

# ANEJO N° 10. FIRMES Y PAVIMENTOS

**ÍNDICE**

<b>10. ANEJO Nº 10. FIRMES Y PAVIMENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>10.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>10.2. NORMATIVA Y DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA .....</b>	<b>3</b>
<b>10.3. CRITERIOS DE DISEÑO.....</b>	<b>4</b>
10.3.1. CATEGORÍA DE EXPLANADA.....	4
10.3.2. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA.....	4
10.3.2.1. Desmontes o excavaciones .....	4
10.3.2.2. Rellenos .....	5
10.3.2.3. Formación de la explanada .....	5
10.3.3. SOLICITACIONES DEL TRÁFICO .....	5
10.3.4. CONDICIONANTES CLIMÁTICOS .....	6
<b>10.4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....</b>	<b>7</b>
10.4.1. ALTERNATIVAS CONSIDERADAS .....	7
10.4.2. COMPARATIVA ECONÓMICA.....	7
10.4.2.1. Costes de construcción .....	7
10.4.2.2. Costes de conservación.....	8
10.4.2.3. Costes totales.....	9
10.4.3. COMPARATIVA TÉCNICA .....	10
<b>10.5. INCORPORACIÓN DE BETUNES CON CAUCHO .....</b>	<b>11</b>
<b>10.6. SECCIÓN DE FIRME PROYECTADA.....</b>	<b>12</b>
10.6.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN .....	12
10.6.2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.....	12
10.6.2.1. Sección de firme en plataforma.....	12
10.6.2.2. Sección de firme en estructuras .....	12
10.6.2.3. Sección de firme en reposición de caminos.....	12
10.6.2.4. Dotaciones proyectadas.....	13
10.6.2.5. Sección de firme en Avda. de Plasencia .....	14
10.6.2.6. Alcance de las soluciones adoptadas .....	14

## 10. ANEJO Nº 10. FIRMES Y PAVIMENTOS

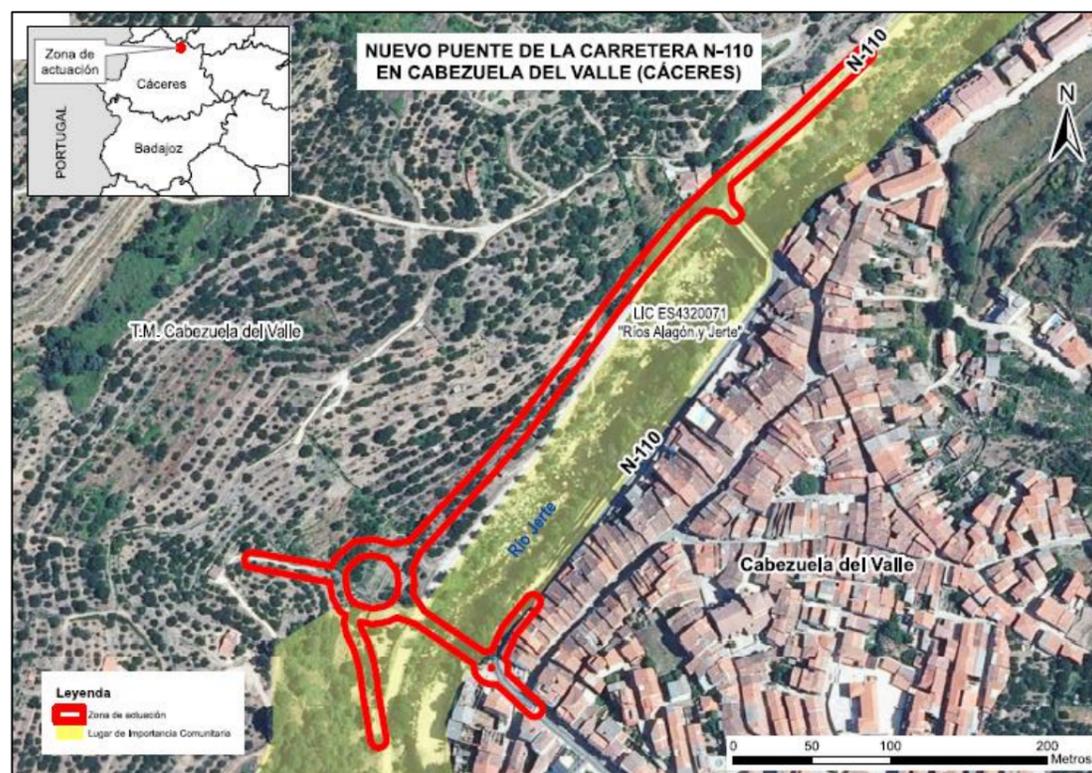
### 10.1. INTRODUCCIÓN

El presente Anejo tiene por objeto la definición de las estructuras de firme a construir en la carretera N-110 en unos 500 m en las actuaciones de adecuación.

El objeto del proyecto es resolver los problemas de seguridad viaria para vehículos pesados por el estrecho puente de la N-110 sobre el río Jerte a su paso por Cabezuela del Valle. En la actualidad el tráfico en este puente histórico es alternativo en cada sentido regulado por semáforos, uno a cada lado del río.

Las actuaciones previstas incluyen la construcción de un nuevo puente sobre el río Jerte en Cabezuela del Valle que pueda soportar simultáneamente el tráfico en ambos sentidos de la carretera N-110. Esta nueva estructura se va a ubicar en conexión directa con la actual travesía urbana de Cabezuela del Valle, en la calle Plasencia. Tras el nuevo puente, se dará continuidad a la carretera N-110 en unos 500 m de longitud, por la margen derecha del río, hasta conectar con el trazado de la carretera N-110 en el puente existente.

**Figura 1. Emplazamiento del proyecto**



El proyecto comienza pasado el P.K. 371+000 de la carretera N-110, discurriendo en dirección suroeste hasta una nueva glorieta, por donde se accede al nuevo puente sobre el río Jerte, que tiene una longitud de 68 metros.

Tratándose de una mejora local, el nuevo tramo de carretera a diseñar debe tener unas características similares a las de la carretera N-110.

### 10.2. NORMATIVA Y DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA

El diseño de los firmes y pavimentos de este proyecto se ha realizado observando los criterios y recomendaciones contenidas en la siguiente documentación de referencia, listada por orden cronológico:

- Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006.
- Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2002.
- Norma 6.1-IC “Secciones de Firme” de la Instrucción de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2003.
- Nota de Servicio 5/2006 sobre explicaciones y capas de firme tratadas con cemento. Dirección General de Carreteras.
- Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. CEDEX, 2007.
- Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). Dirección General de Carreteras.
- Orden FOM/3317/2010, de Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento.
- IAP-11, Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Dirección General de Carreteras, 2012.
- Nota de Servicio 8/2014, de recomendaciones para la redacción de los Proyectos de Trazado de carreteras. Ministerio de Fomento.
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Modificaciones realizadas por Orden FOM 2523/2014 y Orden FOM 510/2018. Ministerio de Fomento.

- Orden Circular 3/2019, sobre mezclas bituminosas tipo SMA. Dirección General de Carreteras.

