cargas. Dispuestas como capa de base en los firmes semirrígidos, estos materiales desempeñan un papel fundamentalmente estructural, absorbiendo la mayor parte de las tensiones procedentes del tráfico, y disminuyendo notablemente las tensiones transmitidas a las capas inferiores y a la explanada.

Para que las tracciones en la gravacemento no sean demasiado elevadas, es conveniente que bajo un pavimento bituminoso tenga un espesor no inferior a 18-20 cm y que la subbase posea también una cierta rigidez, por lo que normalmente esta última se construye de suelocemento. Con ello se facilita además el proceso de compactación y se consigue una mayor uniformidad tanto en las condiciones de apoyo como en los espesores de la gravacemento.

Al igual que ocurre con el resto de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, el comportamiento de la gravacemento es muy sensible a un infradimensionamiento de su espesor. Por el contrario, un ligero sobreespesor proporciona una gran seguridad frente a eventuales sobrecargas e incrementa notablemente la vida de la gravacemento.

Para permitir el paso inmediato del tráfico sobre la gravacemento se debe conseguir con los áridos una estructura granular que la dote de una capacidad de soporte inicial suficiente y una cierta resistencia a la abrasión: el CBR inmediato debe ser superior a 65.

Por otro lado, hay que evitar la reflexión de las fisuras de retracción de la gravacemento a través del pavimento bituminoso, puesto que con tráfico pesado las fisuras reflejadas suelen degradarse, con pérdida de material y entrada de agua. El plazo de aparición de las fisuras depende de la separación entre ellas, de la magnitud de los gradientes de temperatura en la gravacemento y del espesor de las mezclas bituminosas y de la propia capa de base.

Se han desarrollado varios sistemas de prefisuración para provocar la formación de las fisuras a distancias próximas (entre 2 y 4 m), solución que se ha mostrado muy eficaz para reducir sus movimientos y en consecuencia su reflexión en las capas superiores. La interposición de capas o de membranas (arenabetún, geotextiles impregnados con ligantes asfálticos) con características que les permiten absorber las tensiones concentradas sobre la fisura, es otra medida para evitar su reflexión, la cual puede por otra parte combinarse con la prefisuración.

Bajo los pavimentos de hormigón no se requiere que la gravacemento tenga unas determinadas características estructurales, dado que la losa de hormigón absorbe prácticamente todas las tensiones originadas por las cargas del tráfico, sino que constituya una buena plataforma de trabajo y un apoyo estable a largo plazo. Al contrario que en los firmes semirrígidos, no es preciso que la subbase sea un suelocemento; la gravacemento puede apoyarse sobre una zahorra e incluso, en ocasiones, sobre la explanada. Además, basta que su espesor sea el mínimo constructivo (15 cm). En este caso se precisa que la gravacemento no sea erosionable en el contacto con la losa, para evitar el escalonamiento a largo plazo de las juntas. Para garantizar la no erosionabilidad, la gravacemento debe tener contenidos de conglomerante no inferiores al 5 % sobre la masa seca de los áridos.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

La tabla 6.9.1 recoge las granulometrías recomendadas y la 6.9.2 las características que se exigen a los áridos. De los dos husos definidos en la tabla 6.9.1, el huso GC25 deberá reservarse para la construcción de arcenes, si éstos se construyen separadamente de la calzada.

Por otra parte, los áridos estarán exentos de materia vegetal, terrones de arcilla de tamaño superior a 5 mm, margas u otras sustancias extrañas. En lo que se refiere a sus características de inalterabilidad, la pérdida media después de cinco ciclos bajo la acción de sulfato sódico o magnésico será inferior al 10% o al 15% en masa, respectivamente. Tampoco deberán presentar reactividad potencial con los álcalis del cemento (UNE 146507-1). La proporción en masa de terrones de arcilla de tamaño inferior a 5 mm no excederá del 0,5%. Su contenido ponderal de materia orgánica (UNE 103204), no será superior al 0,05% y su contenido ponderal en sulfatos (UNE-EN 1744-1), expresado en SO_3 , no excederá del 0,4%. Dicho valor podrá elevarse hasta el 0,8% si se utilizan cementos resistentes a la acción de los sulfatos y se aíslan adecuadamente las obras de fábrica de las capas del firme.

Los áridos combinados para gravacemento empleada en calzadas serán no plásticos; en arcenes el límite líquido (UNE 103103) será inferior a 25 y su índice de plasticidad (UNE 103104) inferior a 6. El máximo valor de la absorción de agua en los áridos en calzada será del 2%; en capas de arcenes será del 3%.

Los cementos a utilizar serán, en general, de clase resistente media o baja. Se recomienda el empleo de cementos de alto contenido de adiciones (tipo III, IV, V o ESP VI-1) y clase resistente media-baja ($\leq 42,5$ MPa a 7 días). La dotación de cemento será como mínimo del 3,5% bajo capas bituminosas, valor que se elevará hasta el 5% bajo pavimentos de hormigón en masa.

El empleo de retardadores de fraguado será obligatorio cuando la temperatura ambiente de extensión de la mezcla supere los 30°C.

La resistencia media a compresión (NLT-305) de la gravacemento a disponer bajo capas bituminosas no deberá ser inferior a 4,5 MPa a 7 días. Este valor se obtendrá como media aritmética de los resultados obtenidos con 3 probetas al menos, compactadas según norma NLT-310 al 98% de la densidad máxima Proctor modificado, obtenida según UNE 103501. En caso de emplearse cementos con alto contenido de adiciones (tipos III, IV, V o ESP VI-1) este valor de resistencia se disminuirá en un 15%.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizarán mediante ensayos de laboratorio. Se probarán como mínimo tres dotaciones distintas de conglomerante y se determinarán con al menos una de ellas (mejor en todas) la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Por cada una de las dotaciones se confeccionarán probetas con la humedad óptima a fin de obtener la resistencia a compresión a 7 días. Por interpolación de los resultados podrá determinarse el contenido de conglomerante que permita alcanzar en obra el valor prescrito. Para ello, en laboratorio debe irse a la obtención de resistencias ligeramente superiores a las especificadas. Normalmente, un exceso entre el 10 y el 15% suele ser suficiente para compensar la disminución de resistencias en obra. Posteriormente se comprobará, para la dotación elegida, los parámetros de humedad óptima y densidad máxima del ensayo Proctor modificado, y se estudiará la sensibilidad de la mezcla a la humedad confeccionando probetas con distintos contenidos de humedad (por ejemplo, la óptima aumentada y disminuida en un punto) que se ensayarán a la edad especificada.

La fórmula de trabajo deberá señalar:

- la granulometría de los áridos combinados;
- en su caso, la proporción de cada fracción de árido en la alimentación;
- la dosificación y el tipo de cemento y, en su caso, la de aditivos;
- el contenido de agua;
- en su caso, la humedad del árido en el momento de su mezcla con el cemento y la humedad de compactación;
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 98% de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado;
- el plazo de trabajabilidad de la mezcla, en el que deben quedar terminadas todas las operaciones de ejecución, y que deberá ser superior a 3 horas si la extensión se realiza en anchura completa o a 4 horas si se extiende por franjas.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

La gravacemento es una de las posibilidades para la construcción de bases en carreteras sometidas a tráfico pesado de intensidades medias y altas. Su empleo resulta muy adecuado en las obras en las que es posible obtener a distancias razonables materiales que cumplan las especificaciones exigidas.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La mezcla de los áridos con el cemento sólo puede realizarse en central. Las amasadoras pueden ser de tipo continuo, con uno o dos ejes horizontales provistos de paletas que ejercen una acción de corte y mezclado, o bien hormigoneras convencionales discontinuas. Estas últimas tienen una mayor precisión en la dosificación y logran una mayor homogeneidad del material, lo que se traduce en una mejor calidad del producto, mientras que las amasadoras continuas

presentan la ventaja de sus mayores rendimientos, por lo que son las más empleadas. En cualquier caso, la dosificación del conglomerante y de los áridos deberá realizarse siempre en masa. Las centrales volumétricas solamente son admisibles para obras de pequeño tamaño, y aún en este caso el sistema de dosificación del cemento en masa.

En el caso de empleo de centrales de tipo continuo, con el fin de asegurar una homogeneidad adecuada del material, antes de iniciarse la fabricación se comprobará que disponen al menos de los sistemas siguientes:

- dosificación en masa del cemento, y deseable del suelo, como ya se ha expuesto.
- silos de cemento dotados de sistemas que impidan la formación de bóvedas y con los filtros apropiados.
- equipos de dosificación del agua (y del aditivo en su caso) de alta precisión.
- palpadores de seguridad que detengan automáticamente la instalación en caso de faltar alguno de los componentes.
- amasadora con el fondo y las paletas en correcto estado, con sistemas regulables que aseguren que el material es amasado durante el tiempo necesario.
- automatización de todo el proceso de fabricación con control y registro de los parámetros principales.

El transporte suele realizarse en camiones volquete. Como las variaciones en el contenido de humedad pueden ser críticas, los camiones deberán estar provistos de cobertores que cubran totalmente la caja, para su eventual empleo en condiciones climáticas desfavorables (calor, viento, ...).

En tiempo caluroso, la superficie de la capa sobre la que se vaya a colocar la gravacemento debe humectarse inmediatamente antes de realizar la extensión del material. En el caso de disponer la gravacemento sobre una capa de suelocemento, deberá procederse a un enérgico barrido de la emulsión de curado del suelocemento.

Para la extensión de la gravacemento puede utilizarse una gran variedad de equipos, tales como autogrades o bien extendedoras del mismo tipo de las empleadas con mezclas bituminosas. Se empleará extendedoras que proporcionen una elevada precompactación, con densidades a la salida del orden del 90% de la máxima Proctor modificado, e incluso superiores.

La producción de la central debe ser acorde con el rendimiento de los equipos de extensión, permitiendo un avance continuo de éstos. La altura y la forma de los camiones deberán ser tales que durante el vertido el único contacto entre estos y la extendidora se produzca a través de los rodillos previstos para ello en la extendidora.

Para la compactación deberá utilizarse un rodillo vibrante pesado, combinado con un compactador de neumáticos para cerrar la superficie. Se recomienda que el rodillo tenga una carga estática sobre la generatriz no inferior a 300 N/cm. En el compactador de neumáticos la carga por rueda debe ser igual o superior a 2,5 t y la presión de inflado no inferior a 0,8 MPa.

La compactación suele iniciarse con una pasada (entendiendo por pasada un ciclo completo atrás y adelante) del rodillo sin vibración, para asentar el material, seguida de varias pasadas con vibración (generalmente 4 o más), hasta la obtención de la densidad especificada, que como mínimo deberá ser igual al 98% de la máxima Proctor modificado. Los rodillos deberán detener la vibración durante el intervalo de inversión de la marcha. El proceso debe completarse con algunas pasadas del compactador de neumáticos para cerrar los posibles huecos o las pequeñas fisuras superficiales provocadas por el rodillo vibrante.

La observación del comportamiento del material fresco al paso del rodillo sin vibración da una idea de su aptitud para ser compactado. Una mezcla de consistencia adecuada asentará uniformemente. Por el contrario, si tiene un exceso de humedad, su superficie aparecerá brillante y pastosa, colchoneando bajo el rodillo, e incluso al ser pisada por una persona; mientras que si está demasiado seca, presentará un aspecto polvoriento, con coqueas y zonas despegadas. Por ello es necesario limitar estrictamente las variaciones en el contenido de agua.

Como se ha mencionado previamente, es importante mantener en todo momento la continuidad del proceso de ejecución. Los rodillos, sobre todo cuando se encuentren vibrando, no deben detenerse sobre el material fresco, pues esto puede originar defectos de regularidad superficial.

Habida cuenta de la gran dependencia entre la densidad del material y su resistencia mecánica, es esencial realizar la compactación correctamente. Para ello deberá controlarse de manera continua mediante equipos nucleares.

El proceso de compactación debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material, es decir, antes de que se inicien los enlaces con el fraguado del conglomerante. La temperatura ambiente tiene un gran influencia en dicho plazo, que puede determinarse en laboratorio midiendo el tiempo pasado el cual la densidad seca que se alcanza en una probeta con la humedad óptima, sometida al proceso de compactación normalizado, desciende dos puntos por debajo de la máxima o inicial (ver anejo 3). Los ensayos se realizarán a la temperatura a la que se prevea que se va a desarrollar la obra. Cuando ésta sea superior a 30°C, deberán utilizarse obligatoriamente retardadores de fraguado, como ya se ha mencionado, a fin de que los plazos de trabajabilidad no resulten demasiado reducidos. No obstante, su empleo es recomendable incluso a temperaturas más bajas.

Es importante conseguir que el espesor de la capa de gravacemento, una vez compactada, no sea en ningún punto inferior al previsto en proyecto. Los defectos de espesor no deben corregirse mediante aportaciones de material, puesto que entonces es muy probable que se produzcan despegues. La práctica más recomendable para evitar la aparición de puntos bajos consiste en extender el material con un ligero sobreespesor, de forma que su superficie, después de ser compactada hasta el 90-92 % de la densidad máxima Proctor modificado, quede unos centímetros por encima de la rasante teórica. El material sobrante se retira con motoniveladora o con autograde y la compactación se continúa hasta obtener la densidad especificada. El exceso de material puede ser utilizado en otras partes de la obra, siempre que no se haya rebasado su plazo de trabajabilidad.

Siempre que sea posible deberán emplearse equipos que permitan la extensión del material en toda la anchura. En caso de que sea necesario realizar una construcción en varias bandas,

deberá dejarse sin compactar una franja de unos 40-50 cm adyacente a la banda que se vaya a construir a continuación. Una vez extendido el material de esta última, se hará pasar el rodillo a caballo entre las dos bandas. La compactación de la segunda se completará antes de que haya transcurrido el plazo de trabajabilidad de la banda ejecutada en primer lugar, debiendo ponerse un especial cuidado en evitar desecaciones en la franja intermedia.

Para obtener una compactación adecuada de los bordes de la capa de gravacemento el método más aconsejable es disponer una contención lateral, que puede estar constituida por el material de los arcenes extendidos previamente. En caso de que ello no sea posible, deberá procurarse que dichos bordes queden a una distancia mínima de 0,5-1 m de las rodadas de los vehículos pesados, previendo un sobrecancho en caso necesario.

Durante la compactación de la gravacemento debe evitarse su desecación, especialmente cuando la puesta en obra se realiza por semianchos, como ya se ha mencionado. En tiempo cálido o con viento, puede ser necesario regar la superficie con un equipo de pulverización de agua, durante la compactación y hasta la extensión del riego de curado. Dicho equipo debe crear una neblina, para evitar la formación de charcos o de regueros.

Para evitar problemas de reflexión de juntas las capas de gravacemento se deben prefisurar creando a distancias reducidas (entre 2 y 4 m) una serie de juntas en el material extendido, antes del paso de los rodillos. Existen diferentes equipos para realizar la prefisuración.

En cuanto a las juntas de fin de día, es imprescindible dejar su borde lo más vertical posible, sobre todo en el caso de capas ejecutadas en épocas frías.

Conviene insistir en varios aspectos esenciales para un correcto comportamiento del material:

- la importancia de conseguir una adecuada compactación, pues la resistencia mecánica de la gravacemento en la obra está muy ligada a su densidad. Se debe definir el proceso de compactación en el tramo de prueba y corroborarlo cada cierto tiempo en la obra;
- el contenido de agua debe presentar unas desviaciones reducidas con respecto al definido en la fórmula de trabajo. Deben evitarse tanto los excesos de humedad como las desecaciones por su importancia sobre la capacidad para conseguir las densidades requeridas y por tanto las resistencias necesarias.

Durante la compactación y hasta el riego de curado debe evitarse la desecación de la capa, especialmente si la puesta en obra se realiza por bandas o semianchos, en tiempo cálido o con viento. Para ello se regará la superficie con un equipo de pulverización de agua, que deberá crear una neblina y evitar la formación de charcos o de regueros.

La reducida humedad de la gravacemento obliga a un curado eficaz. El método más aconsejable, es realizar el curado con una emulsión con una dotación mínima de betún residual de 300 g/m². en caso de preverse el paso del tráfico sobre la gravacemento, deberá aumentarse la dotación de betún residual hasta 500 gr/m² y proteger el riego mediante la extensión de una capa de árido 2-4 mm con una dotación de 4 a 6 l/m², seguida de su compactación y un posterior barrido.

Antes de extender la capa superior se debe realizar un enérgico barrido, retirando todos los áridos sueltos que hayan quedado en superficie y la emulsión de curado que no esté perfectamente adherida.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los materiales, se controlarán los siguientes puntos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la amasadora;
- la dosificación del cemento y la homogeneidad en su dotación;
- la densidad obtenida, que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, y la humedad de compactación, por lo que se debe disponer de equipos de control rápido de obra, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y corroborarse varias veces a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado;
- el espesor de la capa, durante la extensión y posteriormente mediante la extracción de testigos;
- la resistencia a compresión exigida a 7 días, de acuerdo con el tipo de cemento empleado;
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar a la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm en calzadas, ni en más de 20 mm en arcenes. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 8 mm cuando se pase la regla de 3 m. Estos valores podrán aumentarse respectivamente a 20 y 30 mm (12 mm comprobados con regla de 3 m), en tramos de velocidad máxima de circulación no superior a 60 km/h.

TABLA 6.9.1 Granulometrías para gravacemiento

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)	
	GC20	GC25
40	–	100
25	100	75-100
20	80-100	67-91
8	44-70	38-63
4	28-50	25-50
2	20-40	16-37
0,500	7-25	6-21
0,063	1-8	1-7

TABLA 6.9.2 Características de los áridos para gravacemiento

Características	Norma UNE	Calzadas T2	Arcenes T2
Elementos con 2 o más caras de fractura	EN 933-5	≥ 75	≥ 30
Índice de lajas	EN 933-3	≤ 30	≤ 35
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	< 35	< 40
Equivalente de arena	EN 933-8	≥ 40	≥ 30
Índice de plasticidad	103103-103104	NP	LL < 25 IP < 6

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina gravaemulsión a una mezcla homogénea de áridos, emulsión bituminosa, agua y, eventualmente, aditivos que, convenientemente extendida y compactada, se utiliza para la construcción de capas inferiores de los firmes de carreteras.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Por su constitución, la gravaemulsión resiste aunando el rozamiento interno de una zahorra artificial con la cohesión proporcionada por el ligante bituminoso. Además, la gravaemulsión, por su impermeabilidad, protege a las capas granulares inferiores.

Aunque como todos los materiales bituminosos su comportamiento depende de las temperaturas y de los tiempos de aplicación de las cargas, el relativamente bajo contenido de ligante y el hecho de constituir siempre una capa inferior hacen que las variaciones de su rigidez no sean muy grandes. A efectos del cálculo, suele admitirse que el módulo elástico de una gravaemulsión tiene un valor de 3.000 MPa aproximadamente.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

La gravaemulsión constituye realmente una familia de materiales que van desde los materiales granulares estabilizados in situ con emulsión hasta las mezclas bituminosas densas en frío. Por ello, conviene definir con precisión las características que se exigen en cada proyecto. La tabla 6.10.1 recoge las granulometrías recomendadas y la tabla 6.10.2 las características que deben tener los áridos.

El ligante bituminoso a emplear será una emulsión del tipo ECL-2 o EAL-2. Para el caso de una categoría de tráfico pesado T2 se empleará una emulsión fabricada a partir de betunes modificados del tipo ECL-2m.

Para capas de base en carreteras con categorías de tráfico pesado T2 y T3 se recomienda especificar el empleo del huso GE1. Para capas de base en vías con categoría de tráfico pesado T4 y para subbases con tráfico pesado T2 se debe pedir como mínimo el huso GE2. En ambos casos se ha de exigir que la fabricación se realice en central. El huso GE3, único para el que es admisible la fabricación in situ, sólo podrá utilizarse en arcenes y en subbases en carreteras con categorías de tráfico pesado T3 y T4.

Al material se le deberán exigir unas resistencias mínimas en el ensayo de inmersión/compresión según el tipo de capa y la categoría de tráfico pesado. Se recomienda especificar los valores mínimos recogidos en la tabla 6.10.3.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

La gravaemulsión es un material de excelente calidad para la constitución de capas de base para tráficos pesados de intensidad media o baja, y para capas de refuerzo sobre firmes flexibles. Su forma de funcionamiento y su rigidez, intermedia entre las mezclas abiertas en frío y las mezclas densas en caliente, permiten espesores que van desde unos 8 cm (mínimo absoluto de 6 cm) hasta los 15 cm, pudiendo sustituir con ventaja a las bases granulares

constituidas por capas de zahorra artificial con espesores de 20 a 30 cm. Asimismo pueden sustituir en las capas de base a las mezclas en caliente, especialmente si el material del soporte es muy flexible.

Las principales limitaciones para el empleo de la gravaemulsión son las derivadas de su coste y de la necesidad de emplear una capa de rodadura diferenciada. Según el tipo de tráfico y la sección estructural elegida la capa de rodadura podrá estar constituida por un tratamiento superficial o por una mezcla bituminosa (en frío o en caliente).

En el caso de una capa de rodadura con mezcla en caliente, se deberá tener muy en cuenta que la gravaemulsión no adquiere su rigidez definitiva hasta terminar el proceso de maduración, por lo que dicha rigidez puede ser insuficiente durante la primera época como apoyo de una capa de mezcla en caliente de pequeño espesor.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Excepto en los casos en que se admita la fabricación in situ, que se realizará mediante equipos del tipo de los empleados para el reciclado, la gravaemulsión se debe fabricar en central. Para ello se utilizarán centrales similares a las de suelocemento o a las de las mezclas en frío, compuestas por un mezclador continuo de doble eje de paletas, alimentado por tolvas de dosificación volumétrica en número no inferior al de tamaños de árido utilizados para componer la granulometría. La incorporación y la dosificación de la emulsión y del agua de preenvuelta, si fuera necesaria, se realizarán mediante una bomba de caudal variable. Deberá comprobarse sistemáticamente el ajuste de todos los componentes de la fórmula de trabajo.

Es habitual, salvo si la descarga del mezclador se realiza directamente sobre el camión, que se produzcan segregaciones en los acopios de gravaemulsión. Ello obliga a la realización cuidadosa de acopios intermedios de pequeña altura para obtener una buena homogeneidad.

La extensión de la gravaemulsión puede realizarse mediante extendedora autopropulsada, con los mismos criterios que las mezclas bituminosas. Se obtiene así una buena regularidad superficial, lo que permite colocar cualquier tipo de capa de rodadura sobre la gravaemulsión. Si la fabricación se realiza in situ, el reperfilado de la gravaemulsión, si es necesario, se realizará también con motoniveladora.

La compactación de una gravaemulsión es similar a la de una zahorra artificial y deben seguirse los mismos criterios.

La apertura al tráfico de la gravaemulsión puede realizarse de forma inmediata tras la compactación. Ahora bien, si la ejecución de la capa de rodadura va a demorarse por un tiempo prolongado, superior a los siete días, y el tráfico previsto fuera intenso o el trazado sinuoso o con rampas apreciables, se aplicará un tratamiento de protección de la gravaemulsión consistente en un riego de sellado realizado con una emulsión y una arena limpia o una gravilla fina. Las dotaciones típicas de este riego de sellado son de 0,4-0,6 kg/m² de ligante residual y 4-6 l/m² de una arena 0/5 o de un árido A5/2 o A6/3.

Si la capa de rodadura que se va a colocar sobre la base de gravaemulsión es una capa de mezcla bituminosa en caliente, deberá esperarse para su extensión a que la gravaemulsión haya

adquirido una parte importante de su rigidez final. La maduración de la gravaemulsión depende de las condiciones meteorológicas y debe contarse con un tiempo mínimo de uno a dos meses cuando dichas condiciones sean buenas (temperaturas altas y buena aireación).

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de una gravaemulsión se realiza con los mismos criterios que los de las mezclas bituminosas: control de granulometría, contenido de ligante, espesores y densidades, que deberán ser superiores al 98% de las obtenidas en el ensayo de inmersión/compresión. Se comprobará asimismo que el perfil obtenido no difiere del teórico en más de 15 mm. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 8 mm cuando se pase la regla de 3 m.



TABLA 6.10.1 Husos granulométricos de gravaemulsión

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)		
	GE1	GE2	GE3
40	-	-	100
25	100	100	75-100
20	80-100	80-100	-
12,5	66-82	58-86	-
8	54-69	43-73	-
4	38-54	26-55	26-62
2	26-40	17-40	18-50
0,500	13-22	9-23	9-33
0,250	8-16	7-18	-
0,125	5-10	4-14	-
0,063	2-5	2-10	2-13

TABLA 6.10.2 Características de áridos para gravaemulsión

Características	Norma UNE	Bases T2-T3	Bases T4 Subbases T2	Arcenes Subbases T3-T4
Elementos con 2 o más caras de fractura	EN 933-5	≤ 75	≥ 50	-
Índice de lajas	EN 933-3	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	≤ 30	≤ 35	≤ 40
Equivalente de arena	103109	> 45	> 35	> 25
Arena natural (% sobre masa total de árido)		≤ 10	≤ 15	≤ 25
Índice de plasticidad	103103 103104	NP	NP	LL < 25 IP < 10

TABLA 6.10.3 Valores exigidos en el ensayo de inmersión-compresión

Resistencia	Bases T2	Bases T3	Bases T4 Subbases T2	Arcenes Subbases T3-T4
En seco	> 12 kN	> 10 kN	> 7,5 kN	-
Tras inmersión	> 10 kN	> 7,5 kN	> 5 kN	> 5 kN
Conservada	> 75 %	> 60 %	> 50 %	-

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón compactado es el material resultante de la mezcla homogénea y uniforme, realizada en central, de áridos, cemento, agua y eventualmente aditivos, con un contenido de cemento similar al de los hormigones para pavimentos (del orden del 10 al 14%) y un contenido de humedad que permite el paso de rodillos. A esta mezcla, convenientemente compactada, se le exige una resistencia mecánica que la hacen equivalente, desde un punto de vista estructural, a un pavimento de hormigón.

El hormigón magro compactado es un material similar al anterior, pero cuyo contenido de cemento es intermedio entre el de una gravacemento y el de un hormigón compactado (del 5 al 10%). Sus cualidades resistentes lo hacen apto para ser utilizado en capas de base.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Con una compactación adecuada, el hormigón compactado desarrolla unas resistencias similares o incluso superiores a las de un hormigón vibrado para pavimentos, puesto que su relación agua/cemento es más reducida (variando normalmente entre 0,37 y 0,42), mientras que los contenidos de cemento (300-330 kg/m³) son similares en ambos casos.

En consecuencia, sobre un hormigón compactado recaerá la responsabilidad estructural del firme del que forme parte, mientras que las capas inferiores tendrán por misión asegurar un apoyo uniforme y estable para aquél, así como el facilitar su compactación. Los espesores de hormigón compactado utilizados habitualmente en carreteras están comprendidos entre 18 y 25 cm.

Al igual que ocurre con el resto de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, el comportamiento de los hormigones compactados es muy sensible a un infradimensionamiento de su espesor. Por el contrario, un ligero sobreespesor proporciona una gran seguridad frente a eventuales sobrecargas e incrementa notablemente la vida del hormigón compactado.

En lo que se refiere a sus características funcionales, las propiedades resistentes del hormigón compactado permiten el paso continuado de vehículos, pero la regularidad superficial que es posible conseguir mediante la compactación con rodillos no es en general satisfactoria para circular a altas velocidades. En consecuencia, en carreteras secundarias y en otras aplicaciones en las que no se requiere una gran regularidad superficial los pavimentos de hormigón compactado suelen dejarse sin recubrir o simplemente con un tratamiento superficial. Por el contrario, en carreteras de cierta velocidad específica, es preciso disponer al menos de una capa de rodadura de mezcla bituminosa.

Si el hormigón compactado se deja sin recubrir o se dispone sólo un tratamiento superficial, pueden no realizarse juntas. En caso de disponerlas, su separación máxima no ha de ser superior a 4 m ni a 20 veces el espesor de la capa.

Cuando, sobre el hormigón compactado se vaya a disponer una capa de rodadura de mezcla bituminosa, la separación de las juntas debe estar comprendida entre 2 y 4 m, a fin de controlar su reflexión. Deben realizarse en fresco por medio de cualquiera de los sistemas de prefisuración disponibles. Al igual que en la gravacemento, esta medida puede acompañarse con la interposición de capas o de membranas de materiales (arenabetún, geotextiles impregnados con ligantes asfálticos) cuyas características les permiten absorber una parte importante de las tensiones y movimientos concentrados en las juntas.

En firmes para tráficos pesados de intensidad media o alta el hormigón compactado debe disponerse sobre una subbase de suelocemento, a fin de garantizar una compactación adecuada y una cierta uniformidad de espesores. En el caso de explanadas de buena calidad, con tráficos pesados de intensidad reducida dicha subbase puede sustituirse por una capa de zahorra o incluso eliminarse.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

La tabla 6.11.1 recoge las granulometrías recomendadas y la 6.11.2 las características que hay que exigir a los áridos. De los dos husos definidos en la primera de esas tablas, el huso HC(20) solamente deberá emplearse cuando no sean de temer riesgos de segregación.

Salvo en el caso de tráficos pesados de reducida intensidad, los áridos se suministrarán fraccionados, al menos en dos tamaños separados aproximadamente por el tamiz de 4 mm. La granulometría de los áridos combinados deberá ser continua, debiendo tenderse, en general, a la utilización de granulometrías con pocos finos. En refuerzos y siempre que se requiera abrir al tráfico inmediatamente, el CBR de la mezcla recién compactada no será inferior a 65.

Por otra parte, los áridos cumplirán las condiciones en cuanto a limpieza, plasticidad, inalterabilidad, reactividad potencial con los álcalis del cemento y contenido de terrones de arcilla, de materia orgánica y de sulfatos exigidas a la gravacemento para capas de base en calzadas.

Los cementos serán, en general, de clase resistente media o baja ($< 42,5$ MPa a 7 días). Se recomienda el empleo de cementos con un alto contenido en adiciones (tipo III, IV, V o ESP VI-1). Si el contenido ponderal en sulfatos de los áridos (UNE EN 1744-1), expresado en SO_3^- , fuera superior al 0,4%, aunque sin rebasar nunca el 1,0%, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos. La dotación de cemento será como mínimo de un 10% sobre la masa seca de los áridos.

El empleo de retardadores de fraguado será obligatorio cuando la temperatura ambiente al extender la mezcla supere los $30^\circ C$. El plazo de trabajabilidad del material, a la temperatura prevista para su puesta en obra, no bajará de los valores indicados en la tabla 6.11.3. Este se determinará midiendo el tiempo pasado el cual la densidad seca que se alcanza en una probeta con la humedad óptima, sometida al proceso de compactación normalizado, desciende dos puntos por debajo de la máxima o inicial. Los ensayos se realizarán a la temperatura prevista en la obra, de acuerdo con el ensayo descrito en el anejo A3.

La resistencia a tracción indirecta (UNE 83306) del hormigón compactado no deberá ser inferior a 3,3 MPa a 28 días. En caso de emplearse cementos con alto contenido de adiciones, dicho valor se disminuirá en un 15%.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizarán mediante ensayos de laboratorio. Se probarán como mínimo tres dotaciones distintas de conglomerante y se determinarán con una de ellas la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Por cada una de las dotaciones se confeccionarán probetas con la humedad óptima a fin de obtener la resistencia a compresión a 7 y a 28 días. Aunque la prescripción de resistencia se establece a 28 días, el control en obra se realizará a 7 días. Para ello en el laboratorio se determinará, por interpolación de los resultados, el contenido de conglomerante y la resistencia a 7 días que permita alcanzar en obra el valor prescrito, debiéndose ir a la obtención de resistencias ligeramente superiores a las especificadas. Normalmente, un exceso entre el 10 y el 15% suele ser suficiente para compensar la disminución de

resistencias en obra. Posteriormente se comprobará, para la dotación elegida, los parámetros de humedad óptima y de densidad máxima del ensayo Proctor modificado, y se estudiará la sensibilidad de la mezcla a la humedad confeccionando probetas con distintos contenidos de humedad (por ejemplo, la óptima aumentada y disminuida en un punto) que se ensayarán a la edad especificada.

La fórmula de trabajo deberá señalar:

- la granulometría de los áridos combinados;
- en su caso, la proporción de cada fracción de árido en la alimentación;
- la dosificación de cemento y, en su caso, la de aditivos;
- el contenido de agua;
- en su caso, la humedad del árido en el momento de su mezcla con el cemento y la humedad de compactación;
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 98% de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado;
- el plazo de trabajabilidad de la mezcla, en el que deben quedar terminadas todas las operaciones de ejecución.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El hormigón compactado es una de las posibilidades existentes para la construcción de firmes en carreteras sometidas a todo tipo de tráfico. Su empleo resulta adecuado en las obras en las que es posible obtener a distancias razonables materiales que cumplan las especificaciones exigidas, siendo en esas circunstancias una solución muy económica. Presenta un particular interés en aplicaciones en las que no se tengan unas grandes exigencias de regularidad superficial, por no circular los vehículos a velocidades elevadas, como ocurre, por ejemplo, en estacionamientos, plataformas para usos industriales o vías de baja intensidad de tráfico. En este último caso, los reducidos espesores a disponer permiten alcanzar con facilidad unas densidades elevadas en el proceso de compactación, con lo que se obtiene un material de gran resistencia y durabilidad.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El proceso de ejecución de una capa de hormigón compactado es muy similar al de una gravacemiento, por lo que son aplicables la práctica totalidad de las recomendaciones constructivas indicadas para dicho material.

La mezcla de los distintos componentes del hormigón compactado debe realizarse siempre en central, realizándose la dosificación del cemento y de los áridos en masa.

Aunque, como ya se acaba de mencionar, para la puesta en obra del hormigón compactado se siguen, en general, las mismas prácticas constructivas de la gravacemiento, puede ser de interés reiterar algunas de las precauciones que deben adoptarse:

- evitar segregaciones en el material, tanto durante el transporte como en la descarga y en la extensión;
- realizar una adecuada compactación, hasta conseguir la densidad exigida, dentro del plazo de trabajabilidad del material;
- el contenido de agua debe presentar unas desviaciones reducidas con respecto al definido en la fórmula de trabajo; deben evitarse tanto los excesos de humedad como las desecaciones por su influencia en la consecución de las densidades requeridas y, por tanto de las resistencias necesarias.

Si sobre el hormigón compactado se va a disponer una capa de rodadura de mezcla bituminosa, el sistema más recomendable para la formación de las juntas es el de la prefisuración en fresco, creando a distancias reducidas (entre 2 y 4 m) una serie de entallas en el material recién extendido, antes del paso de los rodillos. Existen diferentes equipos para realizar la prefisuración. Por el contrario, si el hormigón compactado se va a dejar sin recubrir o con tratamiento superficial, el método más aconsejable es el de serrado del material endurecido, para no perjudicar la regularidad superficial. En cuanto a las juntas de fin de día, es imprescindible dejar su borde lo más vertical posible, sobre todo en el caso de capas ejecutadas en épocas frías.

La reducida humedad del hormigón compactado obliga a su curado eficaz. Si sobre el hormigón compactado se va a disponer una capa de rodadura, el método más aconsejable es realizar el curado con una emulsión del tipo EAR-1 o ECR-1, con una dotación mínima de betún residual de 300 g/m². En caso de preverse el paso de tráfico sobre el hormigón compactado, deberá aumentarse la dotación de betún residual hasta 500 g/m² y proteger el riego mediante la extensión de una arena 2/4 mm, con una dotación comprendida entre 4 y 6 l/m². Por el contrario, cuando el hormigón compactado se vaya a dejar sin recubrir, el sistema más eficaz es la extensión de un producto filmógeno de curado, a base de resinas, con una dotación mínima de 200 g/m². En este caso, el producto de curado al secarse puede soportar el paso del tráfico sin necesidad de ninguna protección adicional. En obras de tamaño reducido puede también considerarse la posibilidad de realizar un curado con agua, normalmente durante 7 días.

En las capas de rodadura de hormigón compactado, la terminación obtenida con los rodillos suele proporcionar unas características antideslizantes suficientes para tráficos que circulen a velocidades reducidas. Para obtener una textura mayor, puede recurrirse a extender el hormigón compactado con un ligero exceso de humedad y, una vez compactado, dar unas pasadas de llanas giratorias (helicópteros) con las aspas ligeramente inclinadas.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los materiales, se controlarán los siguientes puntos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la amasadora;
- la dosificación del cemento y la homogeneidad en su dotación;
- la densidad obtenida, que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo

Proctor modificado, y la humedad de compactación, para lo que se debe disponer de equipos de control rápido de obra, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio de la obra se debe establecer un plan de compactación y corroborarse varias veces a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado;

- el espesor de la capa, durante la extensión y posteriormente mediante la extracción de testigos;
- la resistencia a tracción indirecta, a 7 y a 28 días;
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm si sobre el hormigón compactado se va a disponer una capa de rodadura con un espesor de varios centímetros. Dicha diferencia de cotas máxima se reducirá a 10 mm si, por circular sobre el firme únicamente tráfico a velocidades inferiores a 60 km/h, se prevé extender sobre el hormigón compactado un riego con gravilla o bien se deja sin recubrir. Además en cualquier caso se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 8 mm cuando se pase la regla de 3 m. En cualquier caso, deberá realizarse además la determinación del IRI.



TABLA 6.11.1 Granulometrías para hormigón compactado (sin incluir el cemento)

Tamices UNE-EN 933-2 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)	
	HC(16)	HC(20)
25	–	100
20	100	70-90
16	75-90	60-90
10	55-75	45-75
4	35-60	25-50
2	20-40	15-38
0,500	4-20	2-18
0,063	0-6	0-5

TABLA 6.11.2 Características de los áridos para hormigón compactado

Características	Norma UNE	T2	T3	T4
Elementos con 2 o más caras de fractura	EN 933-5	≥ 60	≥ 50	≥ 50
Índice de lajas	EN 933-3	≤ 30	≤ 35	≤ 35
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	≤ 30	≤ 35	≤ 35
Equivalente de arena	EN 933-8	≥ 40	≥ 35	≥ 35
Índice de plasticidad	103103 y 103104	NP	NP	LL < 25 IP < 6

TABLA 6.11.3 Plazos mínimos de trabajabilidad del hormigón compactado

Tipo de obra		Plazo (horas)
Sin tráfico	Anchura completa	3
	Por franjas	4
Refuerzo bajo tráfico		5

1. INTRODUCCIÓN

El riego de imprimación es un tratamiento auxiliar consistente en la aplicación de un ligante bituminoso sobre una capa granular (no tratada), seguida de la eventual extensión de un árido de cobertura, previamente a la colocación sobre aquélla de una capa bituminosa, con objeto de obtener una superficie relativamente impermeable y sin partículas minerales sueltas.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La realización de un riego de imprimación sobre una capa granular no supone ningún incremento de su capacidad estructural, pero asegura que no se produzca una disminución de ésta por la entrada de agua a través de las capas superiores del firme. Así mismo, propicia que la capa granular y la capa bituminosa apoyada en ella no trabajen de una manera absolutamente independiente.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Para los riegos de imprimación se utilizarán preferentemente emulsiones de imprimación del tipo ECI o EAI, aunque eventualmente también pueden emplearse emulsiones de rotura lenta con o sin fluidificantes, del tipo ECL-1 o EAL-1.

El eventual árido de cobertura debe ser una arena no plástica, con un tamaño máximo inferior a 4 mm. Su coeficiente de limpieza ha de ser inferior a 2 y el equivalente de arena superior a 40.

La dotación de emulsión a emplear debe ser tal que la capa granular la absorba en 24 horas. Habitualmente suelen emplearse dotaciones de 1 a 1,5 kg/m², es decir, de 0,5 a 0,8 kg/m² de ligante residual. La dotación del eventual árido de cobertura debe ser la necesaria para absorber el ligante sobrante y proteger el riego de imprimación de la acción del tráfico de obra. Habitualmente suele utilizarse una dotación de 5-6 l/m².

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El riego de imprimación es un tratamiento que debe utilizarse inexcusablemente siempre que vaya a colocarse una capa bituminosa sobre una capa granular. Un eventual problema de falta de penetración de las emulsiones suele ser debido al empleo de materiales granulares con exceso de finos, que si bien son más fáciles de colocar en obra suelen ser más susceptibles a la acción del agua.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El riego de imprimación debe ejecutarse con una cisterna dotada de rampa para obtener una dotación uniforme. Previamente a la aplicación de la emulsión es conveniente efectuar un barrido y una humectación de la capa granular para facilitar la penetración de aquélla.

La aplicación del eventual árido de cobertura debe retrasarse lo más posible, pero evitando en cualquier caso la circulación de vehículos directamente sobre la emulsión. La práctica de realizar el riego de imprimación, sin aplicación de árido, justo antes de la extensión de una mezcla

bituminosa debe ser rechazada, ya que no garantiza en absoluto la impermeabilización de la capa granular y, sin embargo, introduce el riesgo de que queden zonas con un exceso de ligante.

Es relativamente común una práctica consistente en extender el riego de imprimación, dejar que sobre él circule el tráfico y finalmente, justo antes de extender la mezcla bituminosa, aplicar un riego de adherencia. Esta práctica es conceptualmente errónea, no se traduce en ninguna ventaja técnica y supone un gasto adicional innecesario.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de los controles relativos a la calidad y a la cantidad de los materiales, deberá controlarse que el aspecto del riego de imprimación sea lo más uniforme posible.



1. INTRODUCCIÓN

El riego de curado es un tratamiento auxiliar consistente en la aplicación de un ligante bituminoso sobre una capa tratada con un conglomerante (suelocemento, gravacemento, hormigón compactado, explanada estabilizada, firme reciclado con cemento), seguida de la eventual extensión de un árido de cobertura, con objeto de formar una película delgada que impermeabilice la superficie de la capa para evitar la pérdida de humedad por evaporación y posibilitar el desarrollo de las reacciones de hidratación del conglomerante.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La aplicación de un riego de curado sobre una capa tratada con un conglomerante no supone ningún incremento de la capacidad estructural, pero es imprescindible para conseguir un material con una resistencia mecánica y una durabilidad adecuadas.

No debe confiarse al riego de curado las misiones de un riego de adherencia. Éste debe realizarse siempre que se vaya a extender una capa de mezcla bituminosa sobre la capa tratada, previa eliminación del riego de curado mediante un barrido enérgico.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Para los riegos de curado se utilizarán preferentemente emulsiones del tipo EAR-1 o ECR-1.

El árido de cobertura será una arena no plástica con granulometría comprendida entre 2 y 4 mm.

La dotación de emulsión deberá proporcionar entre 0,3 y 0,6 kg/m² de ligante residual. En caso de tener que extenderse, la dotación de árido de cobertura será la necesaria para proteger el riego de curado de la acción del tráfico. Habitualmente suele emplearse una dotación entre 4 y 6 l/m².

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El riego de curado no debe omitirse nunca en la construcción de una capa tratada con un conglomerante. En ocasiones, puede sustituirse por otros sistemas de curado (por ejemplo, un riego con agua durante varios días); no obstante, tanto su sencillez de ejecución como su fiabilidad y su bajo coste hacen que el riego de curado sea el método más recomendable, por lo que es el utilizado en la gran mayoría de las obras.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El riego de curado debe ejecutarse con una cisterna dotada de rampa para obtener una dotación uniforme, complementada en su caso con una lanza regadora para poder extender la emulsión sobre las caras laterales de la capa tratada, cuyo curado no debe descuidarse, o en superficies irregulares. El riego de curado ha de aplicarse tan pronto como sea posible, una vez finalizada la compactación. En circunstancias climáticas que favorezcan la desecación debe disponerse de equipos que mantengan húmeda la superficie mediante un

riego con agua pulverizada, sin formar charcos, hasta que sea posible la extensión del riego de curado.

Se evitará la circulación de vehículos sobre el riego de curado. Si ello no es posible, se protegerá previamente el riego de curado con el árido de cobertura.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de los controles relativos a la cantidad y a la calidad de los materiales empleados, deberá controlarse que el aspecto del riego de curado sea lo más uniforme posible.



1. INTRODUCCIÓN

El riego de adherencia es un tratamiento auxiliar consistente en la aplicación de un ligante bituminoso sobre una capa de un material tratado con un ligante bituminoso o con un conglomerante, previamente a la colocación sobre ella de otra capa bituminosa, con objeto de obtener una unión adecuada entre ambas.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El riego de adherencia no supone una aportación estructural por sí mismo. Sin embargo, el que las distintas capas que forman el firme, en particular las de mezcla bituminosa, no estén adheridas implica una pérdida muy importante de la capacidad estructural del firme. Según el tipo de firme el despegue de capas puede llegar a ocasionar una reducción hasta del 90% de su vida útil.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Se emplearán preferentemente emulsiones bituminosas termoadherentes o similares especialmente estudiadas para asegurar la adherencia entre las capas y evitar que se adhieran a los neumáticos de los vehículos de obra. También podrán emplearse emulsiones convencionales EAR-1 o ECR-1, pero en este caso deberá evitarse el riesgo de pérdida del riego por despegue por los vehículos de obra, mediante la extensión a través de una rampa dispuesta en la propia extendidora de mezcla bituminosa o mediante cualquier otro método.

La dotación de emulsión deberá proporcionar entre 0,25-0,4 kg/m² de ligante residual en condiciones normales. Sin embargo, cuando el soporte esté constituido por un material poroso o muy envejecido, la dotación de ligante residual deberá aumentarse hasta 0,4-0,5 kg/m².

Asimismo, si la capa que se va a colocar es una mezcla drenante o su espesor es reducido (inferior a 4 cm), se asegurará una adecuada adherencia mediante el empleo de una emulsión modificada por adición de polímeros (tipo ECR-1-m o ECR-2-m) en una dotación que proporcione 0,5-0,6 kg/m² de ligante residual.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

Los riegos de adherencia deberán ejecutarse inexcusablemente siempre que vaya a extenderse una mezcla bituminosa, adecuando la dotación según se ha indicado en el apartado anterior. En el caso de que el soporte esté exudado, la solución no será eliminar el riego de adherencia, sino eliminar mediante fresado la parte superior de la superficie existente.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Previamente a la aplicación de la emulsión se deberá limpiar la superficie a tratar y reparar sus posibles defectos. La limpieza debe ser enérgica, retirando todo tipo de suciedad, polvo, materiales sueltos o restos de riego extendido anteriormente que no se encuentre perfectamente adherido. Para ello se utilizarán barredoras, a ser posible autopropulsadas, que en algunos casos deberán estar dotadas de cepillos con cerdas metálicas. Si con ello no se consigue una perfecta limpieza se empleará también un chorro de agua a presión.

El riego de adherencia se efectuará preferentemente mediante una cisterna dotada con rampa de riego, evitando duplicarlo en las juntas.

Se evitará la circulación de vehículos sobre el riego de adherencia, excepto los camiones de transporte que inevitablemente deban hacerlo.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de los controles relativos a la calidad y a la cantidad de los materiales, deberá controlarse que el aspecto del riego de adherencia sea lo más uniforme posible.



1. INTRODUCCIÓN

Macadam bituminoso por penetración es el material que se obtiene al aplicar un ligante bituminoso fluido sobre una capa compactada de árido grueso con una granulometría uniforme (macadam), cuyos huecos superficiales se rellenan posteriormente con un árido fino.

Se ejecuta mediante dos aplicaciones de ligante seguidas de sendas extensiones de árido fino, de tal forma que el proceso es similar al de un macadam no recebado sobre el que se coloca un doble tratamiento superficial.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Desde un punto de vista estructural el macadam bituminoso por penetración supone una aportación, como mínimo, igual a la de un macadam, si bien hay mayores garantías de un correcto comportamiento a largo plazo gracias al efecto de la penetración de ligante. Sin embargo, con una ejecución muy cuidadosa podría llegar a admitirse que el comportamiento de un macadam bituminoso por penetración es similar al de una mezcla bituminosa en frío de las utilizadas en capas de base.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

A los efectos de la redacción de los pliegos particulares de los proyectos se recogen en las tablas 6.15.1 y 6.15.2 las granulometrías recomendables y las características exigibles al árido grueso. Para el árido fino se recomienda seguir los mismos criterios que para los áridos que se emplean en los tratamientos superficiales mediante riegos con gravillas.

Los tipos de áridos y dotaciones a emplear dependen del espesor de la capa. Se recomienda, salvo mejor criterio, emplear las dotaciones de la tabla 6.15.3.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El macadam bituminoso por penetración es una técnica antigua y tradicional, utilizada frecuentemente en el pasado con buenos resultados. Sin embargo, es una unidad de muy difícil ejecución (y de más difícil control de calidad), y que requiere un personal muy familiarizado con esta técnica: su empleo sólo está recomendado en las zonas donde haya pervivido la tradición y pueda contarse con contratistas experimentados.

Las aplicaciones más características de los macadam bituminosos por penetración son la construcción de vías de baja intensidad de tráfico sobre capas granulares y el refuerzo de firmes flexibles que estén constituidos por bases granulares y riegos con gravilla.

Como ligantes se deben utilizar preferentemente las emulsiones de los tipos EAR-2, ECR-2 y ECR-3.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Antes de comenzar la ejecución de un macadam bituminoso por penetración se debe comprobar que el soporte tiene la regularidad superficial y la compacidad adecuadas. La



extensión del árido grueso se ha de llevar a cabo, en las dotaciones previstas, mediante distribuidoras similares a las utilizadas para el macadam. Se procederá a continuación a su compactación mediante rodillos metálicos lisos pesados (más de 5 t), continuando la compactación hasta que el árido quede bien trabado.

Para la aplicación del ligante se debe utilizar una cisterna autopropulsada, preferentemente dotada de una rampa de distribución y de un sistema de calentamiento que permita obtener en el ligante una viscosidad Saybolt Furol entre 20 y 50 s.

Para las aplicaciones del ligante y las extensiones del árido fino, así como para su compactación y otros aspectos de la ejecución, se deben seguir las recomendaciones constructivas indicadas para los riegos con gravilla.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de la cantidad y de la calidad de los materiales empleados, se debe comprobar que el perfil de la superficie acabada no difiere en más de 15 mm del perfil teórico de proyecto.



TABLA 6.15.1 Husos granulométricos recomendados

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO ACUMULADO EN MASA(%)		
	MBP(60)	MBP(50)	MBP(40)
80	100	-	-
63	85-100	100	-
50	-	85-100	100
40	-	-	85-100
25	0-15	0-15	-
20	-	-	0-15
8	0-5	0-5	0-5
4	0-2	0-2	0-2

TABLA 6.15.2 Características de los áridos

Características	Norma UNE	Árido grueso
Elementos con 2 o más caras de fractura	EN 933-5	> 75%
Índice de lajas	EN 933-3	< 30%
Desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	< 30%

TABLA 6.15.3 Dotaciones de árido y de ligante

ESPESOR DE CAPA COMPACTADA (cm)			9-12	6-9	4-6
Árido grueso	Tipo		MBP(60)	MBP(50)	MBP(40)
	kg/m ²		160-240	110-180	70-120
Árido fino	1ª extensión	Tipo	A 13/7	A 13/7	A 10/5
		kg/m ²	18-25	15-20	10-15
	2ª extensión	Tipo	A 6/3	A 6/3	A 5/2
		kg/m ²	8-12	8-12	7-10
Ligante residual	1ª aplicación	kg/m ²	3,5-5,0	2,5-4,0	2,0-3,0
	2ª aplicación	kg/m ²	1,5-1,8	1,2-1,5	1,0-1,5

1. INTRODUCCIÓN

Los riegos con gravilla son tratamientos superficiales consistentes en la aplicación de una o varias manos de un ligante bituminoso sobre una superficie, complementada con una o varias extensiones de árido. Cabe distinguir distintos tipos de riegos con gravilla:

- Monocapa, formado por una mano de ligante y una extensión de árido.
- Monocapa preengravillado (sandwich) formado por dos extensiones de árido, entre las que se intercala una aplicación de ligante.
- Bicapa, formado por dos aplicaciones sucesivas de ligante y de árido.
- Bicapa preengravillado (doble sandwich), formado por tres extensiones de árido entre las que se intercalan dos aplicaciones de ligante.