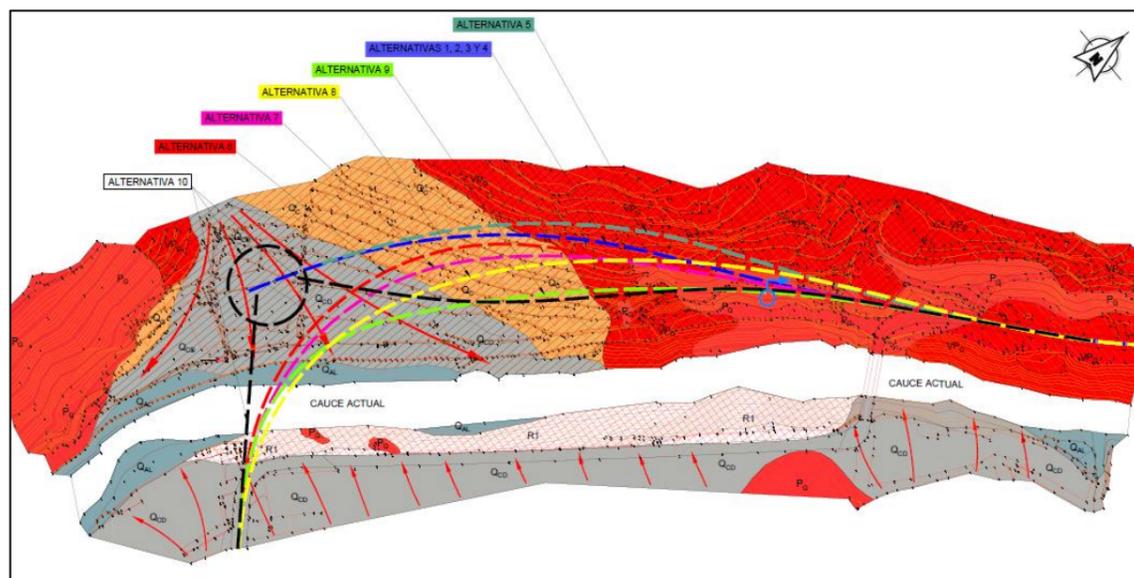
**10.3. CRITERIOS DE DISEÑO**

Los criterios de diseño principales en una obra de pavimentación son las solicitaciones del tráfico que se espera recibir para el periodo de proyecto, la capacidad portante del cimiento o explanada sobre el que se apoya la sección de firme y los condicionantes climáticos de la zona de proyecto. En el presente Anejo se considera un periodo de proyecto de veinte (20) años.

**10.3.1. CATEGORÍA DE EXPLANADA**

En relación a la geotecnia del proyecto, se dispone de una planta geológica donde se muestran las unidades geológicas atravesadas por el nuevo trazado de la carretera nacional N-110. En la siguiente imagen, las áreas mostradas en rojo representan afloraciones de granito. En naranja, terreno de coluvial (arenas y limos con cantos dispersos) y en gris terreno de cono de deyección con presencia mayoritaria de gravas y arenas.

**Figura 2. Unidades geológicas atravesadas por el nuevo trazado. En rojo, granito. En naranja, coluvial (arenas y limos con cantos dispersos). En gris, cono de deyección (gravas y arenas).**



Los materiales de fondo de explanada se han clasificado, según el Anejo nº 7 de Geotecnia, como adecuado o roca en la zona este, y como tolerable en el cono de deyección de la glorieta, por lo que, a efectos de dimensionamiento del firme, se adopta la hipótesis conservadora de suelo tolerable, en tanto la categoría de explanada debe estar unificada en tramos de longitud mínima 500 m, de acuerdo a lo dispuesto por la Norma 6.1-IC “Secciones de Firme”.

Teniendo en cuenta que aproximadamente el 50% del trazado discurre sobre roca granítica, por lo que la categoría de explanada en este caso será E3.

Por su parte, la Norma 6.1-IC “Secciones de Firme” de la Instrucción de Carreteras prescribe lo siguiente:

*«Con carácter general, para la capa superior utilizada en la formación de las explanadas, por razones de durabilidad y uniformidad de la capacidad estructural en toda la traza, se recomienda al ingeniero proyectista la consideración preferente de los suelos estabilizados in situ, con cal o con cemento, frente a una aportación directa de suelos sin tratar.»*

*«Salvo justificación en contrario, a los efectos de la definición de las secciones de firme se unificarán las explanadas por su categoría, de tal manera que no haya tramos diferenciados en el proyecto de menos de quinientos metros (500 m)».*

Teniendo en cuenta que la longitud aproximada de la variante entre la glorieta y el puente existente son 500 m, que en torno al 50% del trazado discurrirá sobre explanada de roca (categoría E3), y que no pueden existir categorías diferenciadas de explanada en tramos de longitud inferior a 500 m, de todo ello se infiere que la categoría de explanada en las zonas sobre coluviales y cono de deyección debe ser necesariamente E3.

**10.3.2. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA**

Tal y como se indica en el anejo nº 7 de Geotecnia la estructura de la explanada será la siguiente:

**10.3.2.1. Desmontes o excavaciones**

Las zonas de desmonte proyectados en el eje 1 se realizan en la unidad geotécnica granítica PG, estando el fondo de excavación constituido por roca, por lo que para una categoría de explanada tipo E3, sería necesario disponer una capa de hormigón HM-20 para regularización del fondo de excavación.

En aquellos tramos a media ladera, en los que se proyectan muros, sección del tipo de suelo de explanación vendrá definida en el siguiente apartado correspondiente a rellenos, ya que esta dependerá del tipo de material del relleno de coronación empleado.

El fondo de excavación en el desmonte proyectado en la glorieta estará formado por materiales de cono de deyección clasificándolos como suelos tolerables.

EJE	PKI	PKF	LONG. (m)	U. G.	FONDO DE EXPLANADA
1	0+000	0+265	265	P <sub>G</sub>	R
1	0+265	0+378	113	-	Relleno de muro
2	0+021	0+078	57	Q <sub>CD</sub>	0

En base a los criterios fijados en la citada Instrucción de Firmes, resultarían en cada caso para la formación de las explanadas proyectadas las siguientes secciones:

Tipo de suelo de explanación	Secciones propuestas para formación de explanada E3
R	
0	

**10.3.2.2. Rellenos**

Debido a que los tramos en rellenos discurren entre muros con material de relleno de coronación con calidad de suelo adecuado con CBR>5, se considerará la siguiente sección de explanada:

Clasificación del material (PG-3)	Tipo de suelo de explanación	Secciones propuestas para formación de explanada E3
Adecuado (CBR>5)	1	

**10.3.2.3. Formación de la explanada**

Aunque inicialmente el trazado discurre en roca, se ha considerado homogeneizar la sección de explanada para el Eje 1, considerando la solución propuesta para el tramo de relleno de muro en toda su longitud compuesta por 30 cm de S-EST3, para cumplir con la homogeneización requerida por la Norma 6.1-IC "Secciones de Firme" en tramos de longitud mínima 500 m.

Debido a que los tramos en rellenos discurren entre muros con material de relleno de coronación con calidad de suelo adecuado con C.B.R.>5 o suelo cemento o en superficies de saneo de 1 m con sustitución por suelo adecuado con C.B.R. >5, se proyecta la siguiente sección de explanada:

Eje	PP.KK.	Sección de explanada proyectada
1	0+000 – 0+378	
2	Glorieta	

**10.3.3. SOLICITACIONES DEL TRÁFICO**

Según la norma 6.1-I.C. "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras, aprobada por Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, el nivel de tráfico a considerar para el dimensionamiento del firme es la IMD de vehículos pesados en el carril de proyecto del año correspondiente a la puesta en servicio.

Como fecha de puesta en servicio se ha considerado el año 2024.

De acuerdo a lo indicado en el *Anejo 06. Planeamiento y Tráfico*, la Norma define ocho categorías de tráfico pesado según la  $IMD_p$  prevista en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio, que aparecen a continuación:

**Tabla 1. Categorías de tráfico pesado en carreteras. Fuente: Norma 6.1-IC.**

Categoría de tráfico pesado	IMDP
T00	$IMD_p \geq 4\ 000$
T0	$2\ 000 \leq IMP_p < 4\ 000$
T1	$800 \leq IMP_p < 2\ 000$
T2	$200 \leq IMP_p < 800$
T31	$100 \leq IMP_p < 200$
T32	$50 \leq IMP_p < 100$
T41	$25 \leq IMP_p < 50$
T42	$IMD_p < 25$

A continuación, se muestra la categoría de tráfico teórica para el carril de proyecto:

**Tabla 2. Categorías de tráfico pesado teóricas**

ESTACIÓN	IMD (2024)	IMD <sub>p</sub> (carril de proyecto)	CATEGORÍA DE TRÁFICO TEÓRICA
		(PUESTA EN SERVICIO)	
CC-103-3	1 541	83	T32
CC-100-3	4 912	93	T32

No obstante, hay que tener en cuenta que los valores de tráfico pesado se encuentran muy próximos al umbral de la categoría T31, de modo que un incremento de tráfico no previsto (posibles desarrollos en los municipios del trazado, la instalación de nuevas industrias o zonas demandantes de empleo, etc.) podría dejar del lado de la inseguridad la sección de firme proyectada, en tanto pequeñas variaciones de la IMD llevarían a un tráfico T31 circulando sobre una sección de firme proyectada para T32.

A continuación, se muestra la categoría de tráfico obtenida para el carril de proyecto:

**Tabla 3. Categorías de tráfico pesado para el dimensionamiento del firme**

ESTACIÓN	IMD (2024)	IMD <sub>p</sub> (carril de proyecto)	CATEGORÍA DE TRÁFICO ADOPTADA
		(PUESTA EN SERVICIO)	
CC-103-3	1 541	83	T31
CC-100-3	4 912	93	T31

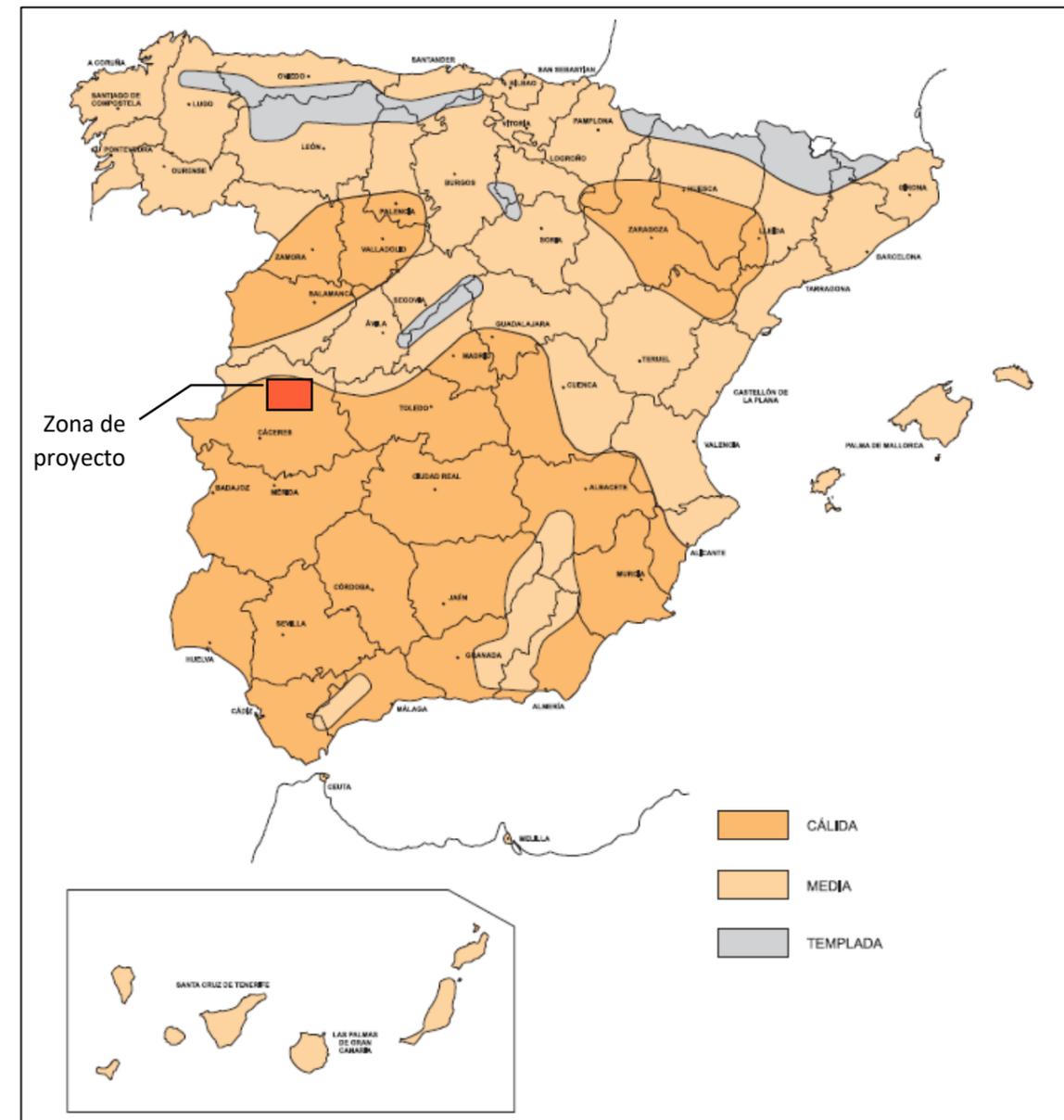
En consecuencia, se considera una categoría de tráfico pesado T31 para el dimensionamiento del firme.

10.3.4. CONDICIONANTES CLIMÁTICOS

En cuanto a los condicionantes climáticos, la Norma 6.1-IC de la Instrucción de Carreteras define las zonas térmicas estivales y pluviométricas para el dimensionamiento del firme, también aplicables para la definición de betunes a emplear y dotaciones del PG-3.