Tradicionalmente se han empleado también en ocasiones riegos tricapa (tres aplicaciones sucesivas de ligante y de árido). Actualmente no se puede considerar que constituyan una solución adecuada, pues su coste es demasiado elevado y se ha demostrado que con los riegos bicapa preengravillados se obtiene siempre una impermeabilización más que suficiente.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

La misión de los riegos con gravilla no es la de aumentar la capacidad estructural de un firme. Los riegos con gravilla tienen como objetivo la formación de una membrana flexible que impermeabilice el soporte, dotando a la superficie de rodadura de una textura que asegure una buena resistencia al deslizamiento. Por tanto, el soporte sobre el que se coloque el riego con gravilla habrá de tener una capacidad estructural suficiente para el tráfico esperado durante el período de proyecto considerado. Indirectamente, sin embargo, el riego con gravilla sí contribuye a mantener la capacidad estructural al evitar la entrada de agua en las capas inferiores del firme.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

A los efectos de la redacción de los pliegos particulares de los proyectos se recogen en las tablas 6.16.1 y 6.16.2 las granulometrías recomendables y las características exigibles a los áridos. En cualquier caso, los áridos deben ser procedentes de trituración, cúbicos, limpios y de granulometría uniforme.

Los tamaños de los áridos y sus dotaciones dependen del tipo de riego con gravilla que se quiera ejecutar. Se recomienda, salvo mejor criterio, emplear las dotaciones de las tablas 6.16.3, 6.16.4, 6.16.5 y 6.16.6. En general, en la dotación de árido se tenderá al límite superior del intervalo cuanto mejor sea la forma del árido y mayor su tamaño medio dentro del huso, y al límite inferior en caso contrario.

Las dotaciones de ligante deberán variarse dependiendo del estado del soporte, de la intensidad del tráfico, del clima y de la capacidad de absorción y limpieza del árido. En la tabla 6.16.7 se recogen algunas recomendaciones para realizar estas correcciones.

La suma total de las correcciones no debe sobrepasar el 20% del valor teórico. Si ello ocurriera deberá analizarse si procede la realización de un tratamiento adicional o un cambio del tipo de riego con gravilla.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

Los riegos con gravilla pueden emplearse tanto en obras de nueva construcción o de refuerzo como en operaciones ordinarias de conservación. En obras de nueva construcción o de refuerzo los riegos con gravilla se aplican sobre bases granulares (zahorras o macadam), sobre gravaemulsión o bien en forma de macadam por penetración. En las operaciones ordinarias de conservación los riegos con gravilla se aplican directamente sobre pavimentos asfálticos.

En el caso de aplicar un riego con gravilla sobre una base granular, deberá procederse previamente a la ejecución de un riego de imprimación, para garantizar la unión del riego con gravilla y la capa de base. Sin embargo, en ocasiones, con zahorras con un alto contenido de finos, será muy difícil obtener una adecuada imprimación; en estos casos la mejor manera de conseguir un cierto anclaje del riego con gravilla con el soporte será humedecer éste y aplicar un riego bicapa preengravillado.

La selección del tipo y de la dotación del riego, además de su correcta ejecución, es decisiva para su buen funcionamiento. Junto a la experiencia existente en la zona sobre los riegos con gravilla, pueden tomarse en consideración las siguientes recomendaciones:

- Riego monocapa. Se emplean exclusivamente sobre bases de gravaemulsión o en operaciones de conservación de vías con muy baja intensidad de tráfico.
- Riego monocapa preengravillado. Se deben emplear en operaciones de conservación cuando el soporte esté exudado o presente un aspecto muy heterogéneo.
- Riego bicapa. Es el tipo más extendido; puede aplicarse en casi todas las circunstancias.
- Riego bicapa preengravillado. Pueden utilizarse sobre bases de zahorra muy cerradas o en operaciones de conservación sobre soportes deteriorados o simplemente irregulares.

Los ligantes más adecuados para la realización de riegos con gravilla son las emulsiones del tipo ECR-2 en los riegos bicapa preengravillados, y ECR-3 para cualquier tipo de riego. Si las solicitaciones del tráfico, por la intensidad del tráfico pesado o por el trazado, son particularmente elevadas, convendrá utilizar emulsiones fabricadas a partir de betunes modificados: ECR-2m, o también ECR-3m si las condiciones meteorológicas durante la puesta en obra son favorables. En tratamientos monocapa o bicapa con gravillas muy gruesas para tráfico muy intenso podría llegar a ser aconsejable incluso utilizar directamente un betún modificado del tipo BM-5.

Mención especial merecen la clasificación y la denominación de los áridos. En las explotaciones de áridos suelen encontrarse materiales con denominaciones locales y clasificados en fracciones comerciales que no se ajustan a las normas europeas vigentes sobre fraccionamiento de áridos. Además, no siempre una fracción se corresponde realmente con su

denominación numérica, siendo frecuente que una fracción d/D tenga una dimensión media bastante inferior a $(d + D)/2$. Teniendo en cuenta estas desviaciones, en los tratamientos con varias extensiones de gravilla debe evitarse la utilización de fracciones con tamaños solapados (por ejemplo, 8/16 y 6/12), siendo muy recomendable en cambio la utilización de fracciones separadas (por ejemplo, 8/16 y 4/6).

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La ejecución correcta de un riego con gravilla requiere experiencia y un especial cuidado. Más que en ninguna otra unidad de obra, la durabilidad de un riego con gravilla depende de su correcta ejecución. Los equipos deberán estar compuestos por una cisterna regadora, gravilladoras y compactadores.

La cisterna regadora deberá estar dotada de una rampa de distribución, control de la velocidad del camión (para un rango de 0 a 500 m/min) y dispositivos de ajuste de la altura y de la inclinación de la rampa, así como de la anchura del riego y de la dotación de ligante. Preferentemente, todos estos mecanismos serán automáticos; en particular, son muy recomendables las cisternas dotadas de un sistema automático de ajuste del caudal proporcionado por la bomba de ligante dependiendo de la dotación, la anchura de la aplicación y la velocidad del camión. También es recomendable la existencia de un dispositivo de apertura y de cierre automáticos de los difusores de la rampa, a fin de poder modificar la anchura de la aplicación sin necesidad de parar.

Las gravilladoras pueden ser adosadas a la caja del camión o, deseablemente, autopropulsadas. En cualquier caso deberán permitir ajustar la extensión de árido a las dotaciones previstas de una manera uniforme, y modificar la anchura de la extensión sin necesidad de parar.

Los compactadores deben ser de neumáticos. Sólo se permitirá el empleo de rodillos metálicos lisos ligeros tras las primeras extensiones de árido en los tratamientos multicapa.

Antes del comienzo de la ejecución del riego deberán realizarse todas las operaciones necesarias de acondicionamiento y de limpieza del soporte. Asimismo, deberá tenerse acopiado la mayor cantidad, y a ser posible la totalidad, del árido necesario para la ejecución de la obra. El acopio se realizará en terreno sano y limpio, separando claramente las distintas fracciones, todo ello con el objeto de evitar contaminaciones.

Al comienzo de la obra se realizarán tramos de prueba para adaptar los equipos a las dotaciones previstas. Será el momento también de comprobar, y modificar si fuera necesario, dichas dotaciones dependiendo de las condiciones particulares de la obra. Una modificación habitual, y muy recomendable en zonas de pendiente, bombeo excesivo o con clima adverso, es la inversión de las dotaciones de ligante, dejando la mayor parte de éste para la última aplicación.

Las dotaciones de árido se ajustarán para que, salvo en la última aplicación, la cobertura corresponda a la altura de una sola gravilla, siendo preferible no alcanzar la cobertura total antes que aplicar un exceso de árido. De producirse éste, se eliminará mediante cepillos. En la última aplicación, por el contrario, se buscará la cobertura total, aun a expensas de que se produzca un sobrante de árido, que deberá eliminarse por barrido con posterioridad.

El riego con gravilla se ejecutará por tramos adaptados a las condiciones de la vía y al equipo disponible. La anchura regada será como máximo la que abarquen las gravilladoras disponibles trabajando en paralelo. La longitud será como máximo la que alcancen las gravilladoras con una sola carga.

No se comenzará un tramo de riego con gravilla sin que estén dispuestos todos los elementos del equipo: cisterna, gravilladoras, compactadores y operarios. Las gravilladoras arrancarán inmediatamente detrás de la cisterna, adecuándose el caudal de la bomba de ligante para que la cisterna y las gravilladoras puedan avanzar a una velocidad similar, evitando que se distancien. No resulta conveniente en absoluto dejar franjas de ligante sin cubrir, por lo que la práctica de aplicar ligante en una anchura mayor de la que son capaces de abarcar las gravilladoras en una sola pasada debe ser evitada.

En las juntas transversales se emplearán tiras de papel o de polietileno, a fin de dejarlas rectilíneas y evitar los solapes y las sobredosificaciones. Las juntas longitudinales, en las que inevitablemente se producirán solapes, se ejecutarán de manera que los producidos por los sucesivos riegos no coincidan.

Inmediatamente después de la extensión de árido en cada capa, se procederá a una inspección rápida para detectar los posibles excesos de árido y eliminarlos mediante cepillos.

En los riegos multicapa cada una de las extensiones inferiores de árido podrán apisonarse para mejorar la formación del mosaico. Se emplearán compactadores de neumáticos o rodillos metálicos lisos ligeros, en cuyo caso se comprobará que no se produce rotura de las gravillas. En cualquier caso, este apisonado intermedio será suave, con una única pasada o a lo sumo dos.

Tras la realización de la última extensión de árido se procederá al apisonado del riego mediante compactadores de neumáticos. Las primeras pasadas (dos o tres) en cada tramo se realizarán a baja velocidad (6-8 km/h). Con posterioridad podrá aumentarse la velocidad hasta 15-20 km/h. La compactación de neumáticos se mantendrá todo el tiempo que sea posible antes de la apertura al tráfico.

La apertura al tráfico se realizará de forma que se eviten las detenciones de los vehículos sobre los tramos ejecutados ese mismo día. A ser posible se dispondrá un vehículo piloto para limitar la velocidad del tráfico a unos 30 km/h y evitar la circulación canalizada.

Será necesario realizar un barrido del riego para eliminar las gravillas sobrantes. Este barrido se realizará a las veinticuatro horas aproximadamente de la apertura al tráfico de cada tramo, si bien con tráficos intensos puede ser necesario acortar el tiempo y, por el contrario, en vías de muy baja intensidad de tráfico pueda realizarse en una sola operación al final de la obra. En cualquier caso, al finalizar la obra se realizará un barrido adicional. Transcurrido un plazo de 15 días desde la finalización del riego se realizará una inspección a fin de comprobar si es necesario realizar un barrido suplementario.

En algunas ocasiones, especialmente si se ejecuta el riego justo antes del mal tiempo o si el tráfico inicial es muy intenso, se pueden producir pérdidas excesivas de árido, dando la sensación de que el último riego se ha perdido. Ello suele ser debido en la mayor parte de los casos a una subdosificación de la última aplicación de ligante o a un lento desarrollo de la

cohesión del ligante. Para paliar este problema debe recurrirse a la realización de un riego de protección. Este tratamiento (que es aconsejable utilizar en todas las ocasiones, incluso con condiciones ambientales o de tráfico favorables) consiste en aplicar, una vez barrido el riego con gravilla, una mano de ligante con dotación muy baja, del orden de $0,15 \text{ kg/m}^2$ de ligante residual. Para ello se emplean emulsiones del tipo ECR-1 (sin fluidificantes), diluidas hasta concentraciones del 25-30%.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de las comprobaciones sobre la calidad de los materiales, se comprobarán regularmente las dotaciones del ligante y de los áridos mediante el empleo de bandejas metálicas.



TABLA 6.16.1 Granulometrias de áridos para riegos con gravilla

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)				
	8/16	6/12	4/8	4/6	2/4
20	100	-	-	-	-
16	90-100	100	-	-	-
12,5	30-70	90-100	100	-	-
8	0-10	30-70	90-100	100	-
6,3	0-5	0-10	30-70	90-100	100
4	-	0-5	0-10	0-10	90-100
2	-	-	0-5	0-5	0-10
1	-	-	-	-	0-5

TABLA 6.16.2 Características de los áridos para riegos con gravilla

Características	Norma	T3	T4	Arcenes
Elementos con 2 o más caras de fractura (%)	UNE-EN 933-5	> 90	> 75	> 75
Coefficiente de limpieza	NLT-172	< 0,5	< 1	< 1
Desgaste Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	< 25	< 30	< 30
Coefficiente de pulido acelerado	NLT-174	> 0,45	> 0,45	> 0,40
Indice de lajas	UNE-EN 933-3	< 25	< 25	< 30
Adhesividad (inmersión en agua)	NLT-166	> 95%	> 95%	> 95%
Adhesividad (placa Vialit)	NLT-313	90% (vía húmeda) 80% (vía seca)		

TABLA 6.16.3 Dotaciones de riegos con gravilla monocapa

Tipo	Dotación de árido (l/m ²)	LIGANTE HIDROCARBONADO		
		B150/200 BM-5	ECR-3 ECR-3m	ECR-2 ECR-2m
		Dotación de ligante residual (kg/m ²)		
8/16	10-13	1,3	1,3	-
6/12	7-10	1,0	1,0	-
4/8	5-8	-	0,7	0,7

TABLA 6.16.4 Dotaciones de riegos con gravilla monocapa preengravillados

Aplicación	ARIDO		LIGANTE HIDROCARBONADO	
	Tipo	Dotación de árido (l/m ²)	Tipo	Dotación de ligante residual (kg/m ²)
1ª	8/16	8-11	ECR-2 ; ECR-2m ECR-3 ; ECR-3m	1,6
2ª	4/6	6-8		
1ª	6/12	6-9	ECR-2 ; ECR-2m ECR-3 ; ECR-3m	1,2
2ª	2/4	5-7		

TABLA 6.16.5 Dotaciones de riegos con gravilla bicapa

Aplicación	ARIDO		LIGANTE HIDROCARBONADO	
	Tipo	Dotación de árido (l/m ²)	Tipo	Dotación de ligante residual (kg/m ²)
1ª	8/16	10-12	ECR-2 ; ECR-2m ECR-3 ; ECR-3m	0,8
2ª	4/6	5-7		1,1
1ª	6/12	7-9		0,6
2ª	2/4	4-6		0,9

TABLA 6.16.6 Dotaciones de riegos con gravilla bicapa preengravillados

Aplicación	ARIDO		LIGANTE HIDROCARBONADO	
	Tipo	Dotación de árido (l/m ²)	Tipo	Dotación de ligante residual (kg/m ²)
1ª	8/16	8-11	ECR-2 ; ECR-2m ECR-3 ; ECR-3m	1,3 0,9
2ª	4/8	5-7		
3ª	2/4	4-6		

TABLA 6.16.7 Criterios de corrección de las dotaciones de los riegos con gravilla

FACTOR DE CORRECCIÓN		CORRECCIÓN
Soporte	Muy rico en ligante, exudado	- 7/10%
	Pobre en ligante, envejecido, agrietado	+ 10/15%
Tráfico	T3	-
	T4	+ 5/8%
	Arcenes	+ 8/12%
Clima	Cálido	- 3/5%
	Templado	-
	Frío y seco	+ 5/8 %
	Frío y húmedo	+ 10/12%
Aridos sucios o absorbentes		+ 5/8%

1. INTRODUCCIÓN

Las lechadas bituminosas son mezclas fabricadas a temperatura ambiente con áridos, emulsión bituminosa, agua y, eventualmente, polvo mineral de aportación y aditivos, cuya consistencia a la temperatura ambiente es adecuada para su puesta en obra, como tratamiento superficial, con rastra de goma.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Los tratamientos superficiales con lechada bituminosa tienen una misión similar a los riegos con gravilla desde el punto de vista estructural, es decir, no aportan capacidad estructural, pero sí permiten mantener ésta mediante la impermeabilización del firme. En este aspecto, su principal diferencia con respecto a los riegos es que mientras éstos son muy flexibles, las lechadas bituminosas presentan mayor rigidez, lo que debe ser tenido en cuenta en relación con las características del soporte.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Los ligantes a emplear serán emulsiones bituminosas del tipo EAL-2 o ECL-2, es decir, de rotura lenta sin fluidificantes. Para la categoría de tráfico pesado T2, así como en las zonas climáticas cálidas para categorías T3 y T4, se emplearán emulsiones con residuos de destilación más duros, es decir las EAL-2d y ECL-2d. En las condiciones más duras, tanto por la intensidad del tráfico pesado como por el trazado de la vía, deberá recurrirse a los mismos tipos de emulsiones, pero fabricadas con betunes modificados (tipo ECL-2m).

Se recogen en la tabla 6.17.1 las granulometrías más recomendables.

El árido procederá de trituración y la fracción gruesa deberá reunir las condiciones recogidas en la tabla 6.17.2. El árido fino procederá mayoritariamente de la trituración de un material de similares características a las del árido grueso, pudiéndose admitir hasta un 10% de arena natural sobre la masa total del árido confinado.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

Las lechadas bituminosas tienen su campo de aplicación fundamental como tratamientos superficiales en operaciones de conservación y mantenimiento preventivo. Además, pueden emplearse en obras de nueva construcción y en rehabilitaciones sobre bases bituminosas, en particular sobre capas de gravaemulsión. También pueden utilizarse como tratamiento de sellado de mezclas abiertas en frío, o de tratamientos superficiales con riegos.

Los criterios generalmente aceptados están recogidos de manera resumida en la tabla 6.17.3. Únicamente cabe recomendar el empleo generalizado de las dobles capas de lechada bituminosa sobre firmes envejecidos o ligeramente fisurados.

Una limitación importante para las lechadas bituminosas es la regularidad superficial del soporte. Las lechadas bituminosas deben utilizarse siempre sobre soportes cuyas deformaciones, medidas con regla de 3 m, no excedan de 1 cm para capa única de LB-3, de 1,5 cm para capa única de LB-2 y de 2 cm para dobles capas.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La aplicación de las lechadas bituminosas se realiza con un equipo específico de mezcladora-extendedora autopropulsada. Al igual que el equipo mecánico, el equipo humano necesario para la ejecución de una lechada bituminosa debe estar absolutamente especializado. Ello supone que, en cualquier caso, la ejecución de una lechada bituminosa deberá ser realizada por un contratista especializado con experiencia probada, que deberá aportar la fórmula de trabajo acompañada de los resultados de los ensayos correspondientes.

En todos los casos previamente a la extensión de la lechada bituminosa se procederá a las reparaciones localizadas necesarias y a la limpieza del soporte para asegurar una correcta adherencia. En épocas muy cálidas puede llegar a producirse una rotura prematura de la lechada en la interfaz con el soporte dando lugar a una mala adherencia. En estos casos puede ser conveniente la humectación previa del soporte para disminuir su temperatura.

La adherencia de las lechadas bituminosas sobre las marcas viales ejecutadas con pintura plástica suele ser deficiente. Esto obliga a la eliminación previa de dichas marcas viales, por ejemplo mediante microfresado.

Se pondrá especial cuidado en la ejecución de las juntas transversales, tanto al comienzo como al final de cada extensión, y de las juntas longitudinales. En las juntas transversales se eliminará el material sobrante dejando una línea lo más recta posible y se evitarán las duplicaciones de dotación. Cuando la extensión no se pueda efectuar a anchura completa, las extensiones contiguas se solaparán en unos 10-20 cm. Cuando la lechada bituminosa se extienda en dos capas se evitará la coincidencia de las superposiciones longitudinales y de las juntas transversales de ambas capas.

Un factor fundamental para el correcto funcionamiento posterior de la lechada bituminosa es la elección del momento de apertura al tráfico rodado. En ningún caso se debe abrir al tráfico antes de la rotura de la emulsión y resulta conveniente dejar un tiempo desde ésta hasta la apertura para permitir a la lechada bituminosa alcanzar una cohesión mínima suficiente. En los casos que sea necesaria una apertura rápida al tráfico, se deberá modificar la formulación, particularmente el tipo de emulsión y la proporción y el tipo de los aditivos, para acelerar el proceso de rotura y la adquisición de cohesión. Se procurará que durante las primeras horas tras la apertura al tráfico la velocidad de los vehículos sea baja.

En los tratamientos con lechada bituminosa, especialmente en los del tipo grueso, suele ser habitual la pérdida de una pequeña proporción de gravillas. Esta pérdida debe ser pequeña y producirse únicamente durante las 24-48 h siguientes a la apertura al tráfico. En el caso de que no fuera así (pérdidas excesivas o continuadas en el tiempo), será síntoma de una mala dosificación o ejecución de la lechada bituminosa. En cualquier caso, la gravilla suelta deberá eliminarse mediante barrido.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además del control propio de calidad de materiales y dotación de la lechada bituminosa mediante pesada, se tomarán muestras a la salida del mezclador de la máquina para la comprobación de la granulometría y del contenido del ligante residual y resistencia a la abrasión según NLT-320, debiéndose cumplir a este respecto los límites recogidos en la tabla 6.17.4. Además, sobre la lechada bituminosa terminada se comprobarán las características superficiales del tratamiento, que deberá cumplir los límites de la tabla 6.17.5.

TABLA 6.17.1 Granulometrías recomendadas de lechadas bituminosas

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)		
	LB-2	LB-3	LB-4
8	100	-	-
6,3	80-95	100	-
4	60-84	75-90	100
2	40-64	55-75	77-92
1	25-45	40-60	53-74
0,500	15-31	25-45	35-56
0,250	10-22	15-30	20-40
0,125	6-14	8-20	12-26
0,063	5-9	6-12	10-18

TABLA 6.17.2 Características de los áridos para lechadas bituminosas

Características	Norma UNE	T2	T3	T4	Arcén
Elementos con 2 o más caras de fractura (%)	EN 933-5	≥ 90	≥ 75	≥ 75	≥ 75
Coef. desgaste Los Ángeles	EN 1097-2	≤ 25	≤ 25	≤ 30	≤ 30
Coef. pulido acelerado	NLT-174	≥ 0,50	≥ 0,45	≥ 0,45	-
Índice de lajas	EN 933-3	< 30	< 30	< 30	< 30

TABLA 6.17.3 Recomendaciones de empleo de las lechadas bituminosas

Criterios de empleo	LB-2	LB-3	LB-4
Dotación media (kg/m ²)	11-14	8-11	5-8
Capa en que se aplica	2ª o única	cualquiera	1ª o única
Betún residual (% sobre árido)	6-10	7-11	8-13
Agua de amasado (% sobre árido)	10-15	10-15	10-20
Campo de aplicación	T2 a T4 vías rápidas	T3-T4 1ª capa y sellado	Arcenes, sellado y 1ª capa

TABLA 6.17.4 Resistencia a la abrasión exigida a las lechadas bituminosas

(NLT-320)	T2	T3	T4-arcén-sellado
Pérdida máxima (g/m ²)	575	650	800

TABLA 6.17.5 Características superficiales exigidas a las lechadas bituminosas

Características	NLT	LB-2	LB-3	LB-4
Textura superficial (mm)	335	> 0,9	> 0,7	> 0,5
Resistencia al deslizamiento (CRT)	336	> 65	> 60	> 55



1. INTRODUCCIÓN

Se denomina mezcla bituminosa en frío a una combinación de una emulsión bituminosa, áridos y eventualmente aditivos que puede extenderse y compactarse a temperatura ambiente.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El comportamiento estructural de una mezcla bituminosa en frío depende de su tipo y de su composición. Las mezclas densas con granulometrías continuas tienen, después del proceso de maduración, un comportamiento, al menos en teoría, similar al de las mezclas correspondientes fabricadas en caliente.

Sin embargo, la inmensa mayoría de las mezclas bituminosas en frío utilizadas son abiertas, con una elevada proporción de huecos y un ligante residual relativamente blandos. Estas mezclas son mucho más flexibles que las mezclas en caliente, con una alta resistencia a fatiga. Esto permite colocar capas delgadas de mezcla abierta en frío que trabajan sin problemas sobre soportes flexibles, en particular sobre bases o subbases granulares. A efectos de cálculo suele admitirse que las mezclas abiertas en frío tienen un módulo de elasticidad del orden de unos 2.000 MPa.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Salvo casos excepcionales se emplearán las mezclas abiertas en frío, cuyos husos granulométricos recomendados se recogen en la tabla 6.18.1. El árido empleado será básicamente árido grueso y deberá cumplir las especificaciones que se recogen en la tabla 6.18.2.

El ligante bituminoso a emplear para las mezclas abiertas en frío será una emulsión del tipo ECM o EAM. Cuando se prevean unas condiciones particularmente duras por la intensidad del tráfico pesado, el clima o el trazado se emplearán los mismos tipos de emulsiones, pero fabricados a partir de betunes modificados: ECM-m y EAM-m.

Para el caso de las mezclas bituminosas en frío cerradas se utilizarán emulsiones del tipo ECL-2 o EAL-2.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El empleo de las mezclas bituminosas en frío densas está poco desarrollado, por lo que en adelante las recomendaciones se referirán exclusivamente a las mezclas abiertas en frío.

Las mezclas abiertas en frío se emplean tanto en obras de nueva construcción y de refuerzo como en renovaciones superficiales y pequeñas operaciones de conservación, por ejemplo para la realización de bacheos.

En obras de nueva construcción y de refuerzo las mezclas abiertas en frío pueden emplearse como capas de base, intermedias o de rodadura. En capas de base e intermedias se debe utilizar el tipo AF-20 para capas con espesores entre 5 y 8 cm y el AF-25 para capas de mayor espesor. En capa de rodadura sobre bases granulares o bases bituminosas del tipo gravaemulsión o mezcla abierta en frío, se emplearán el tipo AF-12 para espesores de 5 cm o superiores y el AF-8 para espesores inferiores a 5 cm.