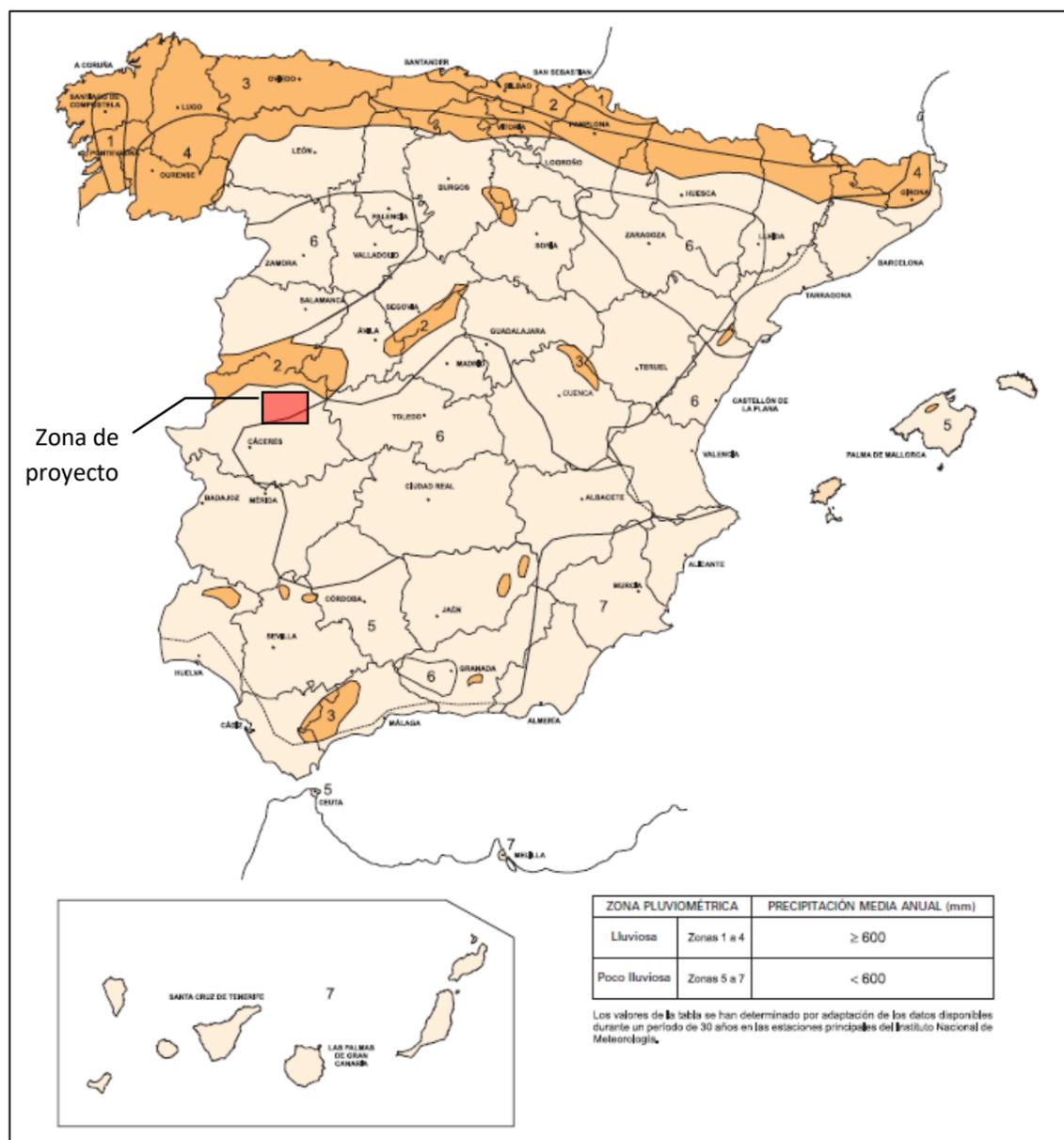
En este sentido, la zona térmica estival del proyecto se considera cálida.

Figura 3. Zona térmica estival del proyecto



En lo relativo a la zona pluviométrica, se considera que el tramo de la carretera nacional N-110 objeto de actuación se encuentra en la zona 5, definida en la Norma 6.1-IC como zona poco lluviosa.

Figura 4. Zona pluviométrica del proyecto



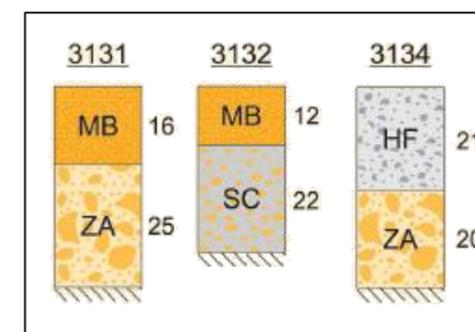
En consecuencia, y, de acuerdo a lo dispuesto por el Art. 542 de la Orden FOM/2523/2014, con una categoría de tráfico pesado T31 en zona térmica estival cálida, los betunes que pueden proyectarse son el convencional 50/70, y el betún modificado con caucho BC 50/70.

### 10.4. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

#### 10.4.1. ALTERNATIVAS CONSIDERADAS

Siguiendo la Norma 6.1-IC, teniendo en cuenta la categoría de tráfico T31 obtenida y la categoría de explanada E3, se pueden considerar las siguientes secciones de firme.

Figura 5. Alternativas de secciones de firme consideradas. Espesores en cm.



Donde:

- MB: mezclas bituminosas en caliente.
- HF: hormigón para firmes
- SC: suelocemento
- ZA: zahorra artificial

#### 10.4.2. COMPARATIVA ECONÓMICA

Con el objeto de decidir qué sección de firme de las evaluadas presenta un mayor beneficio para el interés general, se han evaluado los costes de construcción y conservación de dichas secciones, así como las características técnicas y prestaciones que ofrecen.

##### 10.4.2.1. Costes de construcción

En cuanto a la valoración económica, para calcular el coste de construcción de las distintas alternativas se ha empleado la O.C. 37/2016, de Base de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras.

Tabla 4. Comparativa de costes de construcción del firme en las distintas alternativas consideradas

Alternativa	Material	Espesor	Precio	Coste	Subtotal
Flexible	AC22 surf surf 50/70 D	0,06 m	115,10 €/m <sup>3</sup>	6,91 €/m <sup>2</sup>	23,95 €/m <sup>2</sup>
	Riego C60B3 ADH	-	-	0,31 €/m <sup>2</sup>	
	AC22 bin 50/70 S	0,10 m	113,69 €/m <sup>3</sup>	11,37 €/m <sup>2</sup>	
	Riego C50BF4 IMP	-	-	0,82 €/m <sup>2</sup>	
	Zahorra artificial	0,25 m	18,19 €/m <sup>3</sup>	4,55 €/m <sup>2</sup>	

Alternativa	Material	Espesor	Precio	Coste	Subtotal
Semirrígida	AC22 surf 50/70 D	0,04 m	115,10 €/m <sup>3</sup>	4,60 €/m <sup>2</sup>	21,26 €/m <sup>2</sup>
	Riego C60B3 ADH	-	-	0,31 €/m <sup>2</sup>	
	AC22 bin 50/70 S	0,08 m	113,69 €/m <sup>3</sup>	9,10 €/m <sup>2</sup>	
	Riego C50BF4 IMP	-	-	0,82 €/m <sup>2</sup>	
	Riego C60B3 CUR	-	-	0,37 €/m <sup>2</sup>	
	Suelocemento	0,22 m	27,54 €/m <sup>3</sup>	6,06 €/m <sup>2</sup>	
Rígida	Hormigón HF 3,5	0,21 m	135,59 €/m <sup>3</sup>	28,47 €/m <sup>2</sup>	32,11 €/m <sup>2</sup>
	Zahorra artificial	0,20 m	18,19 €/m <sup>3</sup>	3,64 €/m <sup>2</sup>	

#### 10.4.2.2. Costes de conservación

Los costes de construcción son tan solo una visión parcial de un planteamiento económico más amplio, debiendo extenderse el análisis a un determinado periodo o "ciclo vital" en el cual se consideren todas las operaciones que puedan tener lugar desde el momento de la construcción del firme, incluyendo aquellas actuaciones de rehabilitación que sean necesarias tras la finalización del periodo de proyecto para seguir aprovechando la infraestructura existente.

Por otro lado, debe tenderse a elegir un periodo de análisis tal que la influencia de la tasa de actualización que se escoja sea lo menor posible, para así conseguir objetivar al máximo el proceso. Para ello, debe irse a periodos de análisis inferiores a 5 años o superiores a 35 años. En el caso concreto de este estudio, se ha considerado apropiado adoptar un periodo de análisis de n=40 años.

Para poder sumar los diferentes costes que se producen a lo largo del periodo de análisis y hallar el coste total de una sección es preciso una actualización de los que se producen en diferentes momentos. Para este estudio se ha adoptado una tasa de actualización a = 6,0%, valor habitual en los proyectos españoles de infraestructura viaria, considerándose que se mantiene constante a lo largo de todo el periodo de análisis. Por otro lado, en este estudio se ha trabajado con "euros constantes", es decir, no se considera incluida en la tasa de actualización la tasa de inflación.

El coste total de una sección de firme viene dado por la siguiente expresión:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

Donde:

- C es el coste total de la sección.
- C<sub>1</sub> es el coste de construcción (inversión inicial).
- C<sub>2</sub> es el coste de conservación, incluyendo tanto los costes de las operaciones ordinarias como los costes de rehabilitaciones que se producen durante el periodo al que se extiende el análisis económico, todos ellos actualizados al año de la construcción.
- C<sub>3</sub> es el valor residual de la sección al final del periodo al que se extiende el análisis económico y actualizado al año de la construcción.

-C<sub>4</sub> representa el conjunto de costes, también convenientemente actualizados, que soportan los usuarios de la carretera como consecuencia de las labores de conservación: demoras, gastos adicionales de combustibles, etc.

El coste de conservación puede a su vez considerarse formando por dos sumandos y viene dado por la expresión:

$$C_2 = C_{21} + C_{22}$$

Donde:

- C<sub>21</sub> son los costes de conservación ordinaria a lo largo del periodo de análisis.
- C<sub>22</sub> son los costes de las rehabilitaciones u operaciones de conservación extraordinarias realizadas durante el periodo de análisis.

Los costes de conservación ordinaria C<sub>21</sub> pueden ser evaluados de dos formas diferentes.

La primera consiste en estimar las distintas operaciones que han de ser llevadas a cabo durante el periodo de proyecto, calculando sus respectivos costes y actualizándolos al año de la construcción. Es la mejor forma si se dispone de bases de datos sobre las necesidades reales de conservación ordinaria de cada sección, y es igual que la que se sigue para los costes de rehabilitación.

La segunda forma de evaluar los costes de conservación ordinaria consiste en suponer que en cada uno de los años del periodo de análisis el gasto que se produce por ese concepto es un porcentaje 'b' del coste de construcción C<sub>1</sub> de la sección de que se trate. Por tanto:

$$C_{21} = \frac{b}{100} \cdot C_1 \cdot \sum_1^n (1 + a)^{-n}$$

Donde:

- C<sub>21</sub> son los costes de conservación ordinaria a lo largo del periodo de análisis.
- b es el porcentaje que dichos costes de conservación ordinaria suponen respecto a los costes de construcción. En este caso se considera una cifra b=0,5% para las secciones flexibles o semirrígidas, y de b=0,2% para las rígidas.
- C<sub>1</sub> son los costes de construcción iniciales.
- a es la tasa de actualización, establecida en el 6,0%.
- n es el número de años del periodo de análisis, en este caso 40.

Para poder evaluar los costes de las rehabilitaciones C<sub>22</sub> es preciso prever qué operaciones de este tipo se van a realizar durante el periodo de análisis. Si se han previsto, por ejemplo, actuaciones

extraordinarias de conservación a los 10, 20 y 30 años, de coste respectivo  $R_{10}$ ,  $R_{20}$ ,  $R_{30}$ , el coste actualizado del conjunto de las mismas vendrá dado por la expresión:

$$C_{22} = \sum_1^r [R_r \cdot (1 + a)^{-r}] = R_{10} \cdot (1 + a)^{-10} + R_{20} \cdot (1 + a)^{-20} + R_{30} \cdot (1 + a)^{-30}$$

En lo que se refiere a los costes  $C_{22}$  de las rehabilitaciones en operaciones de conservación extraordinarias, se ha adoptado el siguiente programa de conservación de firmes para el cálculo de los costes:

Mezclas bituminosas sobre bases granulares no tratadas:

- $R_{09}$  → A los 9 años de la construcción: fresado y reposición de 5 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo AC16 surf 50/70 D.

- $R_{16}$  → A los 16 años de la construcción: microaglomerado en frío tipo MICROF 8.

- $R_{19}$  → A los 19 años: fresado del espesor total de las mezclas bituminosas y reposición con la misma disposición que la sección original.

- $R_{29}$  → A los 29 años: fresado y reposición de 5 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo AC16 surf 50/70 D.

- $R_{36}$  → A los 36 años de la construcción: microaglomerado en frío tipo MICROF 8.

- $R_{39}$  → A los 39 años: fresado del espesor total de las mezclas bituminosas y reposición con la misma disposición que la sección original.

Mezclas bituminosas sobre bases rígidas o tratadas con conglomerantes hidráulicos:

- $R_{11}$  → A los 11 años de la construcción: fresado y reposición de 4 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo AC16 surf 50/70 D.

- $R_{19}$  → A los 19 años de la construcción: microaglomerado en frío tipo MICROF 8.

- $R_{22}$  → A los 22 años: fresado del espesor total de las mezclas bituminosas y reposición con la misma disposición que la sección original.

- $R_{32}$  → A los 32 años: fresado y reposición de 4 cm de mezcla bituminosa discontinua tipo AC16 surf 50/70 D.

- $R_{39}$  → A los 39 años de la construcción: microaglomerado en frío tipo MICROF 8.

Firme de hormigón:

- $R_{35}$  → A los 35 años: reconstrucción del 15% de las losas.

Por su parte, el valor residual  $C_3$  de una sección de firme representa el valor patrimonial remanente de un firme al final del periodo de análisis. Se puede evaluar de muy diversas formas. Una de ellas es como un porcentaje  $V$  del coste de construcción  $C_1$  convenientemente actualizado:

$$C_3 = \frac{V}{100} \cdot C_1 \cdot (1 + a)^{-n}$$

Donde:

- $C_1$  es el coste de construcción (inversión inicial).

- $C_3$  es el valor residual de la sección al final del periodo al que se extiende el análisis económico y actualizado al año de la construcción.

- $V$  el porcentaje del valor residual aplicado.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el valor residual depende también en gran medida del coste de las operaciones de conservación que se hayan ido realizando a lo largo de dicho periodo de análisis. De todos modos, el valor residual suele influir poco en los análisis económicos, pues se sitúa al final del periodo de análisis, e influye tanto menos cuánto más alta sea la tasa de actualización.

En cuanto al porcentaje  $V$  para la determinación del valor residual de las secciones al final del periodo de análisis, se ha adoptado un valor de  $V=35\%$ .

Finalmente, en lo que se refiere a los costes de los usuarios, hay que decir que no existen suficientes datos sobre la influencia de las distintas soluciones en los mismos. Es un aspecto al que se le ha prestado relativa poca atención, lo que puede deberse a la opinión bastante general de que, mientras el estado del pavimento se mantenga dentro de unos límites aceptables, la diferencia de costes atribuible a comportamientos distintos es de difícil estimación y probablemente pequeña. En todo caso, las Administraciones Públicas no suelen incluir este concepto en sus estudios para la toma de decisiones de proyecto. En esta línea, se ha adoptado en el presente proyecto un valor para todas las alternativas de  $C_4=0$ .

#### 10.4.2.3. Costes totales

En consecuencia, los costes totales convenientemente actualizados de cada una de las alternativas de secciones de firme se indica a continuación.