En tareas de renovación superficial pueden utilizarse mezclas abiertas en frío en capas de 3 o 4 cm de espesor como alternativa a otras técnicas, como los riegos con gravilla y las lechadas bituminosas o las mezclas en caliente. En estos casos se debe utilizar el tipo AF-8.

En el caso de que el soporte de la mezcla abierta en frío no esté impermeabilizado, deberá tenerse en cuenta la alta porosidad de estas mezclas, por lo que antes de la extensión de la capa de mezcla abierta en frío o bien sobre ella deberá aplicarse un tratamiento de sellado.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Existen tres posibilidades para la fabricación de las mezclas abiertas en frío: centrales específicas, centrales de fabricación mezclas bituminosas en caliente y equipos mixtos mezcladora-extendedora autopropulsada.

La fabricación de las mezclas abiertas en frío en las centrales de mezclas en caliente se realiza eliminando total o parcialmente la actuación del quemador del tambor-secador. Por su parte, en los equipos mixtos mezcladora-extendedora los áridos se suministrarán ajustados a la granulometría prevista en la fórmula de trabajo, de manera que previamente a su carga en los camiones de transporte deberá procederse a su dosificación y mezclado.

Sin embargo, el sistema más habitual de fabricación de mezcla abierta en frío son las centrales específicas, similares en su concepción y funcionamiento a las de suelocemento. Son centrales de funcionamiento continuo con un número de tolvas suficiente, como mínimo dos, para manejar las distintas fracciones de árido necesarias para obtener granulometría establecida en la fórmula de trabajo. La dosificación se realiza volumétricamente, por lo que deberá extremarse el cuidado en la elección de los áridos (uniformidad y limpieza), así como en la formación de acopios. El mezclador de la central deberá contar con algún sistema que permita regular el tiempo de mezclado y la producción se ajustará para conseguir que el nivel de mezcla dentro del mezclador no sobrepase la altura alcanzada por las paletas.

Previamente al comienzo de la obra se realizará un tarado completo de los dispositivos de dosificación de áridos y de emulsión. Este tarado deberá repetirse cada vez que haya variaciones en el suministro de materiales.

El suministrador del ligante ajustará el tipo y las características de la emulsión a las características del árido, de forma que la rotura de aquélla se produzca lo más rápidamente posible después de la salida del mezclador. Con ello se consigue optimizar la envuelta de los áridos y minimizar el riesgo de escurrimientos en el acopio de mezcla abierta en frío o en el transporte.

Las mezclas abiertas en frío pueden acopiarse durante varios días, e incluso durante más tiempo si se ha tenido en cuenta esa eventualidad en la formulación de la emulsión. El acopio de una cantidad de mezcla abierta en frío equivalente a uno o dos días de producción suele ser conveniente, tanto para independizar la puesta en obra de la mezcla de su fabricación, como para poder detectar ocasionales problemas en ésta y eliminar mezclas heterogéneas o con mala envuelta.

Previamente al comienzo de la extensión se realizarán las operaciones necesarias de acondicionamiento y limpieza del soporte y se ejecutará el riego de adherencia correspondiente.

La extensión de las mezclas abiertas en frío se realizará con extendedoras autopropulsadas. Únicamente en operaciones de reperfilado, y siempre que vaya a haber una capa superior, podrán utilizarse motoniveladoras. Se procurará realizar la extensión de forma continua para obtener una buena regularidad. Las juntas transversales se cortarán verticalmente y las juntas longitudinales se cuidarán evitando que se sitúen en las zonas de rodada.

La compactación se realizará mediante rodillos metálicos lisos y compactadores de neumáticos. Sólo se empleará la vibración para la compactación de capas de espesor superior a los 8 cm. Para evitar la adherencia de la mezcla a los compactadores podrán humedecerse los rodillos y neumáticos con productos antiadherentes.

La práctica tradicional de extender un recebo sobre las mezclas abiertas en frío puede resultar conveniente a veces, pero también contraproducente. Por ello el recebo se extenderá únicamente después de terminar la compactación y antes de la apertura al tráfico. Se utilizará una dotación baja, del orden de 3 a 5 l/m², de una arena limpia y fina, preferentemente del tipo 0/3, que se apisonará ligeramente con el compactador de neumáticos.

La apertura al tráfico puede realizarse inmediatamente después de terminar la compactación. Durante las primeras horas se procurará que el tráfico circule a baja velocidad y sin realizar maniobras bruscas sobre la mezcla. Si se hubiera extendido un exceso de recebo y quedara árido suelto sobre la superficie se procederá a la realización de un barrido general de la capa.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de la calidad de los materiales, se tomarán muestras de la mezcla en la descarga de los camiones en la extendedora, con las que se comprobarán la granulometría y el contenido de ligante. Sobre la capa terminada se tomarán muestras para la comprobación de espesores y de densidades.

Se comprobará que el perfil de la superficie acabada no difiere del perfil previsto en proyecto en más de 10 mm en capas de rodadura o en más de 15 mm en el resto de las capas. Además, se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 5 mm en capa de rodadura o a 8 mm en el resto de las capas al pasar la regla de tres metros.

En las capas de rodadura se comprobará también que la textura superficial (NLT-335) es superior a 0,7 mm y que el coeficiente de resistencia al deslizamiento (NLT-336) es superior a 65, medido después de dos meses de la apertura al tráfico.



TABLA 6.18.1 Husos granulométricos de mezcla abierta en frío

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)			
	AF-25	AF-20	AF-12	AF-8
40	100	-	-	-
25	65-90	100	-	-
20	54-78	70-95	100	-
12,5	30-55	45-70	60-85	100
8	16-42	22-46	30-55	50-75
4	3-20	3-20	6-24	10-28
2	0-5	0-5	0-5	0-5
0,063	0-2	0-2	0-2	0-2

TABLA 6.18.2 Características de los áridos para mezcla abierta en frío

Características	Norma UNE	Rodadura T3-T4	Bases e intermedias	Bacheos
Elementos con 2 o más caras de fractura (%)	UNE-EN 933-5	≥ 90	≥ 75	≥ 75
Coefficiente de desgaste Los Angeles	UNE-EN 1097-2	≤ 25	≤ 30	≤ 35
Coefficiente de pulido acelerado	NLT-174	≥ 0,40	-	-
Indice de lajas	UNE-EN 933-3	≤ 25	≤ 30	≤ 35
Coefficiente de limpieza	NLT-172	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5

TABLA 6.18.3 Recomendación de empleo de las mezclas abiertas en frío

TIPO DE CAPA		TIPO DE MEZCLA ABIERTA EN FRÍO	
NUEVA CONSTRUCCIÓN O REFUERZO	rodadura	$e < 5 \text{ cm}$	AF-8
		$e \geq 5 \text{ cm}$	AF-12
	intermedia o base	$4 < e \leq 8 \text{ cm}$	AF-20
		$e > 8 \text{ cm}$	AF-25
RENOVACIÓN SUPERFICIAL	$e = 3 - 4 \text{ cm}$		AF-8

TABLA 6.18.4 Dotación mínima de ligante hidrocarbonado

TIPO DE CAPA	% MÍNIMO DE BETÚN RESIDUAL
Rodadura	3,5
Intermedia o base	3,0

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina mezcla bituminosa en caliente a la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película continua de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos y su puesta en obra se realiza a temperatura muy superior a la ambiente.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las mezclas bituminosas en caliente resisten por la cohesión que proporciona el ligante hidrocarbonado y por el rozamiento interno entre los áridos, predominando una u otra componente de resistencia según el tipo de mezcla, en particular su granulometría. Como todos los materiales tratados con ligantes bituminosos, el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente, en particular su módulo de deformación, varía según las condiciones de temperatura y de tiempo de aplicación de las cargas, de forma que se rigidizan al bajar las temperaturas y son más deformables al aumentar los tiempos de carga. Sin embargo, a efectos de cálculo suele simplificarse este comportamiento y se admite que las mezclas bituminosas en caliente convencionales tienen un módulo de elasticidad de 4.000 a 7.000 MPa aproximadamente.

En estas recomendaciones no se considera el eventual empleo de mezclas bituminosas de alto módulo (con módulo de rigidez del orden de 11.000 MPa).

En los firmes formados por materiales granulares y mezclas bituminosas en caliente, cuando éstas se colocan en espesores de 12-15 cm o superiores, representan la parte resistente más importante del firme. En estos casos la vida del firme depende en buena medida de la resistencia a fatiga de la mezcla bituminosa en caliente. Sin embargo, cuando la mezcla se coloca en espesores inferiores a los indicados y sobre soportes flexibles, su rigidez puede resultar excesiva, apareciendo un deterioro muy rápido, salvo que se adopten precauciones especiales en la formulación de la mezcla para garantizar su flexibilidad.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Los husos granulométricos más utilizados se encuentran recogidos en la tabla 6.19.1. La elección entre uno u otro tipo de granulometrías estará condicionada por el espesor y el tipo de capa en que se vayan a emplear. Se recomienda seguir los criterios de la tabla 6.19.2.

Las condiciones a exigir a los áridos dependen del tipo de capa y de la categoría del tráfico pesado. Se recomienda adoptar las exigencias recogidas en la tabla 6.19.3.

Respecto al tipo de ligante, se recomienda emplear con carácter general el betún asfáltico B 60/70, con las siguientes excepciones:

- Si se desea diseñar mezclas muy flexibles, por ejemplo para capas de pequeño espesor sobre materiales granulares, o en mezclas drenantes en vías con un tráfico pesado poco intenso, casos en los que se utilizará un betún asfáltico B 80/100.
- En mezclas drenantes para tráfico pesado de intensidad media o elevada se recomienda el empleo de betunes modificados del tipo BM-3a o BM-3b.

- En mezclas de granulometría discontinua para capas de rodadura de pequeño espesor se recomienda emplear betunes modificados del tipo BM-3b o, mejor aún, BM-3c.
- En mezclas convencionales en las que desee mejorar de forma notable la resistencia a fatiga mediante contenidos altos de ligante (superiores al 5%), podrá recurrirse al empleo de betunes modificados del tipo BM-2 o BM-3c.

Las mezclas bituminosas en caliente de los tipos F, D, S y G se formularán empleando el aparato Marshall para obtener unas características mecánicas adecuadas; además, se deberán lograr unas resistencias suficientes a la acción del agua y a las deformaciones plásticas. Los límites recomendados se recogen en la tabla 6.19.4. Para el proyecto de las mezclas drenantes (PA) y de las de tipo discontinuo M se utilizará el ensayo cántabro, recomendándose seguir los criterios recogidos en la tabla 6.19.5.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

Las mezclas bituminosas en caliente constituyen el material más empleado para la formación de las capas superiores de los firmes para tráfico con intensidades medias y altas, tanto en obras de nueva construcción como en refuerzos, pudiendo considerarse una opción válida en muchas situaciones, aunque no en todas. Las principales limitaciones de empleo de las mezclas bituminosas en caliente convencionales son las que se derivan de una excesiva rigidez sobre bases no tratadas, como ya se ha indicado, o las que pueden derivarse de problemas de deformación plástica ante tráfico pesado muy intenso o canalizado. En ambos casos pueden estudiarse formulaciones específicas para resolver el problema o bien recurrir a otras técnicas.

Resulta especialmente recomendable con tráfico intenso el empleo de capas de rodadura con mezclas drenantes o con mezclas de granulometría discontinua, para mejorar la comodidad y seguridad de la circulación. Ahora bien, en ambos casos se deberá tener asegurada la capacidad estructural e impermeabilidad del soporte y, en el caso de las mezclas drenantes, comprobar además que las condiciones del entorno de la carretera no favorecen procesos de colmatación de sus huecos.

En todos los casos, aun suponiendo mayores costes iniciales, resulta una práctica muy recomendable el empleo de fórmulas de trabajo con contenidos relativamente altos de ligante, siempre que no se perjudique la resistencia a las deformaciones plásticas, ya que ello asegura una mayor resistencia a fatiga, una mayor impermeabilidad (en mezclas cerradas) y, sobre todo, una mayor resistencia al envejecimiento.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La fabricación de las mezclas bituminosas en caliente se realiza siempre en centrales específicas, normalmente de tipo discontinuo y en general con reclasificación de áridos en caliente y dosificación en peso de los componentes. A veces se emplean centrales continuas, del tipo tambor secador-mezclador con dosificación volumétrica de componentes. Aunque en ambos casos suele disponerse de los medios de control necesarios para obtener una mezcla homogénea y ajustada a las fórmulas de trabajo, con las centrales continuas deben tomarse más precauciones (sobre todo en relación con el fraccionamiento y la limpieza de los áridos) y evitar cambios frecuentes de las fórmulas de trabajo.

La extensión de las mezclas bituminosas en caliente se debe realizar siempre con extendedoras autopropulsadas dotadas preferentemente de sistemas de guiado automático y elevada capacidad de precompactación. La compactación final se ha de realizar, preferentemente, mediante equipos compuestos de rodillos metálicos lisos, dotados de vibración cuando se trate de capas gruesas, y compactadores de neumáticos. En el caso de las mezclas de tipo drenante y de las de granulometría discontinua se deben emplear únicamente compactadores de rodillos metálicos lisos.

En todo el proceso de fabricación, transporte y puesta en obra de las mezclas bituminosas en caliente es fundamental respetar las limitaciones de temperatura de mezcla marcadas por la viscosidad de los ligantes. Deben evitarse, en cualquier caso, los sobrecalentamientos de la mezcla durante la fabricación, así como la compactación a baja temperatura.

La ejecución correcta del riego de adherencia es básica para el buen funcionamiento de las estructuras formadas por varias capas de mezcla bituminosa en caliente o de las formadas por capas de mezcla bituminosa en caliente y otros materiales tratados.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los materiales, se han de tomar muestras de la mezcla en la descarga de los camiones en la extendedora, con las que se comprobarán la granulometría y el contenido de ligante y se fabricarán probetas Marshall para la determinación de la densidad de referencia y la comprobación de las características mecánicas. De la capa terminada se tomarán testigos para la comprobación del espesor y la densidad. En mezclas cerradas la densidad obtenida deberá ser superior al 98% de la de referencia, salvo en capas de espesor inferior a 6 cm donde se admitirá hasta el 97%.

En capas drenantes y en mezclas del tipo M el patrón de control de la densidad será el contenido de huecos en mezcla que no deberá variar en más de 2 puntos porcentuales en relación con el de referencia.

Se comprobará que el perfil de la superficie acabada no difiere del perfil previsto en proyecto en más de 10 mm en capas de rodadura o 15 mm en el resto de las capas. Además, se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 5 mm en la capa de rodadura ni a 8 mm en el resto de las capas cuando se pase la regla de tres metros. En dicha capa de rodadura deberá además determinarse el índice de regularidad internacional (IRI) (Tabla 6.19.8).

En las capas de rodadura se comprobará que la textura superficial (NLT-335) es superior a 0,7 mm (1,1 mm en mezclas F y 1,5 mm en mezclas M y drenantes) y que el coeficiente de resistencia al deslizamiento (NLT-336) es superior a 65 (60 en mezclas M y drenantes).



TABLA 6.19.1 Husos granulométricos recomendados para las mezclas bituminosas en caliente

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)									
	D-12	D-20	S-12	S-20	S-25	G-20	G-25	PA-12	M-10	F-10
40	-	-	-	-	100	-	100	-	-	-
25	-	100	-	100	80-95	100	75-95	-	-	-
20	100	80-95	100	80-95	73-88	75-95	65-85	100	-	-
12,5	80-95	65-80	80-95	64-79	59-74	55-75	47-67	70-100	100	100
10	-	-	-	-	-	-	-	-	75-97	75-97
8	64-79	55-70	60-75	50-66	48-63	40-60	35-54	38-62	-	-
4	44-59	44-59	35-50	35-50	35-50	25-42	25-42	13-27	14-27	23-38
2	31-46	31-46	24-38	24-38	24-38	18-32	18-32	9-20	11-22	18-32
0,500	16-27	16-27	11-21	11-21	11-21	7-18	7-18	5-12	8-16	11-23
0,250	11-20	11-20	7-15	7-15	7-15	4-12	4-12	-	-	-
0,125	6-12	6-12	5-10	5-10	5-10	3-8	3-8	-	-	-
0,063	4-8	4-8	3-7	3-7	3-7	2-5	2-5	3-6	5-7	7-9

TABLA 6.19.2 Recomendaciones de empleo de las mezclas bituminosas en caliente

TIPO Y ESPESOR DE CAPA		GRANULOMETRÍAS RECOMENDADAS
Capa de rodadura drenante (4 cm)		PA-12
Capa de rodadura	$e \leq 3$ cm	M-10, F-10
	$3 < e \leq 6$ cm	D-12(*), S-12
	$e \geq 5$ cm	D-20, S-20
Capa intermedia y base	$e \leq 9$ cm	D-20, S-20, G-20(**)
	$e > 9$ cm	S-25, G-25(**)

(*) Se utilizará esta mezcla en arcenes si no se dispone la misma mezcla que en la capa de rodadura de la calzada.

(**) Excepto cuando la rodadura sea drenante o una mezcla discontinua M o F.

TABLA 6.19.3 Características exigidas a los áridos

Características	Capas de rodadura con mezclas M, F o PA	Capas de rodadura con mezclas D o S		Capas intermedias		Capas de base
		Calzada T2	T3-T4 y arcenes	Calzada T2	T3-T4 y arcenes	
Elementos con dos o más caras de fractura (UNE-EN 933-5)	≥ 95%	≥ 95%	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%	≥ 75%
Índice de lajas (UNE-EN 933-3)	≤ 25%	≤ 30%	≤ 30%	≤ 30%	≤ 35%	≤ 35%
Desgaste Los Ángeles (UNE-EN 1097-2)	≤ 20%	≤ 25%	≤ 30%	≤ 30%	≤ 30%	≤ 35%
Arena natural (% en masa de total de áridos)	≤ 10%	≤ 10%	≤ 20%	≤ 15%	≤ 20%	≤ 20%
Equivalente de arena	> 50	> 50	> 45	> 45	> 45	> 40
Coef. pulimento acelerado (NLT-174)	≥ 0,45	≥ 0,45	≥ 0,40	-	-	-

TABLA 6.19.4 Proporción mínima de polvo mineral de aportación (% en masa)

Tipo de capa	T2	T3	T4 y Arcenes
Rodadura	100	50	- (*)
Intermedia	50	50	-
Base	50	-	-

(*) 50% en el caso de mezclas discontinuas M y F

TABLA 6.19.5 Dotación mínima de ligante (% en masa del total del árido seco incluido el polvo mineral)

Tipo de capa	D	S	G	PA	M	F
Rodadura	4,8	4,8	-	4,5	5	5,5
Intermedia	4,2	4,2	4,0	-	-	-
Base	-	4,0	3,5	-	-	-

TABLA 6.19.6 Criterios de dosificación para mezclas cerradas

Características		Mezclas D,S y G		Mezclas F	
		Calzada T2	Calzada T3-T4 y arcenes		
Ensayo Marshall	Nº de golpes por cara	75	75	50	
	Estabilidad	> 12,5 kN	7,5-12,5 kN	> 7,5 kN	
	Deformación	2-3,5 mm			
	Huecos en mezcla	Rodadura	4-6%	3-5%	4-6%
		Intermedia	5-8%	4-8%	-
		Base	6-9%	-	-
Huecos en áridos	D-12, S-12: ≥ 15% D-20, S-20, G20: ≥ 14% S-25, G-25: ≥ 13%			> 16%	
Ensayo de inmersión-compresión	Resistencia conservada	> 75%			
Pista de ensayo de laboratorio	Velocidad de deformación 105-120 min	< 15 µm/min	< 20 µm/min	< 15 µm/min	

TABLA 6.19.7 Criterios de dosificación para mezclas PA y M

Ensayo cántabro a 25 °C	Mezclas PA	Mezclas M
Huecos en mezcla	≥ 23%	≥ 12%
Desgaste en seco	≤ 20%	≤ 15%
Desgaste tras inmersión	< 40%	< 25%

TABLA 6.19.8 Valores máximos de IRI (dm/hm)

Porcentaje de hectómetros	Rodadura e Intermedia	Base
50	1,5	2,0
80	2,0	2,5
100	2,5	3,0

1. INTRODUCCIÓN

Se define como pavimento de hormigón vibrado al constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa o armado, separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotadas de juntas longitudinales, y que se pone en obra con una consistencia tal del hormigón que permite el empleo de vibradores internos para su compactación. En estas Recomendaciones el catálogo de secciones estructurales contiene exclusivamente soluciones de hormigón en masa.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las cualidades principales de los pavimentos de hormigón son su gran rigidez, que asegura un buen reparto de las cargas sobre las capas inferiores, y su resistencia a la fatiga.

La gran rigidez del pavimento de hormigón hace que recaiga sobre él la responsabilidad estructural del firme. Las capas inferiores, a las que llegan unas tensiones muy reducidas, tienen como misión fundamental asegurar un apoyo uniforme y estable al pavimento de hormigón. En las vías de baja intensidad de tráfico es frecuente que dichas capas no existan, apoyándose el pavimento de hormigón directamente sobre la explanada, salvo que ésta sea de muy mala calidad. Por el contrario, en pavimentos de hormigón vibrado sometidos a tráfico elevados hay que emplear materiales de calidad en la capa de base (hormigón magro o gravacemento con un contenido de cemento igual o superior al 5%), a fin de evitar su erosión y la consiguiente aparición de problemas de bombeo de finos y de escalonamiento de las losas.

Al igual que ocurre con el resto de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, el comportamiento de los pavimentos de hormigón es muy sensible a un infradimensionamiento de su espesor. Por el contrario, un ligero sobreespesor proporciona una gran seguridad frente a eventuales sobrecargas e incrementa notablemente su vida.

En los pavimentos de hormigón en masa, los agrietamientos del hormigón causados tanto por la retracción como por las variaciones de temperatura y de humedad de las losas deben controlarse mediante la disposición de juntas a distancias adecuadas. Si no se disponen pasadores (categorías de tráfico pesado T3 y T4), la separación máxima de las juntas no ha de ser superior a 4 m ni a 20 veces el espesor del pavimento, siendo aconsejable ir a distancias próximas a los 3,5 m. Es una práctica habitual en estos casos el disponer las juntas con una cierta oblicuidad (6:1) con respecto a la perpendicular al eje de la calzada, y que las separaciones entre ellas no sean fijas, sino que sigan un ciclo de varios valores (por ejemplo, 3,4 m - 3,8 m - 3,6 m).

Para una categoría de tráfico pesado T2 las juntas transversales se realizan perpendiculares a la calzada a una distancia entre 4 y 5 m, disponiendo entonces pasadores de acero liso de 25 mm de diámetro y 50 cm de longitud.

Ante estructuras, intersecciones, curvas de reducido radio o elementos que impidan el movimiento de las losas debe estudiarse la posibilidad de incluir juntas de dilatación.

Cuando la anchura del pavimento de hormigón es mayor de 5 m, se dispone una junta longitudinal realizada por serrado o como junta de hormigonado, si éste se realiza por franjas. Con una categoría de tráfico pesado T2, esta junta debe disponer barras corrugadas de unión de 12 mm

de diámetro y 80 cm de longitud, a distancias entre sí de 1 m. Asimismo deben disponerse barras de unión en la junta entre pavimento y arcén, en el caso en que éste sea también de hormigón y no haya sido construido monolíticamente con el pavimento de hormigón. Un arcén de hormigón unido al pavimento incrementa notablemente la capacidad estructural de este último.

Las características de rigidez de los pavimentos de hormigón, que aseguran un buen reparto de cargas en las capas inferiores, así como resistencia a la fatiga, conducen a que su utilización típica sean tanto las carreteras principales de nuevo trazado y tráfico pesado intenso, como las vías de baja intensidad de tráfico, en las que en general puede prescindirse de las capas inferiores. No obstante, la opción de pavimento de hormigón no debe tampoco descartarse en el caso de tráfico intermedios, sobre todo si se desea reducir las operaciones de conservación. En obras de refuerzo existe la posibilidad de utilizar hormigones que permiten realizar una apertura rápida al tráfico.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

El cemento a utilizar será en general de clase resistente media, recomendándose en este sentido el empleo de cementos de alto contenido en adiciones (tipos III, IV, V o ESP VI-1) y de clase resistente media (42,5 MPa a 7 días). Con precauciones pueden emplearse cementos de clase resistente alta (52,5 MPa a 7 días), que pueden resultar más indicados en obras que requieran una apertura rápida al tráfico.

Los áridos deberán cumplir las prescripciones que se indican en la tabla 6.20.1.

El valor mínimo del equivalente de arena del árido fino deberá elevarse a 80 en obras que vayan a soportar ciclos de hielo - deshielo. No obstante, las arenas procedentes de la trituración de rocas calizas que no cumplan la especificación del equivalente de arena podrán ser aceptadas como válidas siempre que el valor de azul de metileno (UNE EN 933-9) sea igual o inferior a 0,60 g de azul por cada 100 g de finos. Dicho valor deberá reducirse a 0,30 g de azul en obras sometidas a ciclos de hielo-deshielo.

La proporción de partículas silíceas del árido fino (NLT-371) del hormigón superior, o de todo el pavimento si éste se construyera en una sola capa, no será inferior al 30%. En caso contrario, deberá preverse la incrustación de gravilla no pulimentable en el hormigón fresco, combinada con una denudación química, para evitar el futuro desgaste superficial.

Los áridos no deberán presentar reactividad potencial con los álcalis del cemento.

En lo que se refiere a la granulometría de los áridos, en la tabla 6.20.2 se indican los límites del huso granulométrico del árido fino.

Se recomienda que el árido fino sea una arena natural rodada con una proporción de arena de trituración no superior al 50%.

El tamaño máximo del árido grueso no será superior a 40 mm, ni a la mitad del espesor de la capa en que se vaya a emplear. Será suministrado, como mínimo, en dos fracciones.

Siempre que sea posible, y respetando la limitación en cuanto a contenido de partículas silíceas de la arena, se utilizarán áridos calizos, por las ventajas que aportan: mejores

resistencias a flexotracción, mayor facilidad para el serrado de las juntas, menores riesgos de fisuración, abertura más reducida de las juntas de contracción.