**Tabla 5. Comparativa de los costes totales del firme en las alternativas consideradas**

	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>21</sub></b>	<b>C<sub>22</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>TOTAL</b>
Alternativa Flexible	23,95 €/m <sup>2</sup>	1,80 €/m <sup>2</sup>	17,80 €/m <sup>2</sup>	0,82 €/m <sup>2</sup>	0,00 €/m <sup>2</sup>	44,37 €/m <sup>2</sup>
Alternativa Semirrígida	21,26 €/m <sup>2</sup>	1,60 €/m <sup>2</sup>	10,99 €/m <sup>2</sup>	0,72 €/m <sup>2</sup>	0,00 €/m <sup>2</sup>	34,57 €/m <sup>2</sup>
Alternativa Rígida	32,11 €/m <sup>2</sup>	0,97 €/m <sup>2</sup>	0,53 €/m <sup>2</sup>	1,09 €/m <sup>2</sup>	0,00 €/m <sup>2</sup>	34,70 €/m <sup>2</sup>

La sección, por tanto, que menor coste presenta, es la alternativa de firme semirrígido, de 12 cm mezcla bituminosa sobre 22 cm de suelocemento.

#### 10.4.3. COMPARATIVA TÉCNICA

En cuanto a la comparativa técnica, las principales características técnicas a tener en cuenta para las distintas alternativas se exponen a continuación.

Ventajas de las secciones con materiales granulares no tratados:

- Mayor flexibilidad: debido a la ausencia de conglomerantes, estas capas se adaptan mejor a posibles deformaciones del cimientto del firme o asientos localizados del terreno.
- Buenas propiedades de drenaje: los firmes con base de zahorra garantizan un mejor drenaje de las calzadas, por lo que son interesantes cuando el nivel freático es alto en las zonas de desmonte.
- Facilidad de puesta en obra: las capas de zahorra presentan mayor facilidad de puesta en obra que las tratadas con conglomerantes.
- Menor dependencia de la puesta en obra: la calidad de las capas granulares no tratadas es menos dependiente de la ejecución que las bases hidráulicas in situ, debido a la necesidad de estas últimas de una homogeneidad y control de la dotación de conglomerante difícil de asegurar en todos los puntos.

Inconvenientes de las secciones con materiales granulares no tratados:

- Menor resistencia a fatiga: las secciones con zahorras presentan menor resistencia a los esfuerzos de fatiga que las secciones con bases hidráulicas.
- Menor resistencia a la erosión: la ausencia de conglomerante hace que estas capas presenten mayor erosionabilidad ante la presencia indeseada de agua en la estructura del firme de la carretera.

- Menor aprovechamiento de los bancos de materiales: debido a las características necesarias en las zahorras, es posible que los materiales presentes en la traza deban desecharse como deficientes, por no satisfacer los requerimientos del material.

Ventajas de las secciones con bases tratadas con conglomerantes:

- Resistencia a fatiga: las secciones con bases hidráulicas ofrecen mejor comportamiento a la fatiga frente a las secciones con bases granulares, con lo que, desde un punto de vista teórico, cabe esperar una mayor vida útil de los caminos en la alternativa de sección con base hidráulica.
- Mayor resistencia a la erosión: las capas tratadas con conglomerantes presentan mayor cohesión, otorgada por el cemento, y menor sensibilidad al agua, lo que las hace más resistentes a la erosión.
- Reducción de las deformaciones: debido a la rigidez de estas capas, las solicitaciones transmitidas a las capas inferiores son muy pequeñas, evitando o reduciendo en gran medida las deformaciones.
- Menor sensibilidad frente al agua: la presencia del conglomerante otorga a la sección una mayor impermeabilidad y un mejor comportamiento frente al agua, tanto frente a la procedente de escorrentía como una menor susceptibilidad frente al hielo.
- Mayor aprovechamiento de los bancos de materiales: parte de los materiales de los bancos naturales, que en un proyecto convencional se desecharían como deficientes por no satisfacer los requerimientos de diseño, se pueden utilizar mediante un tratamiento adecuado.
- Buen comportamiento en el tiempo: debido al propio comportamiento del cemento (que adquiere progresivamente la resistencia y rigidez), las bases tratadas mejoran sus propiedades con el tiempo, lo que favorece que su conservación sea reducida y aumente su vida útil.

Inconvenientes de las secciones con bases tratadas con conglomerantes:

- Grietas de retracción: estas secciones presentan el inconveniente de la reflexión de grietas de retracción, que, de no sellarse convenientemente, podrían implicar la entrada de agua y originar un problema de conservación en el futuro.
- Reducido plazo de trabajabilidad en estado fresco: una vez que se ha introducido el cemento en el suelo y se hace el humedecido, la colocación y compactación de las capas deben hacerse con gran rapidez, para evitar el fraguado anticipado y la obtención de malos resultados.

Ventajas de los pavimentos de hormigón:

- Elevada capacidad portante: los pavimentos de hormigón constituyen la estructura de firme de mayor capacidad portante que existe, idóneos para soportar elevadas solicitaciones de tráfico pesado.

- Gran durabilidad y pervivencia en el tiempo: los firmes de hormigón presentan una vida útil muy superior a las estructuras de pavimento flexible, llegando en algunos casos a duplicar el periodo de servicio antes de la primera rehabilitación estructural.
- Reducidos costes de conservación: la inalterabilidad de las losas de hormigón ofrece una estructura de firme que requiere de unos trabajos de poca entidad en la conservación ordinaria.

**Inconvenientes de los pavimentos de hormigón:**

- Elevado coste de reparación: las rehabilitaciones estructurales de los pavimentos de hormigón resultan mucho más costosas que las de los pavimentos asfálticos.
- Consecuencias más graves de posibles defectos constructivos: la existencia de posibles defectos constructivos tiene un impacto más grave en los pavimentos de hormigón que en los firmes flexibles, pudiendo resultar en escalonamientos, descalces y rotura de losas, etc.
- Mayor coste de ejecución de marcas viales: la alcalinidad de los pavimentos de hormigón es incompatible con los ligantes saponificables de algunos materiales de señalización horizontal (por ejemplo, las resinas alcídicas), a los que destruyen reaccionando químicamente con ellos. Adicionalmente, las pinturas basadas en resinas de tipo termoplástico tampoco pueden aplicarse directamente sobre pavimentos de hormigón.
- Menor contraste de las marcas viales: debido al propio color del hormigón, las marcas viales blancas presentan un menor contraste con el pavimento, lo que dificulta la legibilidad del trazado en horas nocturnas.
- Menor resistencia al deslizamiento: el hormigón, por su propia naturaleza, precisa de un texturizado artificial (mediante microfresado, granallado, etc.) para conseguir la fricción neumático-pavimento que en la mezcla bituminosa se consigue de forma natural por el árido de rodadura. En zonas de orografía complicada o con fuertes pendientes, que a su vez vayan a recibir tráfico pesado, los firmes rígidos pueden resultar poco convenientes.

**10.5. INCORPORACIÓN DE BETUNES CON CAUCHO**

El 8 de octubre de 2001 se aprobó la Resolución de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispuso la publicación en boletín oficial del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, que aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006. Este Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso introdujo, en su Art. 2.3. epígrafe f, la siguiente disposición:

*«En las obras públicas en que su utilización sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de NFUs. En estos casos se exigirá la inclusión de este requisito en los correspondientes pliegos de prescripciones técnicas».*

Con posterioridad, en el año 2007 el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) publicó un manual de empleo de caucho procedente de NFU en mezclas bituminosas. Ese mismo año,

la Dirección General de Carreteras publicó la O.C. 21/2007, sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). La Orden Circular dispone lo siguiente en su apartado 3:

*«En las obras de pavimentos asfálticos que se lleven a cabo en la red de Carreteras del Estado se utilizarán prioritariamente los ligantes bituminosos que se contemplan en esta Orden Circular. A estos efectos, en las condiciones que se establecen en esta Orden, se incluirán estos ligantes:*

- *En todos los proyectos de firmes de nueva construcción, de acondicionamiento, de rehabilitación, o de reconstrucción total de firmes, cuya Orden de Estudio se autorice con posterioridad a la fecha de entrada en vigor de esta Orden Circular.*
- *En el caso de proyectos en redacción, siempre que su inclusión no suponga retrasos en los plazos de aprobación del proyecto.*

*La utilización de estos ligantes, en cada caso, queda supeditada a su viabilidad económica, tal como se establece en la O.M. 891/2004, por lo que en cada proyecto u obra en los que según el punto anterior se prevea su utilización, se estudiará si las condiciones del mercado permiten su empleo sin sobrecostes no justificados sobre el uso del ligante alternativo».*

En este sentido, teniendo en cuenta que los betunes a emplear en el presente proyecto son necesariamente el 50/70 y el BC 50/70 debido a la categoría de tráfico pesado y a los condicionantes climáticos, se realiza la siguiente comparativa de precios, aplicando los contenidos en la O.C. 37/2016, de Base de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras.