Se recomienda el empleo de aireantes, sobre todo cuando el pavimento de hormigón se construya con pavimentadora de encofrados deslizantes. Su uso será obligatorio en zonas sometidas a heladas. Es también aconsejable el empleo de plastificantes para reducir la relación agua/cemento sin sacrificar la trabajabilidad del hormigón, cuya consistencia, medida con el cono de Abrams, deberá estar comprendida entre 2 y 6 cm (hasta 8 cm si la ejecución es manual).

La masa unitaria del total de partículas cernidas por el tamiz de 0,160 mm, incluyendo en ellas el conglomerante, no será superior a 450 kg/m³. Contenidos superiores dan lugar a mezclas con las que es difícil conseguir una regularidad superficial correcta.

A fin de garantizar una durabilidad adecuada, la dosificación de cemento no será inferior a 300 kg/m³ de hormigón fresco. La relación agua/cemento en masa no será superior a 0,46. En vías de categoría de tráfico pesado T41 y T42, dicho valor puede incrementarse hasta 0,55. Los hormigones con una elevada relación agua/cemento dan lugar a superficies poco resistentes al desgaste, por acumulación de lechada en ellas durante la vibración.

La proporción de aire ocluido en el hormigón fresco no será superior al 6% en volumen. En zonas sometidas a heladas, en las que, como se ha indicado, es obligatorio el empleo de un aireante, dicha proporción no será inferior al 4%.

Los hormigones a utilizar en pavimento de hormigón se tipifican mediante su resistencia característica a flexotracción a 28 días. Este ensayo representa más adecuadamente que el de compresión las condiciones de trabajo del hormigón en el pavimento. Las probetas para determinar la resistencia a flexotracción son prismáticas, con dimensiones de 15 x 15 x 60 cm³ (UNE 83301 y 83305). En la tabla 6.20.3 se definen los distintos tipos de hormigones para pavimento. Además se incluye la equivalencia de éstos con los hormigones controlados a compresión (UNE 83304) de acuerdo con la denominación definida en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE, que solo deberá emplearse en el caso de hormigonado de superficies de reducidas dimensiones, cuyo hormigón proceda de una central de hormigón preparado situada en las proximidades.

Si se empleasen cementos de alto contenido en adiciones, los valores de la tabla 6.20.3 a 28 días se podrán disminuir en un 15% si, mediante ensayos normales o acelerados, se comprobare que se cumplen a 90 días. La resistencia característica estará asociada a un nivel de confianza del 95%.

En pavimentos sometidos a una categoría de tráfico pesado T2 deberán emplearse únicamente hormigones de los dos primeros tipos indicados en la tabla 6.20.3.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo han de realizarse en varias etapas. En laboratorio se deben probar varias dosificaciones, para luego ajustarlas en obra sin tener que llevar a cabo de nuevo la serie de ensayos previos. La resistencia de cada dosificación ensayada se obtendrá a partir de probetas procedentes de 4 amasadas distintas, confeccionando series de 4 probetas por amasada. De cada serie, se ensayarán a flexotracción

2 probetas a 7 días y las otras 2 a 28 días. Los resultados deben cumplir las especificaciones con holgura (entre un 15 y un 30% de exceso), para compensar la disminución de resistencias en obra.

Con la fórmula de trabajo elegida en la etapa de ensayos previos en laboratorio, deberá procederse a la realización de ensayos característicos en obra, a fin de comprobar que los materiales y medios disponibles permiten obtener un hormigón con las características exigidas. Dichos ensayos se llevarán a cabo sobre probeta procedentes de tres amasadas diferentes, confeccionando 2 series de probetas por amasada. El número mínimo de probetas a fabricar por cada serie será igual a 3 en pavimentos para una categoría de tráfico pesado T2 y a 2 en los restantes casos. Una serie de cada una de las amasadas se ensayará a 7 días y las restantes a 28 días. Si la resistencia característica a 7 días es superior al 80% de la especificada a 28 días, se podrá proceder a la realización de un tramo de prueba con ese hormigón. En caso contrario, se deberá esperar a los resultados a 28 días, que deberán ser iguales o superiores a la resistencia especificada a dicha edad.

Si de la realización del tramo de prueba se deduce la idoneidad de la fórmula de trabajo ensayada, podrá procederse a su aprobación. Dicha fórmula de trabajo señalará:

- la identificación y proporción en masa, en seco, de cada fracción de árido;
- la granulometría de los áridos combinados por los tamices de 40 mm, 25 mm, 20 mm, 12,5 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm y 0,063 mm;
- la dosificación de cemento, la de agua y, eventualmente, la de cada aditivo, referidas al amasijo;
- la resistencia característica a flexotracción, a 7 y a 28 días;
- la consistencia del hormigón fresco y, en su caso, el contenido de aire ocluido.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El pavimento de hormigón vibrado es una de las posibilidades existentes para la construcción de firmes en carreteras sometidas a todo tipo de tráfico. Como ya se ha mencionado, sus campos de aplicación más frecuentes son las carreteras principales sometidas a tráfico pesado intenso y las vías de baja intensidad de tráfico. No obstante, su empleo resulta muy adecuado en todas las carreteras en las que se quiera disminuir al mínimo los costes de conservación o las interrupciones al tráfico, así como en las obras en las que sea difícil obtener a distancias razonables áridos que cumplan las exigencias para mezclas bituminosas.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Para la ejecución de los pavimentos de hormigón existe una gran variedad de equipos y de métodos de puesta en obra. Algunos están más adaptados a la construcción de carreteras importantes, mientras que otros, por el contrario, solamente son admisibles en vías secundarias. Aun dentro de cada categoría de tráfico pesado, existen distintas opciones, por lo que la adopción de unas u otras dependerá de las circunstancias particulares de cada obra.

Para la fabricación del hormigón puede recurrirse a plantas de hormigón preparado si el volumen total a construir es reducido (menos de 5.000 m³) y los ritmos de ejecución no superan los 200 m³ diarios. En otros casos puede resultar más rentable la instalación de una central de hormigonado propia para la obra.

El amasado en central puede realizarse con mezcladores continuos o discontinuos. Estos últimos suelen proporcionar un material de mayor calidad y son los que deben utilizarse. El amasado en camión hormigonera debe reservarse para obras de reducido tamaño (menos de 2.500 m²) y con un bajo ritmo de construcción. La fabricación del hormigón in situ, con pequeñas hormigoneras, no es admisible en este tipo de obras.

Los componentes sólidos del hormigón (cemento, áridos) deberán dosificarse en masa, mientras que los líquidos (agua, ciertos aditivos) podrán dosificarse en masa o en volumen.

Para obtener un pavimento de hormigón de buena calidad, sobre todo en lo que se refiere a su regularidad superficial, es imprescindible tratar de conseguir la mayor homogeneidad posible en el hormigón. Para ello, es conveniente que la mayor parte de los áridos estén acopiados antes del comienzo de la obra. Por otra parte, deberá controlarse la humedad de las arenas, a fin de introducir las correcciones oportunas en la cantidad de agua incorporada al mezclador. Los sistemas de dosificación deben ser controlados periódicamente.

Además de la homogeneidad del material, debe garantizarse una producción de la central adecuada al ritmo de puesta en obra, y un número de elementos de transporte suficiente para que la alimentación de la pavimentadora se realice de forma regular, sin que se produzcan detenciones en su avance.

El transporte del hormigón suele efectuarse en camiones volquete de caja abierta. En época calurosa deben ir provistos de cobertores, para evitar que se produzcan desecaciones en el material. La utilización de camiones hormigonera, como ya se ha mencionado, solamente es admisible en obras pequeñas y con un ritmo de ejecución reducido.

La puesta en obra del hormigón puede realizarse entre encofrados fijos o bien con pavimentadoras de encofrados deslizantes. Generalmente estos equipos suelen ser los utilizados en obras importantes, si bien existen pavimentadoras adaptadas a la construcción de vías secundarias.

Cuando se emplean encofrados fijos el hormigón se puede extender y compactar por medios manuales. Para enrasar el hormigón en estos casos puede utilizarse una regla vibrante ligera o bien un tablón con una pletina pesada y rigidizada que constituye la superficie de apisonado. Solamente debe recurrirse al sistema de ejecución manual en vías de baja intensidad de tráfico o bien en zonas pequeñas o que son objeto de reparaciones.

Para obras de más importancia han de emplearse equipos mecanizados. Los trenes de hormigonado, muy empleados hace años, han ido cediendo paso a las pavimentadoras de encofrados deslizantes en la mayoría de los países. Estos equipos, que sólo precisan de unos cortos encofrados incorporados, son capaces de extender, vibrar y enrasar uniformemente el hormigón fresco. La máquina realiza además un fratasado, de forma que se obtiene mecánicamente un acabado regular y homogéneo que no precisa de retoques manuales. Tienen dispositivos que pueden colocar automáticamente las barras de unión en las juntas longitudinales.

Las pavimentadoras de encofrados deslizantes pueden llegar a alcanzar rendimientos muy elevados, no siendo infrecuente hormigonar en una jornada más de 1 km de calzada de 7,5 m de anchura. Existen también máquinas de menor anchura y de múltiples usos, que pueden adaptarse a la construcción de calles, caminos rurales, etc. Otra posibilidad para la ejecución de estos últimos es el empleo de extendedoras de mezcla bituminosa convenientemente modificadas.

Para conseguir una buena regularidad superficial es indispensable que la pavimentadora no se detenga en ningún momento. Esto exige una alimentación constante del hormigón. Es conveniente hacer una preextensión o realizar un reparto transversal mediante una extendidora de cazo ancho.

El guiado de la pavimentadora de encofrados deslizantes se lleva a cabo por medio de palpadores que se apoyan en cables laterales sujetos por piquetes. El espaciamiento entre éstos no será superior a 10 m, debiendo reducirse a 5 m en curvas de radio inferior a 500 m o en acuerdos verticales de parámetro inferior a 2.000. Los cables deberán estar provistos de un dispositivo de tesado, de forma que la flecha entre dos piquetes consecutivos no sea superior a 1 mm. Cualquier fallo en el sistema de guiado se traduce en irregularidades superficiales del pavimento. Asimismo, los caminos de rodadura de las orugas de la pavimentadora deberán estar suficientemente compactados y limpios para permitir su paso sin deformaciones. En el caso de construirse entre encofrados fijos, éstos deberán estar correctamente colocados y deberán ser capaces de soportar, en su caso, los equipos de puesta en obra sin que se produzcan deformaciones.

Antes de realizar la extensión del hormigón deberá comprobarse la regularidad superficial y el estado de la superficie sobre la que vaya a descargarse. Cuando dicha superficie esté constituida por un material granular sin tratar, se impermeabilizará mediante un riego con un material hidrocarbonado o bien se cubrirá con una lámina de plástico. Este último método se seguirá igualmente cuando la superficie de apoyo sea un hormigón magro. En época seca y calurosa, sobre todo cuando el hormigón vaya a extenderse directamente sobre una superficie de color oscuro (por ejemplo, una base curada con emulsión bituminosa o un pavimento asfáltico), puede ser conveniente regar con agua, inmediatamente antes de la extensión del hormigón. En vías de baja intensidad de tráfico, el hormigón puede en general verse directamente sobre la explanada, previa nivelación, complementada asimismo con un riego con agua en caso necesario, para evitar pérdidas de humedad.

Si los equipos de puesta en obra no permiten la inserción en el hormigón fresco de las barras de unión, éstas deberán estar colocadas antes del vertido del hormigón. En dicho caso, la alimentación de éste deberá realizarse en general lateralmente.

Para obtener un hormigón con una durabilidad adecuada es imprescindible realizar una correcta vibración. Por ello, los elementos de vibración deben encontrarse en perfecto estado de funcionamiento. Cuando dicha vibración se realiza por medio de una batería de vibradores de aguja, como es usual en las pavimentadoras de encofrados deslizantes, una regla de buena práctica es la sustitución diaria de uno de los vibradores por otro que haya sido revisado.

El acabado del pavimento de hormigón puede requerir el empleo de fratases mecánicas o manuales para la eliminación de la lechada superficial. Aunque lo más recomendable es no tener que realizar ningún retoque manual en el pavimento detrás de la pavimentadora, siempre es conveniente disponer de fratases de longitud no inferior a 4 m y anchura de 10 cm, rigidizados

con costillas, y con tornillos de ajuste entre éstas y el fratás a distancias no superiores a 10 cm entre centros. Dichos fratases tendrán un mango suficientemente largo para ser manejados desde fuera del pavimento.

La textura del pavimento de hormigón puede ser de diferentes tipos: longitudinal, transversal u obtenida mediante denudado. Las más recomendables son las longitudinales, por combinar las ventajas de buenas características antideslizantes, niveles de ruido moderados y sencillez de ejecución. Para la obtención de dicho tipo de texturas pueden hacerse pasar sobre el hormigón fresco distintos dispositivos: arpilleras, peines de púas o de flejes metálicos, cepillos de cerdas flexibles, etc., que pueden utilizarse solos o combinados unos con otros. Los mejores resultados han sido obtenidos con los cepillos de cerdas plásticas flexibles. En el caso de utilizar pavimentadoras provistas de fratases longitudinales, es conveniente pasar asimismo una arpillera lastrada, a fin de eliminar las huellas del fratás. La profundidad de textura, medida con el método del círculo de arena, debe estar comprendida entre 0,6 y 0,9 mm.

Desde el punto de vista del compromiso entre la resistencia al deslizamiento y el ruido de rodadura, la técnica más satisfactoria es la del denudado químico. Consiste en la pulverización de un retardador de fraguado sobre el hormigón fresco, seguida de un cepillado o de la aplicación de agua a presión después del endurecimiento de la masa del hormigón. Con ello se eliminan los primeros milímetros de mortero superficial y se dejan al descubierto los áridos gruesos. Esta técnica implica el empleo de áridos con buena resistencia al pulimento, o bien su incrustación en la superficie del hormigón antes de proceder al denudado. En ocasiones se ha construido el pavimento en dos capas, la superior de 5 o 6 cm de espesor, empleando en ella áridos duros de 8 mm de tamaño máximo, que al quedar expuestos dan lugar a unos niveles sonoros muy reducidos. No obstante, tanto el sobre coste de materiales como el del proceso constructivo hacen que la texturas obtenidas por denudado tengan un coste bastante más elevado que el de los acabados longitudinales obtenidos sobre el hormigón fresco.

Es conveniente la numeración de las losas, aplicando plantillas al hormigón todavía fresco. La existencia de esta numeración no sólo contribuye a mejorar la organización de las obras, sino que constituye una gran ayuda en las tareas posteriores de conservación.

El curado constituye otra operación fundamental para poder obtener un pavimento de hormigón de buena durabilidad. En obras de reducido tamaño puede realizarse mediante un riego con agua o por cobertura con materiales que se mantienen húmedos (arpilleras, paja, etc.), o bien extendiendo elementos impermeables como láminas de plástico. Los anteriores sistemas deben mantenerse durante un mínimo de 72 horas.

El método que ofrece una mayor garantía es la pulverización mecánica de un producto filmógeno de curado, en forma de rocío continuo fino y uniforme, no sólo sobre la superficie del pavimento, sino también sobre los laterales. Las dotaciones mínimas son del orden de 200 g/m². Deberán utilizarse preferentemente productos de curado a base de resinas, sobre todo en condiciones atmosféricas que favorezcan la evaporación (vientos fuertes o calores intensos), en cuyo caso puede ser conveniente reforzar la dotación del producto filmógeno e incluso acompañarla de otras medidas que faciliten la disminución de la temperatura del hormigón. Cuando se utiliza la técnica del hormigón denudado se emplea un sistema mixto, extendiendo en primer lugar una lámina de plástico sobre el retardador de fraguado y posteriormente un producto filmógeno, una vez que se ha eliminado el mortero superficial.

Una ejecución correcta de las juntas de contracción y alabeo es también fundamental para garantizar un buen funcionamiento del pavimento de hormigón. Las juntas transversales formadas en fresco, mediante inserción de una lámina de plástico flexible o de un perfil rígido de plástico o de otro material, solamente deben ser empleadas en pavimentos que hayan de soportar tráficos a velocidades reducidas, por los defectos de regularidad superficial a que dan lugar.

El sistema utilizado habitualmente en los pavimentos de hormigón para tráficos importantes es el serrado de las juntas en el hormigón endurecido. Esta operación debe realizarse lo más pronto posible para evitar la fisuración espontánea del hormigón, pero al mismo tiempo con un retraso suficiente para evitar arrancamientos de áridos y la formación de desconchados en las juntas. Los cortes de sierra se realizan generalmente con una anchura de 3 mm y una profundidad comprendida entre 1/4 y 1/3 del espesor de las losas. En la práctica, el plazo para serrar varía entre 6 y 24 horas después del hormigonado, dependiendo de las características del hormigón y de las circunstancias meteorológicas. Normalmente, las juntas longitudinales de alabeo pueden serrarse con un desfase mayor que el de las transversales; sin embargo, cuando sean de temer fuertes descensos de temperatura entre el día y la noche (superiores, por ejemplo, a 20°C) las juntas transversales y las longitudinales deberán cortarse simultáneamente. El rendimiento de la operación de serrado depende en gran medida de la naturaleza de los áridos, pudiendo ser más del doble en el caso de áridos calizos con respecto al obtenido con áridos silíceos. En lo que se refiere a la duración de los discos, en el caso de áridos calizos es también muy superior (entre 1.000 y 3.000 m). En cualquier caso, se dispondrá en obra de sierras autopropulsadas en número suficiente y con una potencia adecuada al ritmo de ejecución del pavimento de hormigón previsto, debiendo disponerse al menos de una sierra de reserva.

Se recomienda sellar las juntas siempre que la precipitación media anual de la zona en que esté ubicado el pavimento de hormigón sea superior a 800 mm. En este caso, es necesario cajar la junta en superficie y limpiarla a fondo. Las dimensiones de la caja dependen del tipo de producto de sellado a utilizar: en frío, en caliente o mediante perfiles preformados.

Hasta el sellado de las juntas, o hasta la apertura del pavimento a la circulación si no se fueran a sellar, aquéllas deberán obturarse provisionalmente. Pueden emplearse a tal efecto cordeles, de forma que se evite la introducción de cuerpos extraños.

6. CONTROL DE CALIDAD

En el control de calidad de los pavimentos de hormigón se pueden distinguir cuatro fases diferentes:

- Control de los componentes del hormigón
- Control del proceso de fabricación en la central
- Control de la puesta en obra
- Control de la unidad de obra terminada

En cuanto a la primera fase, hay que realizar los correspondientes ensayos, tanto en origen como en el lugar de fabricación, para garantizar que los componentes del hormigón cumplen lo especificado en los pliegos de prescripciones.

En la central de fabricación hay que controlar, en primer lugar, el buen funcionamiento de sus diversos elementos, poniendo especial atención en la calibración de los sistemas de dosificación de los distintos componentes. Periódicamente (al menos dos veces al día) se deben preparar con el hormigón fabricado probetas prismáticas para su posterior ensayo a flexotracción. Además, se deben realizar las correspondientes comprobaciones de granulometría y, en su caso, de proporción de aire ocluido en el hormigón.

En el proceso de puesta en obra es fundamental controlar la temperatura y la humedad relativa del ambiente: debe suspenderse el hormigonado con lluvia intensa o cuando la temperatura ambiente sea de 2°C, son tendencia a disminuir, y tomar precauciones cuando se superen los 25°C. En general, hay que evitar el endurecimiento prematuro, la desecación rápida de la superficie y el congelamiento del hormigón fresco.

Hay que controlar el proceso de puesta en obra para que se ajuste en todas sus fases y detalles a lo especificado en los Pliegos de Prescripciones, a las indicaciones del Director de las obras y a las correspondientes normas de buena práctica. En particular, debe comprobarse frecuentemente el espesor extendido mediante un punzón graduado u otro procedimiento similar.

Terminada la puesta en obra, se deben controlar los siguientes puntos relativos a la unidad de obra:

- Regularidad superficial. La rasante no rebasará la teórica, ni deberá quedar más de 1 cm por debajo en ningún punto. En cada hectómetro de cada carril se debe determinar el índice de regularidad internacional (IRI). Hay que proceder a fresar las zonas altas cuando el IRI (NLT-330) resulte superior al límite fijado (1,5/2,0/2,5 dm/hm en el 50/80/100% de los hectómetros).
- Textura superficial. Se debe determinar su profundidad con el ensayo del círculo de arena (NLT-335), debiendo quedar comprendida entre 0,6 y 0,9 mm.
- Espesor. El espesor del pavimento no debe ser inferior en ningún punto al previsto en los Planos.
- Resistencia a flexotracción. En el caso de que la resistencia característica (estimada a partir de los resultados obtenidos en las probetas preparadas en el proceso de fabricación del hormigón) fuese inferior a la exigida, hay que proceder a la extracción de testigos cilíndricos (UNE 83302) para su ensayo a tracción indirecta (UNE 83306). En base a los resultados obtenidos se aceptará el lote en cuestión, se aplicarán las penalizaciones que pudieran estar estipuladas o se procederá a la demolición y reconstrucción de las losas afectadas.
- Integridad de las losas. Las losas no deben presentar grietas. Sin embargo, no deben considerarse como tales las pequeñas fisuras ocasionales de retracción plástica, de corta longitud y que manifiestamente no afecten más que a la superficie de las losas. Dependiendo de la gravedad de cada caso, habrá que sellar o grapar las grietas o bien demoler y reconstruir total o parcialmente la losa. La eventual reconstrucción parcial no debe suponer, de todos modos, la posterior existencia de losas con menos de 1,5 m de lado.

TABLA 6.20.1 Características de los áridos para pavimentos de hormigón

Característica	Norma UNE	Árido fino	Árido grueso
Tamaño máximo árido (mm)		4	40
Partículas arcillosas (% máx.)	EN-933-9	0,70	0,20
Partículas blandas (% máx.)	EN 1097-2	-	5
Compuestos de azufre expresados en SO ₃ ⁼ (% máx.)	EN 1744-1	0,4	0,4
Equivalente de arena (mín.)	EN 933-8	75	-
Friabilidad (máx.)		40	-
Desgaste Los Ángeles (máx.)	EN 1097-2	-	35
Absorción de agua (% máx.)		-	5
Coefficiente de forma (mín.)		-	0,15

TABLA 26.20.2 Granulometría de las arenas en pavimentos de hormigón

Tamices UNE-EN 933-1 (mm)	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (%)
4	80-100
2	58-85
1	40-68
0,500	20-46
0,250	7-22
0,125	1-8
0,063	0-6

TABLA 6.20.3 Hormigones para pavimentos

Tipo de hormigón	Resistencia características a flexotracción (MPa)	Denominación equivalente por resistencia a compresión (EHE) ^(*)
HP-4,5	4,5	HM-30/B/40/I
HP-4,0	4,0	HM-25/B/40/I
HP-3,5	3,5	HM-20/B/40/I

(*) Solo utilizable en superficies de reducidas dimensiones. Se cumplirán además las condiciones indicadas en el Pliego (cemento > 300 kg/m³, relación agua/cemento < 0,46 (0,55 para T41-T42), ...)

Nomenclatura: HM=Hormigón en masa-resistencia (MPa) / B=consistencia blanda / 40=tamaño máx. del árido (mm) / ambiente

1. INTRODUCCIÓN

El reciclado in situ con cemento de capas de firme es el material resultante de la mezcla en la propia carretera del producto obtenido en el fresado o escarificado de un firme existente con cemento, agua y, eventualmente, aditivos (retardador de fraguado) y árido de aportación (como corrector granulométrico o con otros fines), que convenientemente extendido y compactado permite transformar un firme deteriorado en una estructura homogénea, adaptada al tráfico que debe soportar.

Las reacciones de fraguado y el posterior endurecimiento del cemento convierten al firme deteriorado, previamente disgregado, en una nueva capa estructuralmente mucho más resistente, permitiendo su reutilización, sin necesidad de tener que aportar la totalidad de los áridos. Se obtiene así, después de nivelar y compactar el material, una nueva capa de firme sobre la cual se aplica sólo una capa de rodadura o bien otras capas en caso de que la capa reciclada no pueda por si sola resistir las solicitaciones de tráfico.

El reciclado in situ con cemento es una técnica que ofrece diversas ventajas. En primer lugar, permite aprovechar y reforzar un firme deformado, fatigado, o sin capacidad, en general, para el tráfico que debe soportar. A través del reciclado es posible obtener una capa tratada homogénea y estable, con unas características similares a las de un suelocemento.

Por otra parte, resulta una técnica respetuosa con el medioambiente, la reutilización de los materiales supone un importante ahorro de nuevos áridos, que puede llegar a ser de 3.000 a 4.000 t/km respecto a otras soluciones de rehabilitación. Conviene recordar, a este respecto, la dificultad cada vez mayor de encontrar suministros de áridos de calidad no demasiado alejados de las obras. Esta gran reducción en el transporte de áridos contribuye también a la conservación de la red de caminos y carreteras situada en las proximidades de la obra. Además, al realizarse en frío consume poca energía y se disminuye notablemente la contaminación y las emisiones de vapores nocivos.

Antes de efectuar un reciclado es preciso realizar estudios previos con objeto de verificar la factibilidad del reciclado, definir el tipo apropiado, determinar las características mecánicas del material tratado y obtener la fórmula de trabajo. Para ello es necesario realizar la inspección del firme existente, con toma de muestras representativas para identificar su estado estructural, la naturaleza y los espesores de las capas que lo constituyen, y caracterizar los materiales.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Para que el comportamiento estructural sea apropiado se suelen reciclar espesores comprendidos entre 20 y 35 cm, disponiéndose encima una o varias capas de mezcla bituminosa. Algunos equipos actuales permiten llegar a profundidades próximas a los 50 cm, lo que hace que los espesores habituales se puedan incrementar en situaciones peculiares (saneos de blandones), aunque hay que considerar las dificultades de compactación de dichos espesores.

Al igual que ocurre con el resto de los materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, el comportamiento de las capas recicladas con cemento es muy sensible a un infradimensionamiento de su espesor. Por el contrario, un ligero sobreespesor proporciona una gran seguridad frente a eventuales sobrecargas e incrementa notablemente la vida del firme.