**Tabla 6. Comparativa económica del coste del betún convencional y mejorado con caucho**

Ud	Código	Concepto	Precio [€]	Fuente
t	211.0020	Betún asfáltico en mezclas bituminosas 50/70.	440,00 €/t	O.C. 37/2016
t	211.0050	Betún mejorado con caucho procedente de polvo de neumático fuera de uso tipo BC 50/70, para mezclas bituminosas en caliente, a pie de obra o planta.	480,00 €/t	O.C. 37/2016

En el presente proyecto se estima una medición aproximada de 59,13 t de betún para la ejecución de las mezclas bituminosas. En consecuencia, emplear el betún con caucho tendría un coste de 28 380,12 €, en tanto que el empleo del betún convencional costaría 26 015,11 €, siendo la diferencia entre ambas opciones de 2 365,01 €. En este sentido, se considera que el encarecimiento por el empleo del betún mejorado con caucho es un importe poco relevante en el conjunto del total del proyecto, resultando por tanto asumible económicamente.

En consecuencia, se considera que el empleo de betún con caucho procedente de NFU en el presente proyecto es técnica y económicamente viable.

## 10.6. SECCIÓN DE FIRME PROYECTADA

### 10.6.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Desde el punto de vista técnico, teniendo en cuenta que el tramo de carretera se localiza a media ladera, se considera necesario disponer una sección que pueda adaptarse bien a los pequeños movimientos (mayor flexibilidad), así como un buen comportamiento frente al agua. Considerando además que la ladera tiene un uso de cultivos en bancales, y los fondos de excavación se estiman en suelo tolerable, no sería recomendable emplear el terreno existente para fabricación de suelocemento in situ, siendo preferible traer material de préstamo o fabricarlo en central. Este escenario incrementaría el coste de transporte, ya que las posibles plantas de fabricación se encuentran en torno a 50 km de la traza. Adicionalmente, consultado con la Dirección del Proyecto, en la zona se dispone con mayor facilidad de la zahorra, siendo un firme además de más sencilla ejecución.

Considerando las razones anteriormente expuestas, se considera que la solución más adecuada tras el análisis técnico-económico es la representada por la sección flexible de 16 cm de mezclas bituminosas sobre 25 cm de zahorra artificial.

### 10.6.2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

#### 10.6.2.1. Sección de firme en plataforma

La sección de firme proyectada para los viales del proyecto está formada por 15 cm de mezclas bituminosas que incorporan betún mejorado con caucho procedente de NFU sobre una base de 20 cm de zahorra artificial ZA. La estructura del firme en el eje 2 será apoyada sobre una explanada de dos capas, una de 30 cm de suelo estabilizado con cemento tipo S-EST3 sobre 50 cm de suelo adecuado. En el eje 1 la estructura del firme será apoyada sobre una capa de 30 cm de suelo estabilizado con cemento tipo S-EST3, con los correspondientes riegos de adherencia y de curado.

Respecto al reparto de las mezclas bituminosas por capas, considerando las opciones recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (Orden FOM 2523/2014) y las recomendaciones contenidas en las *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos* (Junta de Castilla y León, 2004), los 15 cm se reparten entre una capa de rodadura de 6 cm de mezcla AC22 surf D, y una capa intermedia de 9 cm de mezcla AC22 bin S.

EJE 1		EJE 2	
Sección de firme en plataforma		Sección de firme en plataforma	
6 cm	AC 22 surf BC 50/70 D Riego C60B3 TER	6 cm	AC 22 surf BC 50/70 D Riego C60B3 TER
10 cm	AC22 bin BC 50/70 S Riego C60BF4 IMP	10 cm	AC22 bin BC 50/70 S Riego C60BF4 IMP
25 cm	Zahorra artificial ZA	25 cm	Zahorra artificial ZA
30 cm	Suelo estabilizado S-EST 3	30 cm	Suelo estabilizado S-EST 3
		50 cm	Suelo adecuado

Respecto a los riegos de adherencia, se opta por la opción termoadherente frente a la opción convencional para evitar el pegado del betún residual a las ruedas de los neumáticos de los vehículos de obra, lo que reduciría la efectividad de la adherencia con la mezcla posterior. Las emulsiones termoadherentes, por el contrario, permiten la circulación de los vehículos de obra sin pegarse el betún a las ruedas de los mismos, lo que facilita conservar la máxima adherencia para la aplicación de la mezcla bituminosa posterior.

#### 10.6.2.2. Sección de firme en estructuras

En cuanto a la sección de firme sobre estructuras, la IAP-11, Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, prescribe en su apartado 3.1.2. lo siguiente en relación a las cargas muertas:

*«El espesor máximo del pavimento bituminoso proyectado y construido sobre tableros de puentes, incluida la preceptiva capa de impermeabilización y la eventual capa de regularización, no será en ningún caso superior a diez centímetros (10 cm), salvo aprobación expresa de la Dirección General de Carreteras».*

En este sentido, y con el objeto de dar continuidad a las dos capas superiores del firme, se proyecta la extensión de los 10 cm de mezclas bituminosas de la plataforma sobre el tablero del nuevo puente de la carretera nacional N-110, previa extensión de la impermeabilización del tablero, con los correspondientes riegos de adherencia.

Sección de firme en estructuras	
4 cm	AC16 surf BC 50/70 D Riego C60B3 TER
6 cm	AC22 bin BC 50/70 S Riego C60B3 TER
-	Impermeabilización del tablero

#### 10.6.2.3. Sección de firme en reposición de caminos

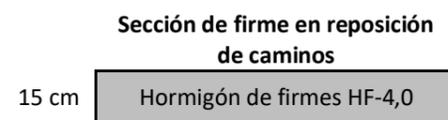
Respecto a la reposición de caminos, la principal actuación consiste en la reposición del paseo fluvial junto al río Jerte, actualmente pavimentado con losas de hormigón. Con el objeto de mantener para los habitantes de la zona una prestaciones similares a las pre-existentes antes de la construcción de la carretera, se considera recomendable mantener la tipología de firme rígido para el camino fluvial junto al río.