Para permitir el paso inmediato del tráfico sobre la capa reciclada se debe conseguir una estructura granular con capacidad de soporte inicial suficiente ($\text{CBR}_{\text{inmediato}} \geq 65$), y se debe proteger frente a la acción abrasiva de los vehículos.

Con categorías de tráfico pesado T2 o superiores hay que evitar la reflexión de las fisuras de retracción de la capa reciclada a través del pavimento bituminoso, dado que suelen degradarse, con pérdida de material y entrada de agua. El plazo de aparición de las fisuras depende de la separación entre ellas, de la magnitud de los gradientes de temperatura en el material, del espesor de las mezclas bituminosas y de las características de la propia capa reciclada. Cualquiera de los sistemas de prefisuración resulta eficaz al formarse las fisuras a distancias muy próximas (entre 2 y 4 m), lo que reduce los movimientos de éstas y en consecuencia su reflexión en las capas superiores.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

Los firmes que se reciclan in situ con cemento están constituidos por materiales granulares que suelen estar cubiertos con un tratamiento superficial o por una o varias capas de mezcla bituminosa. Para la definición del reciclado se establecerá el espesor de firme que puede ser tratado y la necesidad o no de aportar material. El material, una vez fresado, no deberá contener elementos de tamaño superior a 60 mm. Su cernido en masa por el tamiz de 4 mm deberá ser superior al 30%. En caso contrario, o cuando se obtenga una curva granulométrica claramente discontinua, ésta se corregirá mediante la aportación de un árido, que podrá ser una arena o una zahorra natural.

El índice de plasticidad (UNE 103104) deberá ser inferior a 15 y el límite líquido (UNE 103103) inferior a 30, realizándose en caso contrario aportación de material para reducir la plasticidad o un tratamiento previo con cal. Por otra parte, el material a reciclar deberá estar exento de materia vegetal, su contenido de materia orgánica (UNE 103204) no será superior al 1% en masa y su contenido en sulfatos (UNE-EN 1744-1), expresado en SO_3 , no excederá del 1% en masa.

El contenido mínimo de cemento que habrá que emplearse será del 3% de la masa total en seco del material a reciclar. Se recomienda el empleo de cementos de alto contenido en adiciones (tipos III, IV, V o ESP VI-1) y clase resistente media-baja ($\leq 42,5$ MPa a 7 días). Si el contenido de sulfatos del suelo a estabilizar, expresado en SO_3 , fuera superior al 0,5%, deberá emplearse un cemento resistente a los sulfatos.

El empleo de retardadores de fraguado será obligatorio cuando la temperatura ambiente supere los 30°C o si no se aseguran los plazos mínimos de trabajabilidad indicados en la tabla 6.21.1. Este plazo se determinará midiendo el tiempo pasado el cual la densidad seca que se alcanza en una probeta con la humedad óptima, sometida al proceso de compactación normalizado, desciende dos puntos por debajo de la máxima o inicial. Los ensayos se realizarán a la temperatura prevista en la obra, de acuerdo con el ensayo descrito en el anejo A3.

La resistencia a compresión (NLT-305) del firme reciclado no deberá ser inferior a 2,5 MPa, ni superior a 4,5 MPa a la edad de 7 días, obtenida sobre probetas compactadas (NLT-108 o NLT-310) al 98% de la densidad máxima Proctor Modificado. Si se emplean cementos de alto contenido en adiciones y clase resistente media-baja, a fin de no ir a contenidos de conglomerante excesivos, se exigirá una resistencia mínima a compresión de 2,1 MPa a 7 días.

Durante la realización del proyecto, o antes de iniciarse las obras en su defecto, se debe estudiar y definir las características del reciclado mediante los ensayos necesarios in situ y en el laboratorio. Para su definición, se debe considerar que no es posible reciclar una mayor anchura o espesor del que tenga el firme existente, por lo que en caso de ser necesario, se debe considerar la opción de ensanche con suelocemento u otro material, o la aportación de material para obtener un mayor espesor si ese resultase escaso. El número mínimo de calicatas o sondeos mínimos necesarios para definir las características del material a reciclar será de uno cada dos kilómetros, reduciéndose a uno por kilómetro si los resultados no son homogéneos.

El estudio de la mezcla y la obtención de la fórmula de trabajo se realizarán mediante ensayos de laboratorio. Se probarán como mínimo tres dotaciones distintas de conglomerante y se determinarán con al menos una de ellas (mejor con todas) la humedad óptima y la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado. Por cada una de las dotaciones se confeccionarán al menos tres probetas con la humedad óptima y el 98% de la densidad máxima, a fin de obtener la resistencia a compresión a 7 días. Por interpolación de los resultados podrá determinarse el contenido de conglomerante que permita alcanzar en obra el valor prescrito. Para ello, en laboratorio debe irse a la obtención de resistencias ligeramente superiores a las especificadas. Normalmente, un exceso entre el 10 y el 15% suele ser suficiente para compensar la disminución de resistencias en obra. Posteriormente, se comprobará para la dotación elegida la humedad óptima y la densidad máxima del ensayo Proctor modificado y se estudiará la sensibilidad de la mezcla a la humedad confeccionando probetas con distintos contenidos de humedad (por ejemplo, la óptima aumentada y disminuida en un punto) que se ensayarán a la edad especificada.

La fórmula de trabajo deberá incluir:

- el espesor del reciclado en función de la categoría del tráfico pesado, considerando la necesidad de aportar una zahorra o suelo seleccionado si el espesor de firme disponible es inferior al previsto reciclar;
- la granulometría del material reciclado, tolerancia en el huso y, en su caso, las medidas correctoras necesarias para lograr una aceptable granulometría de los materiales a tratar, (definiendo las características del árido empleado para corregir la granulometría, si fuera necesario);
- el tipo y proporción de cemento respecto al material a reciclar en seco, y en su caso, la del aditivo;
- la proporción de agua en masa respecto al material a reciclar en seco en el momento de la mezcla, y la humedad óptima de compactación (si estas operaciones no fueran inmediatamente seguidas);
- el valor mínimo de la densidad a obtener, que no será inferior al 98% de la máxima alcanzada en el ensayo Proctor modificado;
- el plazo de trabajabilidad en el que deben quedar terminadas todas las operaciones de prueba en obra, y que deberá cumplir lo indicado en la tabla 6.21.1.

La correspondiente fórmula de trabajo deberá ser corroborada en el tramo de prueba que debe realizarse al inicio de las obras, por lo que el reciclado no se comenzará hasta disponer de los resultados de resistencia de las probetas realizadas durante dicho tramo de prueba (mínimo una semana). Para ello se reciclarán varios metros sin dosificar, con el fin de comprobar la granulometría del material tras el paso del equipo de reciclado, se realizará un ensayo Proctor modificado, y se tomarán al menos una serie de 3 probetas con el material dosificado según la fórmula de trabajo y \pm medio punto porcentual.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

El reciclado in situ con cemento es una de las mejores soluciones para reutilizar una o varias capas de un firme deteriorado. Se trata de la solución óptima de rehabilitación utilizada si la deflexión de cálculo supera el valor 200 o si se requiere recuperar la capacidad de soporte, con importantes ventajas técnicas, ambientales y económicas. Con ello se logra transformar un firme degradado en una estructura homogénea, constituyendo una base de gran calidad y resistencia a fatiga.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

Antes de iniciar el reciclado, se deberán limpiar los bordes de la calzada de todo tipo de material contaminante (materia orgánica, vegetal, etc.), y mejorar las características drenantes de la carretera, para evitar acumulaciones de agua en las cunetas o en los bordes del firme.

Para la realización del reciclado in situ con cemento se emplearán equipos específicos de reciclado que efectúen todas las operaciones en continuo, sin intervención manual (fresado, dosificación, distribución del cemento, mezclado y extensión), y que deberán encontrarse en correcto estado de uso (sin ningún tipo de pérdidas). La dosificación del cemento se realizará en forma de lechada, aportando la humedad necesaria mediante equipos que dosifiquen en masa, y cuyos inyectores se mantendrán siempre limpios. Las operaciones para abastecer de cemento al equipo dosificador se realizarán sin afectar a la circulación.

La mezcla del material fresado y el conglomerante se realizará durante todo el tiempo que resulte necesario para lograr la homogeneidad exigida, por lo que la velocidad de avance de los equipos se mantendrá en cualquier caso por debajo de los 10 m por minuto. Siempre que se observe una heterogeneidad o un defecto repetido en el mezclado, como cambios de granulometría, defectos de dosificación, etc, se detendrá el reciclado hasta eliminar la causa (desgaste de picas, limpieza de inyectores, etc).

Dado que la anchura de trabajo de los equipos obliga a trabajar por bandas, se cuidarán muy especialmente los solapes, que serán de unos 20 cm, para que no quede firme sin tratar, evitándose sobredosificaciones y controlando que estas bandas no queden con diferente humedad que el resto.

El reciclado con cemento consiste en la recuperación de las características resistentes del firme existente, por lo que no se puede lograr un ensanche de la calzada si en las márgenes se carece de una estructura mineral de firme apropiada. No se permitirá el reciclado de las bandas exteriores adyacentes al firme existente si éstas no poseen un suelo de características aceptables, y en ningún caso si dichas bandas (arcenes o bermas) están formada por suelos muy plásticos o con materia vegetal.

Cuando se necesite ampliar la anchura de la sección útil, se considerará la realización de un ensanche del firme. Una posibilidad para realizar este ensanche puede ser la fabricación de un suelocemento in situ simultáneamente con el reciclado. El árido empleado para rellenar la caja del ensanche y con el que se fabricará el suelocemento debe ser de calidad y características similares al dispuesto en la carretera para reciclar, con el fin de que la dotación de cemento y la humedad óptima de trabajo sean las mismas. En el suelocemento debe obtenerse una resistencia a compresión igual o superior a la del firme reciclado, pero sin que el incremento supere el 20%.

De igual manera, si se pretende mejorar la rasante del firme existente o modificar los peraltes en las curvas se debe proceder, previamente al reciclado, a la extensión de material de aportación hasta obtener la geometría deseada. En ningún punto el espesor del material aportado será superior al espesor a reciclar con el fin de que no quede una capa de material suelto entre la capa reciclada y el firme antiguo, salvo que se extienda una zahorra artificial y previamente se escarifique el firme.

Para lograr una regularidad superficial aceptable, antes de terminar la compactación se debe realizar un refino con motoniveladora, que en las obras importantes deberá estar dotada de equipos auxiliares de nivelación que faciliten las operaciones de obtención de la rasante, sin depender de la habilidad del maquinista. Con el refino se deberá retirar parte del material, evitándose desplazamientos importantes para evitar segregaciones, y sin realizar aportaciones en capa de pequeño espesor. Posteriormente se termina la compactación.

No se permitirá el reciclado cuando aparezcan segregaciones, nidos de áridos o cualquier otra heterogeneidad o defecto, deteniéndose los trabajos hasta eliminar la causa que provoque el defecto.

Todo el proceso debe completarse dentro del plazo de trabajabilidad del material que deberá cumplir los plazos mínimos de la tabla 6.21.1, por lo que con temperaturas elevadas (por encima de 30°C) se deberá recurrir a emplear un retardador de fraguado. Inicialmente se limitará la longitud de las bandas de trabajo a 100 m, hasta que se compruebe que la ejecución se realiza correctamente y se finaliza dentro de dicho plazo de trabajabilidad (que en caso de no haberse determinado en laboratorio por la reducida dimensión de la obra se limitará a 2 horas).

Las pasadas se realizarán en secciones completas evitándose la aparición de juntas frías entre bandas.

Para la compactación se deberá disponer de un rodillo de al menos 17 t que realice una o dos pasadas dobles vibrando detrás del equipo mezclador, y un segundo rodillo de masa superior a 15 t detrás de la motoniveladora que realice el refino. Para que la superficie quede correctamente cerrada, se deberá disponer además de un rodillo de neumáticos.

En el tramo de prueba se debe establecer el plan de compactación, realizando diversas pasadas de rodillo (4 a 6 pasadas dobles) y midiendo con una sonda nuclear en varios puntos la densidad obtenida en cada pasada. Así se determinará el número de pasadas necesarias que tendrá que realizar cada rodillo para lograr la máxima compactación, debiéndose mentalizar al maquinista de la importancia de su trabajo. Posteriormente, a lo largo de la obra, se deberá corroborar el plan de compactación establecido.

Si tras haber modificado todos los parámetros de compactación (frecuencia y amplitud, número de pasadas, etc), e incluso cambiado los equipos por otros supuestamente más adecuados, resulte imposible alcanzar el 98% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, las probetas de control de resistencias se compactarán en el laboratorio con la densidad obtenida en la obra, a fin de que resulten representativas. Si la resistencia resultase inferior a la prescrita, se deberá dosificar algo más de cemento para compensar la falta de densidad del material.

El resto de las operaciones de puesta en obra son muy similares a las de un suelocemento, una gravacemento o un hormigón compactado. Al igual que en estos materiales, conviene insistir en varios aspectos esenciales para un correcto comportamiento del material:

- la importancia de conseguir una adecuada compactación, pues la resistencia mecánica del firme reciclado está muy ligada a su densidad. Se debe pues definir el proceso óptimo de compactación en el tramo de prueba y corroborarlo cada cierto tiempo en la obra.
- el contenido de agua debe presentar unas desviaciones reducidas con respecto al definido como óptimo en la fórmula de trabajo, por su influencia en la consecución de las densidades requeridas y por tanto las resistencias necesarias. No se podrá realizar el reciclado si la humedad del material fresado supera a la óptima menos dos puntos porcentuales (necesario para dosificar el cemento en lechada), por lo que habrá que escarificar y orear el firme previamente.

Durante la compactación y hasta el riego de curado debe evitarse la desecación de la capa. Para ello se regará la superficie con un equipo de pulverización de agua que origine una neblina y evite la formación de charcos o de regueros.

El riego de curado se realizará con una emulsión que debe extenderse tan pronto como sea posible (como mínimo 2 veces al día) y protegerse convenientemente de la acción del tráfico, si se va a permitir la circulación, mediante la extensión de una capa de árido 2-4 mm con una dotación de 4 a 6 l/m², que se compactará con un rodillo de neumáticos y se barrerá antes de abrir al tráfico. Además se deberán tomar precauciones de seguridad, como limitar la velocidad para evitar deslizamientos de los vehículos, la extensión de un tratamiento superficial de mayor calidad en caso de desprendimientos superficiales de la capa reciclada y la disposición de la señalización correspondiente, pintando de amarillo el eje.

Al finalizar la jornada se trasladarán los equipos a cualquier camino, desvío o zona de protección que no resulte peligrosa para el tráfico circundante.

Antes de extender la capa superior se debe realizar un enérgico barrido, retirando todos los áridos sueltos que hayan quedado en superficie y la emulsión de curado que no esté perfectamente adherida.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los materiales, se controlarán especialmente los siguientes puntos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la cámara de mezclado, realizándose además un ensayo Proctor modificado cada tres días de trabajo o 20.000 m² reciclados, para corroborar los parámetros de densidad máxima y de humedad óptima de la fórmula de trabajo.
- la dosificación de cemento y la homogeneidad en su dotación (inspección visual del correcto funcionamiento de los inyectores 2 veces al día y medición con bandeja cada semana de trabajo). Además deberá controlarse el consumo diario de cemento, obteniéndose la dotación media al dividir por los m² realizados.
- la densidad obtenida (un punto cada 500 m²), que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor modificado, y la humedad de compactación por lo que se debe disponer de equipos de control rápidos, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio del reciclado se debe establecer el plan de compactación y corroborarse a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado.
- el espesor de la capa, mediante la apertura de calicatas (una cada 4.000 m² al menos, que además servirá para comprobar la homogeneidad de la granulometría, la humedad y el color de firme reciclado), y posteriormente mediante la extracción de testigos.
- la resistencia a compresión a 7 días, de acuerdo con el tipo de cemento empleado, sobre un total de 2 series de 3 probetas confeccionadas cada día (mañana y tarde) con la densidad media obtenida en obra.
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm, que podrá aumentarse a 20 mm en tramos de velocidad máxima no superior a 60 km/h. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 8 mm cuando se pase la regla de 3 m. Deberá realizarse también la determinación del IRI.

TABLA 6.21.1 Plazos mínimos de trabajabilidad del reciclado

Tipo de obra		Plazos (horas)
Sin tráfico	Anchura completa	2
	Por franjas	3
Con tráfico		4



1. INTRODUCCIÓN

Se define como reciclado in situ con emulsión de un pavimento bituminoso la mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante del fresado de un firme con pavimento bituminoso, emulsión bituminosa, agua y, eventualmente, áridos de aportación y aditivos. Todo el proceso de ejecución de esta unidad de obra se realiza a temperatura ambiente y sobre la misma superficie a tratar.

Las emulsiones empleadas tienen cometidos, en mayor o menor medida según los casos, tanto de ligantes como también de regenerantes del ligante presente en el pavimento bituminoso que se recicla. En algunas ocasiones, puede ser necesaria una aportación de áridos para corregir la granulometría del material fresado, así como de algún tipo de aditivo para mejorar las prestaciones mecánicas del producto final, como es el caso de la cal o el cemento, o para mejorar las condiciones del mezclado, como es el caso de los aditivos de regulación de rotura.

La técnica del reciclado con emulsión presenta, frente a las técnicas tradicionales de rehabilitación, ventajas tales como la disminución del consumo de materias primas, la eliminación en gran medida del transporte de materiales, la menor incidencia en la circulación, la menor elevación de las rasantes, etc. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones o dificultades: complejidad de los estudios de laboratorio, imposibilidad de resolver problemas estructurales asociados a un mal comportamiento del cimiento, necesidad de un período de maduración durante el que la mezcla va adquiriendo sus características finales, etc.

2. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las características finales de un reciclado con emulsión dependen en primer lugar de las características de los firmes que se reciclan, pudiéndose distinguir tres tipos distintos (tabla 6.22.1), los cuales difieren entre sí tanto por la dosificación de emulsión como por su comportamiento estructural.

Tipo I. Se pretenden reciclar materiales que en su mayor parte no están tratados con ligantes bituminosos: firmes constituidos por capas granulares con un pavimento formado por tratamientos superficiales o capas de mezcla bituminosa de pequeño espesor (igual o inferior 4 cm), o incluso caminos no pavimentados. Se obtiene una capa de base de características mecánicas similares a las de una gravaemulsión, completándose el firme con un riego con gravilla, una lechada o una mezcla en capa de pequeño espesor. El espesor del reciclado puede variar según las condiciones del tráfico desde los 6 a los 12 cm.

Tipo II. Corresponde a una situación intermedia en la que se pretenden reciclar simultáneamente materiales tratados con ligantes bituminosos y otros no tratados (o más raramente tratados con conglomerantes hidráulicos), de forma que aquéllos constituyan al menos el 50 % del espesor total que se recicla. Concretamente esta situación se da en firmes constituidos por una o dos capas de mezcla bituminosa, con un espesor entre 4 y 10 cm, apoyadas sobre una base granular (o a veces tratada con conglomerantes hidráulicos). Si los problemas afectan a la capa de base pueden levantarse las capas superiores de mezcla y actuar sobre aquélla, en cuyo caso se estaría ante una situación del

tipo I. Si los problemas afectasen sólo a las mezclas bituminosas el reciclado se realizaría exclusivamente sobre ellas, con lo que se trataría de una situación del tipo III. Finalmente, puede plantearse el reciclado conjunto de las capas superiores de mezcla y de toda o una parte de la capa de base. En este caso se está en una situación del tipo II, en la que se recicla un espesor que puede ir desde los 8 cm hasta los 12 cm.

Tipo III. Es la situación que se plantea cuando únicamente se reciclan materiales tratados con ligantes bituminosos; en general, son estructuras relativamente homogéneas que se tratan en espesores desde 6 hasta 12 cm (aunque con más dificultad podría llegarse incluso a los 15 cm). La capa reciclada podrá ser, dependiendo del tráfico futuro y de las necesidades estructurales, una capa de base o intermedia.

Por su constitución, un reciclado in situ con emulsión (especialmente del tipo I, pero también en buena medida del tipo II) es en definitiva una especie de gravaemulsión realizada in situ. Por su parte, el reciclado del tipo III sería más bien una especie de mezcla densa en frío realizada in situ. Por tanto, las características estructurales de los reciclados con emulsión podrían considerarse iguales a las de los materiales a los que se asimilan. La información obtenida en diferentes obras, así como la que se puede encontrar en la bibliografía, permite adoptar valores del módulo elástico entre 1.000 y 4.000 MPa, dependiendo del tipo de reciclado y del período de maduración, pues a medida que avanza éste va rigidizándose la mezcla.

3. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

En el reciclado con emulsión del tipo I, la emulsión que se incorpora tiene como base un betún blando (150/200 u 80/100), y sus contenidos varían normalmente entre el 4 y el 7%. En el tipo II los contenidos de emulsión son algo más bajos (3-5%), empleándose, según las circunstancias, una emulsión fabricada a partir de un betún blando (150-200) o de un ligante regenerante. En el tipo III se suelen emplear emulsiones de efecto regenerante en proporciones del 2-3%.

En todos los casos son imprescindibles unos estudios previos, relativamente complejos, para establecer las fórmulas de trabajo que han de emplearse durante la ejecución, así como para la caracterización mecánica del material reciclado. En general, estos estudios han de constar de las fases que se detallan a continuación.

Fase 1ª: Establecimiento de los tramos homogéneos.

Debe realizarse una recopilación de los datos relativos a la construcción inicial y a los eventuales acondicionamientos posteriores; además se debe contar con datos de auscultación estructural con aparatos, e ineludiblemente se debe realizar una inspección visual de todo el tramo. Con todo ello se procederá a una definición de tramos caracterizados por la homogeneidad de su estructura longitudinal y transversal.

Fase 2ª: Toma de muestras representativas de los materiales.

En los reciclados del tipo I suele ser necesario tomar el doble de muestras que en los del tipo II, y en éstos a su vez el doble que en los del tipo III. Las muestras obtenidas

deben caracterizarse en laboratorio, lo que debe servir además para redefinir, si fuera necesario, los tramos homogéneos establecidos en la fase anterior.

En los reciclados de los tipos I y II las muestras de los materiales tratados con betún deben ser obtenidas mediante un fresado similar al que posteriormente vaya a emplearse en la obra, con el fin de que la muestra sea verdaderamente representativa. Como mínimo deben realizarse determinaciones de granulometría y de contenido y tipo de ligante; a este respecto conviene diferenciar y determinar tanto la granulometría del material original como la del material obtenido por fresado. Las muestras de los materiales sin betún se deben obtener también preferentemente mediante fresado, aunque en el caso de los materiales no tratados no es imprescindible. De estas muestras se debe determinar su granulometría, la calidad del árido grueso (desgaste, caras de fractura, forma) y de la fracción fina (equivalente de arena e índice de plasticidad). También se debe determinar la humedad natural, parámetro que ha de ser objeto de un control sistemático durante la ejecución.

Fase 3ª: Definición de las fórmulas de trabajo y de los parámetros necesarios para el control de calidad.

Para los reciclados con emulsión del tipo I se deben seguir criterios similares a los de una gravaemulsión, y por ello en ocasiones se precisará corregir la granulometría mediante una aportación de árido. El contenido de emulsión se debe determinar mediante ensayos de inmersión-compresión. Se utilizarán emulsiones convencionales del tipo EAL-2 o ECL-2, con betunes de base 80/100 o 150/200. La proporción de emulsión sobre la masa del árido suele estar comprendida entre el 4 y el 6% (por encima de estas cantidades el reciclado puede no ser viable económicamente). Con el fin de obtener resistencias conservadas tras inmersión suficientemente elevadas, sobre todo cuando el material original presenta algo de plasticidad, se puede recurrir al empleo, además de la emulsión, de pequeñas proporciones de cemento (1%, por ejemplo).

En los reciclados con emulsión de los tipos II y III se seguirá un criterio similar en lo que se refiere al empleo del ensayo de inmersión-compresión para la caracterización mecánica, si bien las exigencias serán en general superiores. Además, la emulsión deberá formularse a partir de un ligante base que permita regenerar el betún envejecido. Deberá caracterizarse en el laboratorio el ligante finalmente obtenido, aun a sabiendas de que la regeneración del ligante es un proceso a largo plazo y que depende de las condiciones de temperatura y de tráfico que se den en cada caso.

En todos los casos será necesario adaptar la humedad total y la formulación de la emulsión a las características mineralógicas del árido, de forma que se obtenga una buena envuelta, una velocidad de rotura adaptada a las condiciones de ejecución y un correcto proceso de maduración.

Fase 4ª: Caracterización mecánica.

En general, la caracterización mecánica de los materiales tratados con emulsión es compleja, ya que no existe una suficiente experiencia en este campo y el comportamiento de estos materiales evoluciona con el tiempo, con tendencia a que su

resistencia mecánica y su módulo de deformación aumenten. En este sentido, es imprescindible establecer un criterio uniforme de curado de las probetas.

4. RECOMENDACIONES DE EMPLEO

Habitualmente el reciclado con emulsión del tipo I permite actuar sobre firmes flexibles, con las categorías de tráfico pesado T41 y T42, para corregir situaciones de deterioro ocasionadas por falta de capacidad de soporte o para acondicionar el firme frente a un incremento significativo del tráfico. En estos casos el reciclado supondrá una mejora de las características mecánicas y geométricas del firme.

El reciclado del tipo I debe emplearse sólo si no se presentan problemas serios en la explanada, que deben en su caso tratarse por otros procedimientos, y cuando el material granular existente sea potencialmente mejorable, esto es, cuando tenga una granulometría y una calidad que permitan, mediante la aportación de emulsión y eventualmente de algún aditivo, transformarlo en un material similar a la gravaemulsión. En este sentido, la práctica del reciclado muestra que determinados materiales mejoran su comportamiento mecánico, especialmente frente a la acción del agua, cuando se utilizan conjuntamente con la emulsión pequeñas proporciones de cemento (del orden del 1 al 2%).

El reciclado con emulsión del tipo II y especialmente el del tipo III permiten tratar situaciones de deterioro correspondientes a:

- Fisuración por fatiga de firmes semirrígidos o de firmes constituidos por capas granulares y mezclas bituminosas. En estos casos el reciclado es una alternativa a las operaciones convencionales de refuerzo acompañadas o no de fresado y reposición del firme existente.
- Fisuración por fatiga de la capa de rodadura debida a un despegue de la capa intermedia. El tratamiento debe realizarse aun cuando la fisuración no sea generalizada. La alternativa es el fresado integral de la capa y su sustitución.
- Fisuración por reflexión de grietas en firmes semirrígidos. Permite poner en valor las capas de mezcla frente a la necesidad de capas de refuerzo. En este sentido, el material similar a la gravaemulsión que se obtiene parece más eficaz frente al fenómeno de la reflexión que otras posibles soluciones.
- Fisuración por envejecimiento o por variaciones térmicas, si estos fenómenos han avanzado demasiado para ser tratados únicamente por aplicación de una capa de rodadura convencional.

5. RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

El proceso de ejecución de un reciclado in situ con emulsión consta básicamente de las siguientes fases:

- Fresado en frío en el espesor seleccionado. Debe procurarse que los tamaños máximos del material resultante del fresado no superen los 40 mm en los reciclados de los tipos I y II y los 25 mm en el del tipo III.

- Adición de la emulsión y del agua, y de los aditivos si los hubiere, y mezclado con el material fresado. Esta fase suele estar integrada con la de fresado.
- Extensión del material reciclado. Puede realizarse de forma independiente, mediante una extendidora convencional o con motoniveladora, o bien con un sistema de extensión integrado en el equipo de fresado y mezclado. Para asegurar una adecuada calidad de acabado sólo se permitirá la extensión con motoniveladora en el caso de las categorías de tráfico pesado T41 y T42. La zona de las juntas se ha de conformar manualmente, para evitar que el producto se derrame fuera de la caja de fresado durante la compactación.
- Compactación energética, generalmente combinando vibración y neumáticos. En el caso de los reciclados de los tipos I y II, el procedimiento de compactación es muy similar al de una gravaemulsión. Sin embargo, en los del tipo III, el nivel de esponjamiento de la mezcla que se produce durante el fresado es muy alto, y para conseguir un perfil adecuado en relación con las partes no tratadas se debe recurrir a una vibración muy energética y al empleo de compactadores de neumáticos muy pesados. Una buena compactación es en todo caso fundamental para permitir la apertura rápida al tráfico sin indeseables efectos secundarios.
- Proceso de rotura y de coalescencia de la emulsión bituminosa, que finaliza durante la compactación, para a continuación comenzar el período de maduración del material reciclado, cuya duración depende de condiciones intrínsecas (porosidad y humedad inicial) y de condiciones externas (insolación, aireación y tráfico). Si bien el proceso de maduración puede durar varios meses hasta alcanzar las resistencias definitivas, a efectos constructivos conviene demorar como mínimo la ejecución de las capas superiores del orden de dos a cuatro semanas. Sin embargo, si el tráfico es relativamente intenso y hay riesgo de que se produzcan arrancamientos de material debidos a los esfuerzos horizontales, es conveniente realizar un ligero tratamiento de sellado. Éste es también imprescindible si se prevén precipitaciones durante el período de maduración.

6. CONTROL DE CALIDAD

Además de la comprobación de las características de los materiales, se controlarán especialmente los siguientes puntos:

- la granulometría y la humedad del material a la salida de la cámara de mezclado, realizándose además un ensayo Proctor modificado cada tres días de trabajo o 20.000 m² reciclados, para corroborar los parámetros de densidad máxima y de humedad óptima de la fórmula de trabajo.
- la dosificación de ligante y la homogeneidad en su dotación (inspección visual del correcto funcionamiento de los inyectores 2 veces al día y medición con bandeja cada semana de trabajo). Además deberá controlarse el consumo diario de emulsión, obteniéndose la dotación media al dividir por los m² realizados.
- la densidad obtenida (un punto cada 500 m²) , que no debe ser inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo de inmersión-compresión, y la humedad de

compactación por lo que se debe disponer de equipos de control rápidos, tipo sonda nuclear durante toda la obra (incluso permanentemente durante el tramo de prueba y los primeros días de trabajo). Al inicio del reciclado se debe establecer el plan de compactación y corroborarse a lo largo del tiempo que dure la obra. Se controlará además periódicamente que el número de pasadas de cada rodillo es el indicado.

- el espesor de la capa, mediante la apertura de calicatas (una cada 4.000 m² al menos, que además servirá para comprobar la homogeneidad de la granulometría, la humedad y el color de firme reciclado), y posteriormente mediante la extracción de testigos.
- la regularidad de la superficie acabada, que no deberá rebasar la teórica en ningún punto, ni diferir de ella en más de 15 mm, que podrá aumentarse a 20 mm en tramos de velocidad máxima no superior a 60 km/h. Además se comprobará que la superficie acabada no presenta irregularidades superiores a 8 mm cuando se pase la regla de 3 m. Deberá realizarse también la determinación del IRI.



TABLA 6.22.1 Tipos de reciclado in situ con emulsiones bituminosas

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Material reciclado del firme existente	Pavimento bituminoso (> 4 cm) + base granular	Pavimento bituminoso (4-10 cm) + base tratada o no (> 50% material bituminoso)	Mezclas bituminosas
Emulsión	Emulsión de betún 80/100 o 150/200 (4-7%)	Emulsión de betún blando (150/200) o regenerante (3-5%)	Emulsión de efecto regenerante (2-3%)
Objetivo	Mejora de las características mecánicas o geométricas del firme existente	Idem tipo I y, eventualmente regeneración del ligante existente	Reciclado y regeneración del ligante existente

Capítulo 7



Secciones de firme de nueva construcción

1. CONSIDERACIONES GENERALES

En la anterior edición de las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos, publicada en 1996, se incluía un catálogo de secciones de firme, algunas de ellas novedosas, basado en la experiencia acumulada durante un gran número de años en las carreteras de la red autonómica de Castilla y León. En la presente edición se mantiene dicho catálogo, modificándose ligeramente algunas de las secciones con el objetivo de asegurar una correcta durabilidad, de acuerdo con las nuevas condiciones de contorno introducidas, como es la importante mejora en las explanadas.

Se incluyen seis tablas correspondientes a las categorías de tráfico pesado T21 a T42 (para otros tráficos, el firme se proyectará utilizando directamente la Norma 6.1 IC del Ministerio de Fomento). Los períodos de proyecto considerados son veinte años para las secciones con pavimento bituminoso y treinta años para las secciones con pavimento de hormigón.

En cada tabla, y por tanto para cada categoría de tráfico, se proponen diversas secciones según las categorías de explanada establecidas en el capítulo 5. Para las categorías de tráfico pesado T21 y T22 sólo se admiten las categorías de explanada E2 y E3.

En cada situación de tráfico pesado y de explanada las distintas secciones de firme propuestas se designan por cuatro números (por ejemplo, 321-3). Los dos primeros son indicativos de la categoría de tráfico pesado, el tercero hace referencia a la categoría de la explanada y el último es un ordinal dentro de la serie de secciones propuestas. En algunos casos, se añade a la designación de la sección una letra mayúscula (por ejemplo, 213-3A y 213-3B), para diferenciar dos posibles variantes de un mismo tipo estructural.

Las secciones propuestas en cada situación sólo se pueden considerar técnicamente equivalentes en una primera aproximación. Es misión del proyectista analizar la idoneidad de unas u otras en el caso concreto que esté estudiando, sobre todo en lo que se refiere a la disponibilidad de materiales y, en última instancia, a los costes. Éstos deben considerarse globalmente, incorporando mediante las técnicas adecuadas los costes previsibles de conservación en un período de análisis económico nunca inferior al período de proyecto más arriba señalado.

Las características de todas las unidades de obra incluidas en el catálogo son las definidas en los diversos apartados del capítulo 6 y en el anejo A2. A dichas unidades de obra hay que añadir, cuando sea necesario, los correspondientes riegos de imprimación, curado y adherencia, que no aparecen referenciados en las tablas del catálogo, pero cuya aplicación en su caso es preceptiva e inexcusable.

2 ESPESORES DE LAS CAPAS

En todos los casos, los espesores indicados (dados en cm) se deben considerar como mínimos absolutos, no debiendo por tanto reducirse en ningún punto de la sección. Los espesores totales de mezclas bituminosas (convencionales) se repartirán, salvo mejor criterio del director de las obras, de la siguiente forma:

$$20 = 6 \text{ (CR)} + 7 \text{ (CI)} + 7 \text{ (CB)}$$

$$18 = 6 \text{ (CR)} + 6 \text{ (CI)} + 6 \text{ (CB)}$$

$$16 = 5 (CR) + 5 (CI) + 6 (CB)$$

$$15 = 6 (CR) + 9 (CI)$$

$$12 = 6 (CR) + 6 (CI)$$

$$10 = 5 (CR) + 5 (CI)$$

$$8 = 4 (CR) + 4 (CI)$$

$$5 = 5 (CR)$$

siendo en las anteriores expresiones CR la capa de rodadura, CI la capa intermedia o capa inmediatamente inferior a la de rodadura y CB la capa de base o capa situada bajo otras dos capas de mezcla.

3. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

En lo que se refiere a las mezclas bituminosas en caliente, se procurará no emplear los tipos G20 y G25, sustituyéndolos respectivamente por los tipos S20 y S25. En caso de emplear aquéllos, no se bajará en ningún caso de un contenido de betún del 4 % sobre la masa seca de los áridos.

Si se apoyan sobre capas granulares y siempre que el espesor total de mezclas bituminosas sea inferior a 10 cm, éstas serán mezclas en frío, que al tener mayor flexibilidad aseguran un mejor comportamiento mecánico. Sin embargo, si el proyectista justifica la conveniencia de disponer una mezcla bituminosa en caliente, se estudiará una fórmula de trabajo que garantice una flexibilidad especialmente elevada (el contenido de betún no bajará del 5,0 % sobre la masa seca de los áridos).

4. CARACTERÍSTICAS DE LOS PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

En relación con los espesores indicados para los pavimentos de hormigón vibrado en masa, se construirán esos espesores siempre que el hormigón sea del tipo HP-4,5 para unas categorías de tráfico pesado T21 y T22, o del tipo HP-4,0 para unas categorías de tráfico pesado T31 a T42. Los espesores indicados en las correspondientes tablas se aumentarán en dos centímetros (2 cm) si el hormigón fuese del tipo HP-4,0 para unas categorías de tráfico pesado T21 y T22, o del tipo HP-3,5 para unas categorías de tráfico pesado T31 a T42.

5. PREFISURACIÓN

Para las categorías de tráfico pesado T21 y T22 y si el espesor de suelocemento es de 35 cm, es preceptiva la prefisuración del suelocemento (sólo en la capa superior si ese espesor se extiende en dos capas). Para esas mismas categorías de tráfico pesado, pero con otros espesores del suelocemento, el proyectista analizará la conveniencia o no de proceder a la prefisuración.

Las capas de hormigón compactado y de gravacemento (salvo si éstas se colocan bajo un pavimento de hormigón) se han de prefisurar siempre.

El proyectista debe fijar la distancia de prefisuración, que estará entre 3 y 4 m.

6. ARCENES

Los arcenes que tengan una anchura inferior a 1,25 m deben tener la misma sección estructural que la calzada adyacente y su construcción debe ser simultánea.

En arcenes de anchura superior a 1,25 m se cumplirán las prescripciones siguientes:

6.1 Categorías de tráfico pesado T21 a T32

Si en la calzada hay un pavimento de hormigón vibrado, se dispondrá en el arcén una capa de rodadura de mezcla bituminosa en caliente muy flexible de 5 cm de espesor; el resto, hasta llegar a la explanada, se completará con una zahorra artificial drenante. Alternativamente, se podrá colocar bajo la mezcla bituminosa en caliente una capa de suelocemento con un espesor entre 20 y 35 cm; el resto, hasta llegar a la explanada, se completará, si es necesario, con una zahorra artificial drenante.

Si en la calzada hay un pavimento de mezcla bituminosa, el pavimento del arcén constará de una capa de mezcla bituminosa con el mismo espesor que la capa de rodadura del firme de la calzada (salvo si ésta fuera drenante o discontinua en caliente, en cuyo caso el pavimento del arcén tendrá las mismas capas de rodadura e intermedia que el firme de la calzada, de forma que vayan enrasadas las capas intermedias). Debajo del pavimento del arcén se dispondrá una zahorra artificial hasta alcanzar la explanada; alternativamente, se podrá disponer bajo el pavimento una capa de suelocemento, con un espesor entre 20 y 35 cm, y el resto, hasta llegar a la explanada, se completará, en la medida de lo necesario, con una zahorra o con un suelo seleccionado.

6.2 Categorías de tráfico pesado T41 y T42

El arcén, enrasado siempre con la calzada, tendrá un pavimento constituido por un riego con gravilla, o por una mezcla bituminosa en frío (o en caliente muy flexible) de 5 cm de espesor. El resto del firme del arcén estará constituido por una zahorra artificial (en un espesor no inferior a 20 cm, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada), completada hasta la explanada, en la medida de lo necesario, por una zahorra o por un suelo seleccionado.

7. BERMAS

El proyectista considerará la posibilidad de mantener la capa de base en todo el ancho de la berma siempre que las condiciones constructivas lo aconsejen.

TABLA 7.1 Secciones de nueva construcción para tráfico T21 (espesores en cm)

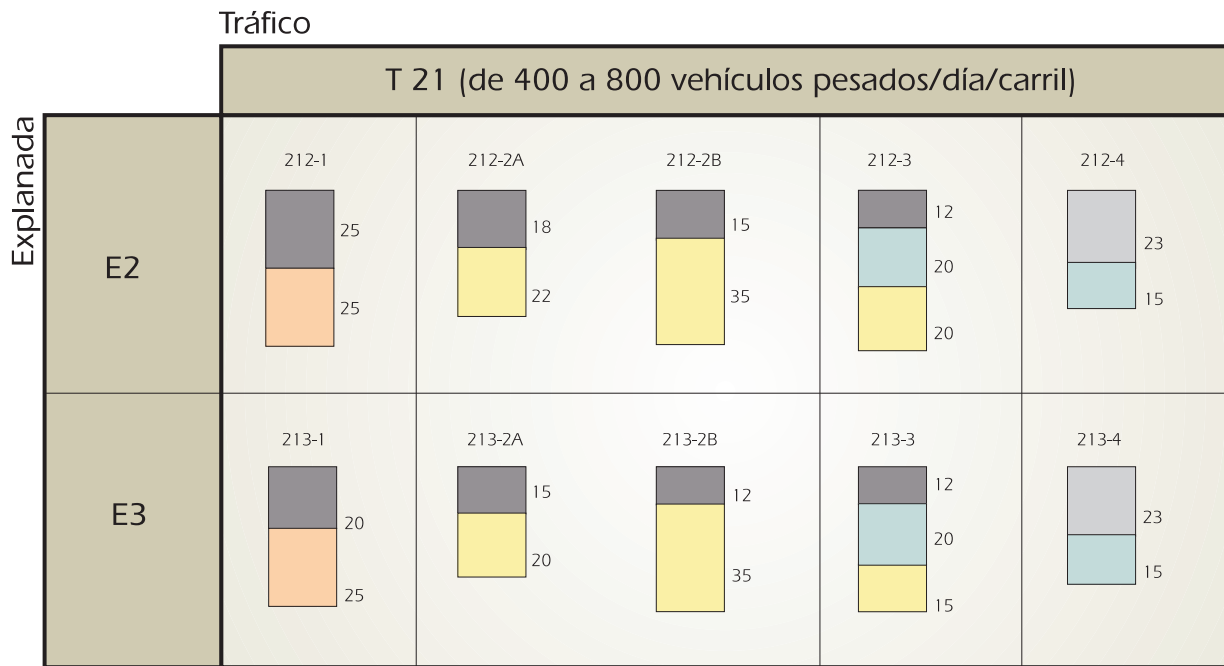


TABLA 7.2 Secciones de nueva construcción para tráfico T22 (espesores en cm)

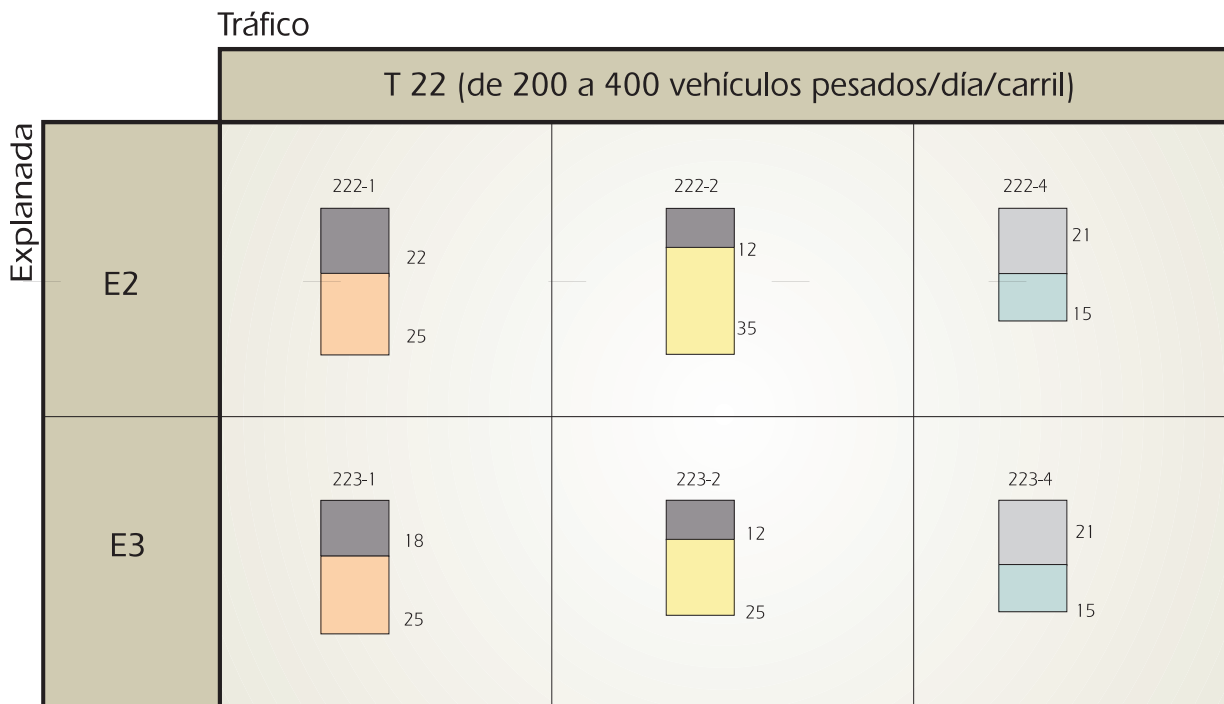


TABLA 7.3 Secciones de nueva construcción para tráfico T31 (espesores en cm)

Tráfico

T 31 (de 100 a 200 vehículos pesados/día/carril)

Explanada	E1						
	E2						
	E3						

TABLA 7.4 Secciones de nueva construcción para tráfico T32 (espesores en cm)

Tráfico

T 32 (de 50 a 100 vehículos pesados/día/carril)

Explanada	E1						
	E2						
	E3						

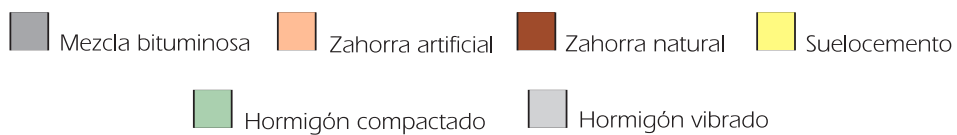


TABLA 7.5 Secciones de nueva construcción para tráfico T41 (espesores en cm)

Tráfico

T 41 (de 25 a 50 vehículos pesados/día/carril)

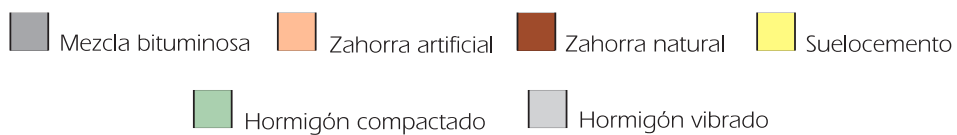
Explanada	E1	<p>411-1A 10 20 25</p>	<p>411-1B 10 40</p>	<p>411-2 8 30</p>	<p>411-3 5 18 15</p>	<p>411-4 20 20</p>
		E2	<p>412-1 10 30</p>	<p>412-2 8 25</p>	<p>412-3 5 18 20</p>	<p>412-4 20</p>
			E3	<p>413-1 10 20</p>	<p>413-2 8 20</p>	<p>413-3 5 18</p>

TABLA 7.6 Secciones de nueva construcción para tráfico T42 (espesores en cm)

Tráfico

T 42 (de 0 a 25 vehículos pesados/día/carril)

Explanada	E1	<p>421-1A 5 20 25</p>	<p>421-1B 5 40</p>	<p>421-2 5 25</p>	<p>421-3 5 16 20</p>	<p>421-4 18 20</p>
		E2	<p>422-1 5 25</p>	<p>422-2 5 22</p>	<p>422-3 5 16</p>	<p>422-4 18</p>
			E3	<p>423-1 5 20</p>	<p>423-2 5 18</p>	<p>423-3 5 16</p>



Capítulo 8



Rehabilitaciones superficiales y estructurales

En este capítulo se incluye un catálogo de secciones para la rehabilitación de firmes existentes, el cual se centra en las soluciones de refuerzo con mezcla bituminosa. Se presentan dos tablas (8.1 y 8.2), diferenciándose entre firmes flexibles y semiflexibles por un lado y firmes semirrígidos por otro, en las que se proponen soluciones para las categorías de tráfico pesado establecidas en el capítulo 4. Para cualquier categoría superior a las indicadas expresamente en esas tablas se deberá aplicar la Norma 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes, del Ministerio de Fomento.

Para cada categoría de tráfico pesado se define el espesor de refuerzo con mezcla bituminosa según el valor de la deflexión de cálculo (d_c). Si este valor es inferior a uno establecido (según la categoría de tráfico pesado y el tipo de firme), se considera que sólo es necesaria una **actuación preventiva** (renovación superficial).

Si la deflexión de cálculo supera el valor 200 (150 en el caso de la categoría de tráfico pesado T21), se considera que el firme se encuentra próximo al final de su vida útil, y es necesaria una recuperación total de sus características estructurales, que se deberán definir mediante un **estudio especial**.

Para esta situación se incluye como opción prioritaria la tabla 8.3, en la que, para cada categoría de tráfico pesado, se definen los espesores de las secciones de firme reciclado con cemento. Una alternativa, que en su caso debe ser convenientemente justificada, es utilizar las secciones de firme de nueva construcción incluidas en el capítulo 7, considerando el firme existente como una explanada de categoría E3 (previamente escarificado si el refuerzo incluye una capa granular). Cualquier otra eventual solución de rehabilitación que se pudiera utilizar, deberá ser también convenientemente justificada por el proyectista.

En principio, todas las secciones propuestas lo son para períodos de proyecto de 20 años. Este período de proyecto será el utilizado en cualquier caso si la operación de refuerzo se realiza junto al ensanche de la calzada existente. En el caso de que por razones técnicas o económicas (que habría que justificar suficientemente) se considerase oportuno adoptar un período de proyecto de tan sólo 10 años se utilizarán las mismas tablas, pero con la categoría de tráfico inmediatamente inferior a la obtenida según lo expuesto en el capítulo 4. Además, si se da el caso particular de que los vehículos pesados que circulan por el tramo están claramente sobrecargados, se considerará la posible adopción de una categoría de tráfico superior a la inicialmente estimada.

A los efectos del proyecto de una renovación superficial o de un refuerzo (por tanto, a los efectos de este capítulo exclusivamente), se distinguen los siguientes tipos de firme:

- Firmes flexibles: formados sólo por capas granulares y por un tratamiento superficial, o bien por capas granulares y por mezclas bituminosas, con un espesor total de éstas igual o inferior a 12 cm.
- Firmes semiflexibles: formados sólo por capas granulares y mezclas bituminosas, con un espesor total de éstas superior a 12 cm.
- Firmes semirrígidos: los que tienen una o más capas inferiores tratadas con cemento y un pavimento bituminoso, siempre que aquéllas sigan resistiendo por flexión, lo que se puede considerar que no ocurre cuando un avanzado grado de deterioro (agrietamiento

generalizado, con ascensión de finos a la superficie) las ha convertido prácticamente en capas granulares.

- Firmes rígidos: los que tienen un pavimento de hormigón.

Las soluciones de refuerzo incluidas en este capítulo se refieren exclusivamente a firmes flexibles, semiflexibles y semirrígidos, en los cuales su estado estructural puede ser adecuadamente caracterizado mediante la medición de deflexiones. En todos los casos, los espesores indicados (cm) se deben considerar como mínimos absolutos, no debiendo por tanto bajarse de ellos en ningún punto de la sección. No incluyen los espesores de eventuales capas de regularización (sólo podrá descontarse del espesor de refuerzo el espesor mínimo de la capa de regularización si ésta se hace con mezcla bituminosa y dicho espesor mínimo es superior a los 5 cm).

Por otro lado, deberá analizarse siempre la conveniencia de fresar el firme existente en un cierto espesor si su superficie aparece muy agrietada. Con carácter general, se recomienda el fresado de la capa de rodadura, siempre que se encuentre muy agrietada, antes de proceder a la ejecución de un refuerzo.