En este sentido, se considera que el tráfico rodado por el paseo fluvial es residual. No constituyendo la vía una carretera según la Ley 37/2015, de 29 de septiembre, de Carreteras, ni siendo de aplicación directa la Norma 6.1-IC "Secciones de Firme" (de aplicación preceptiva para las carreteras de titularidad estatal), se ha dimensionado la sección del paseo fluvial de acuerdo a las recomendaciones del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), concretamente con base en su *Manual de*

diseño de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico (2002). De acuerdo a la citada referencia, los parámetros de diseño del paseo fluvial serían los siguientes:

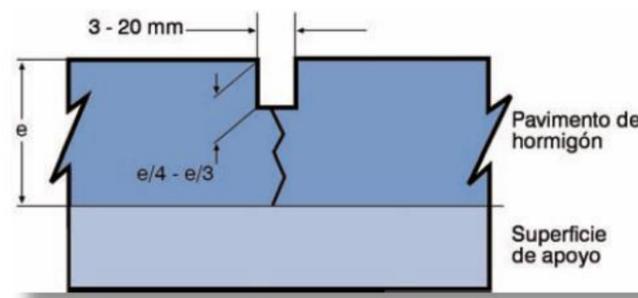
Parámetro de diseño	Valor	
Periodo de diseño	20 años	
Categoría de explanada	S0	CBR 3-5%
Categoría de tráfico pesado	C4 (0 a 4 veh/día)	- Calles exclusivamente residenciales con las edificaciones ya construidas y sin tráfico comercial. - Calles con anchura inferior a 6 m sin tráfico comercial.

De acuerdo con los parámetros de diseño considerados, la losa de hormigón mínima a disponer es de 14 cm con hormigón HF 4,0 y de 16 cm con hormigón HF 3,5. En este sentido, para quedar del lado de la seguridad, se proyecta una sección de firme compuesta por una losa de hormigón HF 4,0 de 15 cm de espesor.



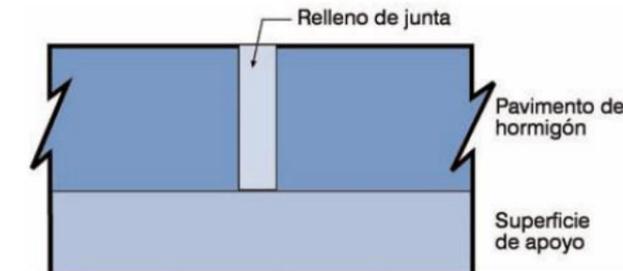
Se deberán ejecutar juntas transversales en el hormigón, con las indicaciones siguientes:

- Juntas de contracción: se ejecutan mediante serrado, y deberán estar separadas de forma equidistante una longitud de 3,50 m.



- Juntas de construcción: En las paradas prolongadas (más de 1 hora de trabajo) de la puesta en obra o al fin de la jornada, se origina una junta. Estas juntas son en general previsibles y deben hacerse coincidir con las de contracción.
- Juntas de dilatación: las losas a ambos lados de las juntas se encuentran en general a tope, en esta zona debe disponerse un material compresible intermedio. De esta forma se permite el

movimiento de las losas, si éstas se dilatan por efecto de la temperatura, y se evitan empujes indeseables.



Las juntas de dilatación se rellenarán con mástico bituminoso.

#### 10.6.2.4. Dotaciones proyectadas

Las dotaciones proyectadas en las distintas capas bituminosas se recogen a continuación:

- Capa de rodadura:
  - Contenido mínimo de betún en masa: 4,50%
  - Relación filler-betún: 1,2
- Capa intermedia:
  - Contenido mínimo de betún en masa: 4,00%
  - Relación filler-betún: 1,1

Las dotaciones de los riegos se exponen seguidamente:

- Riego de adherencia:
  - Dotación de la emulsión: 0,88 Kg/m<sup>2</sup>
  - Riqueza de la emulsión: 60%
  - Dotación mínima de ligante residual en calzada: 0,50 Kg/m<sup>2</sup>
- Riego de imprimación:
  - Dotación de la emulsión: 1,67 Kg/m<sup>2</sup>
  - Riqueza de la emulsión: 60%
  - Dotación mínima de ligante residual en calzada: 1,00 Kg/m<sup>2</sup>
  - Dotación de árido de cobertura: 13,3 Kg/m<sup>2</sup>

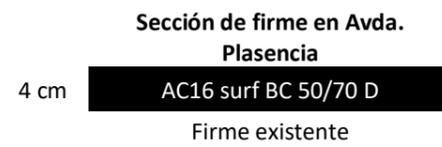
Las dotaciones proyectadas en los riegos son superiores al mínimo especificado por el PG-3 debido a que se considera de especial importancia garantizar la adherencia entre capas y una correcta imprimación de la base.

**10.6.2.5. Sección de firme en Avda. de Plasencia**

Respecto al firme de la Avda. de Plasencia (trazado actual de la carretera N-110), tras la realización de las obras de la variante deberá ser objeto de una rehabilitación superficial, ya que está previsto un aumento del tráfico pesado como consecuencia de la ejecución de las obras.

En este sentido, al tratarse de un tramo urbano, por razones de limitación de cota (principalmente la interacción con el acerado) y de previsión de tráfico residual futuro por captación de la nueva variante, no se considera el recrecimiento del firme.

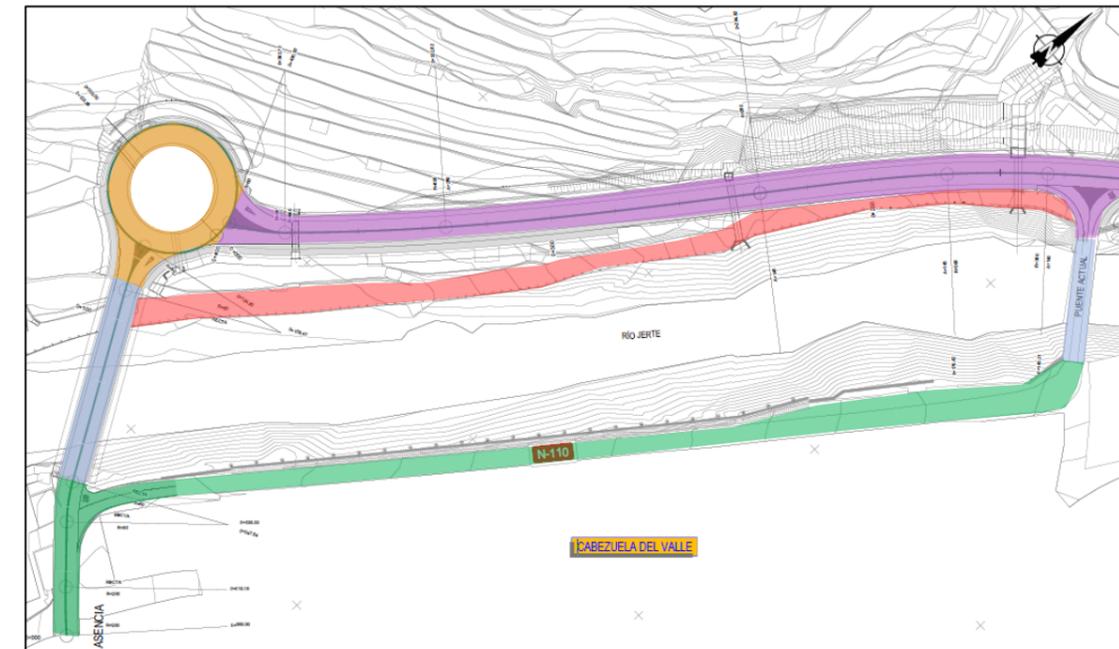
La rehabilitación superficial proyectada consistirá en el fresado de 4 cm de la capa de rodadura y su reposición con mezcla bituminosa AC16 surf BC 50/70 D.



**10.6.2.6. Alcance de las soluciones adoptadas**

En la siguiente figura se indica el alcance de cada una de las soluciones de firmes adoptadas.

**Figura 6. Alcance de las soluciones proyectadas en firmes y pavimentos**



- Eje 1: sección de firme en plataforma
- Sección de firme en glorieta
- Sección de firme en estructuras
- Sección de firme en reposición de caminos
- Sección de firme en Avda. Plasencia