Los espesores totales de mezclas bituminosas (convencionales) se repartirán, salvo mejor criterio del Director de las obras, de la siguiente forma:

$$18 = 6 \text{ (CR)} + 6 \text{ (CI)} + 6 \text{ (CB)}$$

$$15 = 6 \text{ (CR)} + 9 \text{ (CI)}$$

$$12 = 6 \text{ (CR)} + 6 \text{ (CI)}$$

$$10 = 5 \text{ (CR)} + 5 \text{ (CI)}$$

$$8 = 4 \text{ (CR)} + 4 \text{ (CI)}$$

$$6 = 6 \text{ (CR)}$$

$$5 = 5 \text{ (CR)}$$

siendo en las anteriores expresiones CR la capa de rodadura, CI la capa intermedia o capa inmediatamente inferior a la de rodadura y CB la capa de base o capa situada bajo otras dos capas de mezcla.

Entre las diferentes capas nuevas de mezcla, y entre la inferior de ellas y el pavimento bituminoso antiguo, se dispondrá un riego de adherencia, con una emulsión especialmente estudiada para asegurar la adherencia entre capas y evitar que se pegue a los neumáticos de los vehículos de obra. Previamente a su ejecución, se realizará una enérgica limpieza de la capa sobre la que se aplicará, retirando todo tipo de suciedad, polvo o material suelto. En las intersecciones con grandes superficies pintadas, se procederá previamente al microfresado de estas zonas, para asegurar una correcta adherencia.

En lo que se refiere a las mezclas bituminosas en caliente se procurará no emplear los tipos G20 y G25, sustituyéndolos respectivamente por los tipos S20 y S25. En caso de emplear aquéllos no se bajará en ningún caso de un contenido de betún del 4% sobre la masa seca de los áridos.

En el caso de las categorías de tráfico pesado T41 y T42, si por la necesidad de mejorar la rasante se requiera colocar un espesor de firme superior al indicado en la tabla 8.1, o si por cualquier otra circunstancia se desea realizar un refuerzo con zorra artificial, se podrá

justificadamente disponer en lugar de 8 cm de refuerzo de mezcla bituminosa, una capa de 5 cm sobre al menos 20 cm de zahorra artificial. De manera similar, en dichos casos se podrá disponer, en lugar de 10 cm de mezcla bituminosa en caliente, 5 cm de dicha mezcla bituminosa sobre al menos 30 cm de zahorra artificial.

Si se ha considerado la necesidad de actuar sobre el firme existente y no se alcanzan los niveles mínimos de deflexión de cálculo señalados en cada caso, se procederá a una renovación superficial mediante el empleo, según corresponda, de riegos con gravilla, lechadas bituminosas o mezclas bituminosas con un espesor no superior a 4 cm. En caso de ser esta última la solución de renovación superficial adoptada, se analizará cuál puede ser el tipo de mezcla más idóneo, así como su formulación, la cual debe estar especialmente adaptada al espesor y a la naturaleza del firme existente. En todo caso, en la totalidad de la longitud tratada las características de la capa de rodadura serán uniformes.

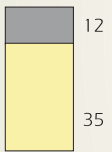
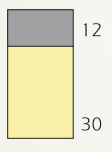
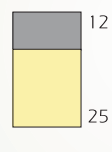
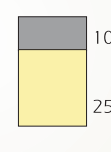
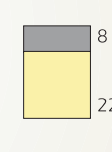
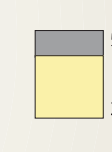
TABLA 8.1 Secciones de refuerzo con mezcla bituminosa sobre firmes flexibles y semiflexibles (espesores mínimos en cm)

Deflexión de cálculo (d _c) (10 ² mm)	Categoría de tráfico pesado										
	T21	T22	T31	T32	T41	T42					
< 60	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA										
60-80							10	8	6		
80-100							12	10	8	5	
100-125	15	12	10	8	6	5					
125-150	18	15	12	10	8	6					
150-200		18	15	12	10	8					
>200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL										

TABLA 8.2 Secciones de refuerzo con mezcla bituminosa sobre firmes semirrígidos (espesores mínimos en cm)

Deflexión de cálculo (d _c) (10 ² mm)	Categoría de tráfico pesado										
	T21	T22	T31	T32	T41	T42					
< 40	ZONA DE ACTUACIÓN PREVENTIVA										
40-50							10				
50-80							12	10	8	6	
80-125	15	12	10	8	6	5					
125-150	18	15	12	10	8	6					
150-200		18	15	12	10	8					
>200	ZONA DE ESTUDIO ESPECIAL										

TABLA 8.3 Secciones de firme reciclado con cemento (espesores mínimos en cm)

T 21	T 22	T 31	T 32	T 41	T 42
					

 Mezcla bituminosa en caliente (recrecimiento)
  Reciclado in situ con cemento

Capítulo 9

Ensanches



1. RECOMENDACIONES GENERALES

El acondicionamiento o mejora de la plataforma requiere en general el ensanche de la calzada o de los arcenes, así como correcciones en el trazado y, en la mayoría de los casos, la rehabilitación del firme. En consecuencia, el proyecto del firme del ensanche se presenta a menudo asociado al proyecto de la rehabilitación, siendo la compatibilidad de ambas soluciones uno de los aspectos fundamentales que hay que considerar.

En cada caso debe analizarse la posibilidad de efectuar el ensanche por una sola margen o por ambas, debiendo valorarse entre otros los siguientes aspectos:

- Para anchuras de la caja del ensanche inferiores a 2,5 m resulta difícil la utilización de equipos de compactación pesados.
- El ensanche por una sola margen comporta el desplazamiento del eje de la carretera, lo que conduce a unas cuñas importantes de regularización y a un sobreespesor del eventual refuerzo en una de las semicalzadas.
- El ensanche por las dos márgenes proporciona la posibilidad de mejorar el drenaje de ambas.
- La solución adoptada tiene implicaciones en la gestión de las expropiaciones.
- Existencia de líneas telegráficas, telefónicas, etc.
- Existencia de arbolado; en relación con este punto se ha de prestar especial atención al tamaño y características de la zona despejada.

Para un adecuado diseño de los ensanches han de conocerse las características geotécnicas del terreno. Para ello se deben abrir las calicatas necesarias después de establecer la tramificación que se derive de la información geológica y geotécnica y de la inspección visual.

En los ensanches deben proyectarse secciones nuevas que sean constructivamente compatibles con el eventual refuerzo necesario. Suele ser conveniente enrasar la base o la subbase del ensanche con la capa superior del firme antiguo y extender en toda la anchura el refuerzo requerido.

Debe prestarse especial atención a los escalones laterales, que en todo caso han de estar convenientemente señalizados y balizados y, en la medida de lo posible, ser eliminados por la noche, puesto que constituyen un grave peligro.

En general, siempre es recomendable intentar alcanzar la mayor categoría de explanada que sea posible, dado que con ello se puede reducir la profundidad de la caja del ensanche; así se reducen los riesgos de accidente y de que se vea afectada la estabilidad del firme de la calzada existente. Por eso mismo, esta eventual mejora de la explanada conviene realizarla preferentemente mediante la estabilización del suelo, antes que recurrir a su extracción y a su sustitución.

Por otro lado, para reducir el riesgo de aparición de fisuras longitudinales por el asiento diferencial del ensanche, éste ha de tener un cimiento con una capacidad de soporte igual o superior a la del firme antiguo; así mismo, el firme del ensanche debe tener una rigidez igual o superior a la del firme del resto de la plataforma. A tal efecto, ha de prestarse especial atención a la compactación del ensanche, por lo que no se deben ejecutar cuñas en las que no sea posible emplear equipos de compactación pesados. Se recomienda igualmente evitar anchuras menores de 2,5 m en la caja del ensanche.

Conviene favorecer al máximo el drenaje de la plataforma, por lo que si existen capas drenantes ha de dárseles continuidad en los ensanches. Conviene recordar al respecto que sólo tienen un verdadero carácter drenante las capas en las que prácticamente no existan partículas de tamaño inferior a 1 mm.

Por lo que se refiere a los arcenes, los que tengan una anchura inferior a 1,25 m han de tener la misma sección estructural que la calzada adyacente y su ejecución debe ser simultánea. En arcenes de anchura superior a 1,25 m, si no se prevé una futura ampliación de la calzada a medio plazo, el firme se proyectará de acuerdo con lo indicado en el capítulo 7.

Como conclusión puede señalarse que ha de prestarse especial atención a la adecuada resolución en la fase de proyecto de los problemas constructivos que pudieran derivarse de la ejecución del ensanche y del eventual refuerzo del firme, así como del mantenimiento de la circulación sin riesgo de accidentes.

2. SECCIONES DE FIRME PARA ENSANCHES DE CALZADA

Se empleará el mismo catálogo de secciones que el establecido para carreteras de nueva construcción (capítulo 7), suprimiéndose con carácter general el empleo de secciones con hormigón compactado (terminadas en 3) y hormigón vibrado (terminadas en 4).

Sin embargo, si el pavimento que se va a ensanchar es rígido o de una anchura reducida (lo que puede ocurrir por ejemplo en travesías) es probable que la única solución ejecutable con ciertas garantías constructivas sea disponer una base de hormigón vibrado (HP-4,5 para tráfico T21 y T22, y HP-4,0 para tráfico T31 a T42). En este último caso de ensanche de reducida dimensión (lo que dificulta la colocación del material por compactación), se dispondrán los espesores indicados en las secciones acabadas en 3, pero sustituyendo el hormigón compactado por hormigón vibrado.

Además, se podrán justificar otras opciones en las secciones de firme para ensanche de calzada siempre que estén coordinadas constructivamente con el espesor de mezcla bituminosa necesario en el eventual refuerzo del resto de la calzada.

Anejo 1 | Normativa de referencia



1. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3): La última edición refundida fue aprobada por O.M. de 6 de febrero de 1976 (BOE de 7 de julio) y las posteriores modificaciones han sido aprobadas definitivamente por Orden Ministerial (O.M.) o provisionalmente por Orden Circular (O.C.) de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento:

- O.M. de 27 de diciembre de 1999 (BOE del 22 de enero de 2000) que aprueba los artículos 200 (Cales para estabilización de suelos), 202 (Cementos), 211 (Betunes asfálticos), 212 (Betunes fluidificados), 213 (Emulsiones bituminosas), 214 (Betunes fluxados), 215 (Betunes asfálticos modificados con polímeros) y 216 (Emulsiones bituminosas modificadas con polímeros).
- O.M. 475/2002, de 13 de febrero (BOE del 6 de marzo de 2002) que aprueba, entre otros, los artículos 281 (Aditivos a emplear en morteros y hormigones), 283 (Adiciones a emplear en hormigones) y 285 (Productos filmógenos de curado)
- O.M. 1382/2002, de 16 de mayo (BOE del 11 de junio de 2002) que aprueba, entre otros, los artículos 290 (Geotextiles), 300 (Desbroce del terreno), 301 (Demoliciones), 302 (Escarificación y compactación), 303 (Escarificación y compactación del firme existente), 304 (Prueba con supercompactador), 320 (Excavación de la explanación y préstamos), 321 (Excavación en zanjas y pozos), 322 (Excavación especial de taludes en roca), 330 (Terraplenes), 331 (Pedraplenes), 332 (Rellenos localizados), 333 (Rellenos todo-uno), 340 (Terminación y refino de la explanada), 341 (Refino de taludes) y 422 (Geotextiles como elemento de separación y filtro).
- O.C. 297/88 T, de 29 de marzo de 1988, que modifica el artículo 533 (Tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla).
- O.C. 5/2001, de 15 de junio de 2001, que modifica los artículos 530 (Riegos de imprimación), 531 (Riegos de adherencia), 532 (Riegos de curado), 540 (Lechadas bituminosas), 542 (Mezclas bituminosas en caliente), 543 (Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura) y 550 (Pavimentos de hormigón vibrado).
- O.C. 5 bis/2002, de 31 de octubre de 2002, sobre las condiciones para la adición de polvo de neumáticos usados en las mezclas bituminosas.
- O.C. 10/2002, de 30 de septiembre de 2002, que modifica los artículos 510 (Zahorras), 512 (Suelos estabilizados in situ), 513 (Materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento) y 551 (Hormigón magro vibrado).
- O.C. 10 bis/2002, de 27 de noviembre de 2002, por la que se modifican parcialmente determinadas referencias al ensayo de azul de metileno en las O.C. 5/2001 y 10/2002.
- Las O.M. u O.C. que relativas al PPTG pudieran estar en vigor en el momento de la redacción del proyecto.

2. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4): La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento ha aprobado provisionalmente las siguientes disposiciones:

- O.C. 8/2001, de 28 de diciembre de 2001, que aprueba los artículos 20 (Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas), 21 (Reciclado in situ con cemento de capas de firme) y 22 (Reciclado en central en caliente de capas bituminosas).

3. Instrucción para la Recepción de Cementos RC-03, aprobada por Real Decreto 1797/2003, de 26 de diciembre (BOE del 16 de enero de 2004).

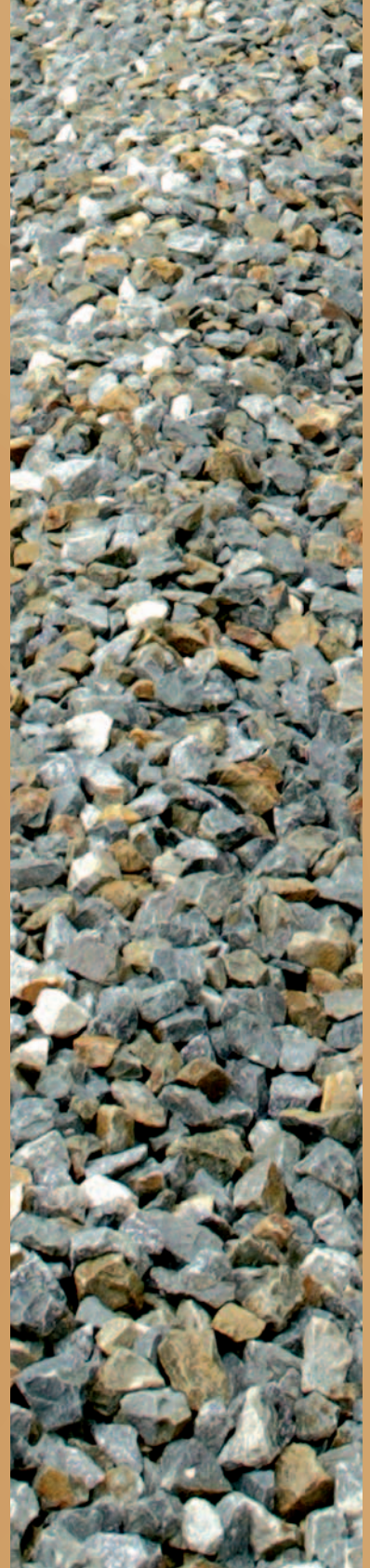
4. Normas UNE-EN y normas UNE (y en su caso normas de ensayo NLT que contemplen procedimientos no recogidos en las anteriores) que se refieran al ensayo de los materiales empleados en la construcción de firmes y pavimentos.

5. Norma 6.1 IC, Secciones de firme, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, aprobada por Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre de 2003 (BOE del 12 de diciembre).

6. Norma 6.3 IC, Rehabilitación de firmes, de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, aprobada por Orden FOM/3459/2003, de 28 de noviembre de 2003 (BOE del 12 de diciembre).

Anejo 2

Características mecánicas de los materiales



A los efectos de un eventual dimensionamiento de las secciones mediante métodos analíticos, las características mecánicas de los materiales utilizados en el catálogo de secciones de firme, y de otros posibles materiales alternativos, quedan recogidas en la siguiente tabla:

Material		E (MPa)	Coefficiente de Poisson	Ley de fatiga
Mezcla bituminosa en caliente	Tipos D y S	de 6.000 a 7.000	0,33	$\epsilon_r = 6,925 \times 10^{-3} \times N^{0,27243}$
	Tipo G	de 4.000 a 5.000	0,33	
Mezclas bituminosas discontinuas en capas de pequeño espesor (F y M)		de 3.000 a 4.000	0,35	(*)
Mezcla bituminosa drenante (PA)		3.000	0,35	(*)
Mezcla bituminosa abierta en frío (AF)		de 1.500 a 3.000	0,35	(**)
Mezcla bituminosa de alto módulo (MAM)		11.000	0,30	$\epsilon_r = 6,617 \times 10^{-3} \times N^{0,27243}$
Suelocemento		de 4.000 a 8.000	0,25	$\delta_r = R_f \times (1 - 1/12 \times \text{Log } N)$
Gravacemento		de 17.000 a 30.000	0,25	$\delta_r = R_f \times (1 - 1/15 \times \text{Log } N)$
Hormigón compactado		de 30.000 a 40.000	0,20	$\delta_r = R_f \times (1 - K \times \text{Log } N)$
Gravaemulsión		de 3.000 a 4.000	0,35	(**)
Zahorra artificial		2 a 3 x $E_{inf} < 600$	0,35	$\epsilon_z = 2,16 \times 10^{-2} \times N^{0,28}$ $\delta_r \leq (\delta_z + 2,2 \times 10^{-3} \times h)$
Zahorra natural		1,5 a 2 x $E_{inf} < 500$	0,40	$\epsilon_z = 2,1 \times 10^{-2} \times N^{0,24}$ $\delta_r \leq (\delta_z + 2,2 \times 10^{-3} \times h)$
Suelo estabilizado in situ S-EST3		de 1.000 a 3.000	0,25	$\delta_r = R_f \times (1 - 1/12 \times \text{Log } N)$
Suelo estabilizado in situ S-EST2		de 200 a 600	0,35	
Suelo estabilizado in situ S-EST1		de 100 a 300	0,35	
Suelo natural		10 x CBR < 250	0,35-0,45	$\epsilon_z = 2,1 \times 10^{-2} \times N^{0,24}$
Macizo semiindefinido con explanada E3		200 - 250	0,30	
Macizo semiindefinido con explanada E2		80 - 100	0,40	
Macizo semiindefinido con explanada E1		40 - 50	0,40	

E_{inf} = módulo capa inferior

δ_r = tensión radial de tracción en MPa

N = número de ejes equivalentes de 128 kN (13 t)

R_f = resistencia a flexotracción del material en MPa

ϵ = deformación unitaria (ϵ_r = radial de tracción, y ϵ_z = vertical de compresión).

h = espesor en cm de firme situado encima de la capa

(*) Dados los espesores habituales y las características mecánicas de estos materiales, su eventual agotamiento por fatiga no es crítico en el dimensionamiento, siempre que se garantice una correcta adherencia con la capa subyacente.

(**) En estos materiales no tiene sentido considerar el fenómeno de la fatiga, dada su estructura, la cual permite procesos de regeneración cuando suben las temperaturas. En firmes con capas de esta naturaleza, el dimensionamiento viene condicionado por las deformaciones verticales de compresión que se producen en la capa subyacente.

Anejo 3



Determinación del plazo de trabajabilidad de los materiales tratados con cemento

1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este anejo es definir un procedimiento de compactación diferida para determinar el plazo de trabajabilidad de un material tratado con cemento.

2. DEFINICIONES, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Se define como plazo de trabajabilidad del material tratado con cemento el tiempo transcurrido, desde el final de la mezcla del material con el cemento y el agua, durante el cual el fraguado del conglomerante todavía no ha comenzado o es muy reducido, de forma que es posible compactarlo sin riesgo de que se produzca posteriormente una merma apreciable de sus propiedades mecánicas.

En el método que se presenta se utilizan las siguientes abreviaturas:

- MTC:** material tratado con cemento
- θ :** temperatura ambiente del laboratorio en °C, la cual debe medirse a menos de 50 cm de la probeta a ensayar
- t:** tiempo transcurrido desde el final de la mezcla (horas y minutos)
- $\rho(t)$:** densidad seca aparente del MTC compactado en el instante t, (kg/m³)
- T_m:** plazo de trabajabilidad, determinado mediante el ensayo de compactación diferida (horas y minutos)
- M_p:** masa de la probeta (molde mas material compactado)
- M_m:** masa del molde
- V:** volumen del molde
- h:** humedad de la probeta (según NLT-102)

3. MÉTODO DE ENSAYO

3.1. Principio

El ensayo consiste en compactar después de transcurrir tiempos crecientes t desde la realización de la mezcla, diferentes muestras de MTC, tomadas de la misma amasada, mediante el método Proctor modificado definido en la Norma UNE 103501, o bien mediante el de la NLT-310.

El plazo de trabajabilidad T_m del MTC es el tiempo t al que corresponde una reducción del dos por ciento (2%) de la densidad seca aparente obtenida en el instante t = 0, es decir, efectuando la compactación nada más completarse el amasado del material.

3.2. Equipo para la compactación de las muestras

El equipo para la compactación de las muestras es el mismo empleado en el ensayo Proctor modificado, de acuerdo con la UNE 103501, o bien un martillo vibrador cuyas características deberán ser conformes a lo indicado en la NLT-310.

3.3. Preparación de las muestras

La masa para realizar los ensayos de compactación se preparará a partir de muestras representativas del suelo, de los áridos combinados o del material procedente de fresado, las cuales

deberán ser procesadas de forma que su granulometría sea lo más parecida posible a la que se vaya a obtener en obra. La cantidad a preparar será del orden de ochenta kilogramos (80 kg).

La muestra procesada se mezclará con las proporciones previstas de cemento, de agua y, en su caso, de aditivos y de materiales granulares de aportación, hasta adquirir un color uniforme.

De la mezcla así obtenida se separarán mediante tamizado las partículas de tamaño superior a veinte milímetros (20 mm) y se obtendrán mediante cuarteo cinco (5) muestras aproximadamente iguales. Cuatro de ellas se almacenarán en bolsas cerradas y estancas a una temperatura θ , con un intervalo de variación no superior a uno coma cinco grados Celsius ($\pm 1,5$ °C). Esta temperatura θ será la temperatura media ambiente prevista en la obra entre las doce (12) y las quince (15) horas.

3.4. Método de ensayo

La primera muestra se compactará lo más rápidamente posible, mediante el método descrito en la Norma UNE 103501 o bien mediante el de la NLT 310. Las restantes se compactarán a intervalos crecientes t de acuerdo con el valor estimado de T_m . A título indicativo pueden adoptarse los valores en horas que se indican a continuación:

T_m estimado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Corto (< 5 horas)	0	1	3	5	7
Medio (5 a 12 horas)	0	2	4	7	16
Largo (> 12 horas)	0	4	7	16	24

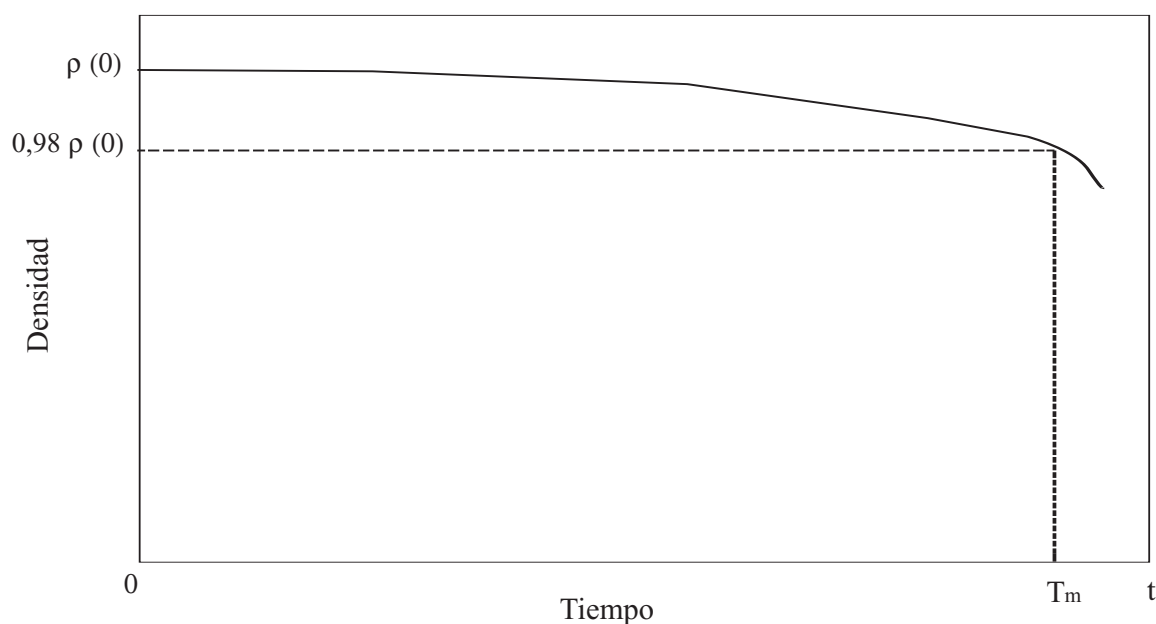
En cada uno de los instantes t se realizarán dos (2) ensayos de compactación. Si las densidades secas obtenidas en cada uno de ellos según la Norma UNE 103501, o bien según la NLT 310, no difieren en más de un uno por ciento (1%), se adoptará como resultado la media de los dos valores. Cuando dicha variación sea superior, se llevará a cabo un nuevo ensayo de compactación en el mismo plazo t , adoptándose entonces la media de los dos valores más próximos.

La densidad seca de cada muestra se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho(t) = \left(\frac{M_p - M_m}{V} \right) \times \left(\frac{100}{100 + h} \right)$$

3.5. Cálculo y expresión de los resultados

Con los resultados de los ensayos de compactación diferida se dibujará la curva de variación de la densidad en el tiempo, tal y como se indica en la figura adjunta. El valor $\rho(0)$ obtenido en el ensayo llevado a cabo inmediatamente después de realizada la mezcla se adoptará como densidad de referencia.



El plazo de trabajabilidad T_m del MTC es el tiempo t al que corresponde una densidad seca aparente $\rho(t)$ igual al noventa y ocho por ciento (98%) de la densidad de referencia $\rho(0)$.

3.6. Presentación de los resultados

El informe de los resultados deberá hacer referencia a que el ensayo se ha realizado de acuerdo con este método e incluirá:

- la identificación del MTC estudiado
- la curva de variación de la densidad seca con el tiempo
- la temperatura θ en las proximidades de las muestras (valor medio y variaciones máximas)
- el valor en horas y minutos del plazo de trabajabilidad T_m
- detalles del método seguido y no recogidos expresamente en este anejo
- incidencias que puedan haber influido en los resultados, en caso de que se hayan producido.

