

Norma de SECCIONES DE FIRME de la Comunitat Valenciana

Norma de
SECCIONES DE FIRME
de la Comunitat Valenciana



FICHA CATALOGRÁFICA

Comunitat Valenciana. Direcció General d'Obres Públiques

Norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana . – 1ª ed. – Valencia : Conselleria d'Infraestructures i Transport, 2009. –. 152 p. : tab., il. col. ; 30 cm

ISBN: 978-84-482-5198-7

1. Pavimentos – Comunitat Valenciana – Normas
 2. Carreteras – Diseño y construcción – Normas
- I. Comunitat Valenciana. Conselleria d'Infraestructures i Transport, ed.

625.8 (460.31) (083.75)

625.72 (083.75)

PUBLICACIÓN COORDINADA POR:

Dirección General de Obras Públicas

División de Carreteras

EQUIPO REDACTOR:

Bardasano González, Ricardo

Crespo del Río, Ramón

Del Val Melús, Miguel Ángel

Ferrer Domingo, Ismael

Jiménez Sánchez, Julio

Kraemer Heilperno, Carlos

Llorca Acebedo, Arturo

ENTIDADES COLABORADORAS:

AIDICO

ARIVAL

ASEFMA

FECOVAL

FEVEC

IECA

© De la presente edición:

Conselleria d'Infraestructures i Transport,

Edita:

COMUNITAT VALENCIANA
CONSELLERIA D'INFRAESTRUCTURES I TRANSPORT

1ª ed. 2009

Impresión: LAIMPRESA, CG

ISBN: 978-84-482-5198-7

D.L.: V-1423-2009

Presentación

El Estatuto de Autonomía y la Ley 6/1991 de Carreteras de la Comunitat Valenciana, otorgan la competencia a la Generalitat para el establecimiento de normas aplicables a la construcción, gestión, explotación, conservación, señalización y demás funciones directamente relacionadas con la creación y el funcionamiento de nuestro sistema viario.

Hasta este momento, en la Comunitat Valenciana, el dimensionamiento y construcción de los firmes de carreteras se regían por la normativa estatal: Instrucción 6.1 IC, Secciones de Firme, y la Orden Ministerial FOM/891/2004 de 1 de mayo, diseñadas para el ámbito de la Red de Carreteras de Estado.

La Conselleria de Infraestructuras y Transporte, a través de la Dirección General de Obras Públicas, ha elaborado una norma técnica de dimensionamiento de firmes, en vigor desde el día 13 de enero de 2009, a fin de que el proyectista tenga en cuenta los parámetros específicos de una serie de variables de nuestro territorio, como son la caracterización del tráfico, la climatología, la capacidad de soporte de los terrenos existentes en la traza, disponibilidad real de los materiales en la zona, etc.

Con carácter adjunto a la norma se han redactado una serie de anejos que regulan especificaciones técnicas a exigir tanto a materiales autóctonos como a procesos de puesta en obra. Es nuestra intención continuar incorporando anejos que, entre otros aspectos, proporcionen mayores posibilidades de empleo de recursos de la Comunitat en lo referente a la construcción de los firmes de nuestro sistema viario.

En definitiva, creemos que esta norma de 'Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana' supone una aportación de la Generalitat a la mejora en los procesos de proyecto, diseño y construcción de firmes, y la ponemos a disposición de los sectores interesados para que, entre todos, consigamos los mejores resultados para las carreteras de nuestra Comunitat.

MARIO FLORES LANUZA
Conseller de Infraestructuras y Transporte



Prólogo

La norma 'Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana', atiende y desarrolla los aspectos específicos de nuestro territorio teniendo en cuenta los objetivos que se persiguen desde la Conselleria de Infraestructuras y Transporte para nuestras carreteras: Proyecto y ejecución de obras con calidad creciente, especial atención a la seguridad vial, menores afecciones medioambientales consiguiendo elevadas cotas de integración paisajística, incorporación de avances tecnológicos y derivados de procesos de I+D+i y, finalmente, optimización en el empleo de los recursos materiales presentes en nuestra Comunitat.

No excluye ninguna tecnología, siempre que ésta esté debidamente justificada técnica y económicamente. Asimismo permite, en función del mayor conocimiento que se posea del tráfico real que vaya a soportar la carretera, y de los materiales constituyentes del firme, economizar en espesores, lo que constituye clara apuesta por la optimización de los recursos naturales, contribuyendo así a un desarrollo sostenible.

Es necesario conseguir la más precisa identificación del tráfico que circula por nuestras carreteras a los efectos de cuantificar más exactamente las solicitaciones que afectarán al firme y de esta manera, poder proceder a su dimensionamiento óptimo. Asimismo conviene dividir la categoría de tráfico T2, contemplada en la normativa estatal, en dos nuevas, T21 y T22, de forma que se adapte mejor a la intensidad de tráfico de nuestra red, evitando sobredimensionamientos y optimizando económicamente los recursos, con el consiguiente ahorro en los costes de construcción de firmes.

Aprovechando la existencia de suelos de gran capacidad de soporte, se establece una nueva categoría de explanada, lo que supone otra diferencia con la norma ministerial que se justifica sobradamente; se trata de atribuir al material las misiones que puede realizar en función de su calidad, sin relegarlo a funciones de inferior categoría.

Es de destacar la enorme repercusión que tendrá el uso de esta norma en la red viaria de la Comunitat Valenciana, ya que es de aplicación, tanto a la red autonómica, como a la red provincial y red local.

La norma se estructura en diez capítulos y dos anexos. Prioriza el dimensionamiento del firme mediante métodos analíticos, proporcionando al proyectista las directrices necesarias para ello. No obstante se presentan posibles soluciones de referencia, dimensionadas con criterios analíticos y empíricos, en un catálogo de sencilla interpretación que facilitará el trabajo de proyectistas, Administración y constructores.

ISMAEL FERRER DOMINGO
Director General de Obras Públicas



ÍNDICE

	Presentación	
	Prólogo	
13	1. OBJETO, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y CONTENIDOS	
17	2. EL SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA	
23	3. PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO	
25	3.1 TRÁFICO	
30	3.2 EL CIMIENTO DEL FIRME	
35	3.3 CLIMA	
39	4. TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO	
45	5. DIRECTRICES PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANALÍTICO	
47	5.1 INTRODUCCIÓN	
49	5.2 CARGA TIPO Y TRÁFICO DE PROYECTO	
51	5.3 DATOS CLIMÁTICOS	
52	5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	
53	5.5 ESPESORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE CAPA	
54	5.6 CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS	
55	5.7 PARÁMETROS CRÍTICOS	
55	5.8 APLICACIONES INFORMÁTICAS	
57	6. SECCIONES DE FIRME	
59	6.1 CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME	
62	6.2 MATERIALES	
72	6.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS SECCIONES DE FIRME	
77	6.4 ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN	
79	7. ARCENES	
81	7.1 GENERALIDADES	
81	7.2 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T21	
82	7.3 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T22 Y T31	
83	7.4 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T32 A T42	
85	8. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	
89	9. DEFINICIONES	
97	10. SIGLAS Y ACRÓNIMOS	
	ANEXOS	
103	A. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE UNIDADES DE OBRA	
105	A.1 ZAHORRA ARTIFICIAL	
112	A.2 MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	
119	B. VALIDACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EXPLANADAS Y CAPAS GRANULARES	
121	B.1 INTRODUCCIÓN	
122	B.2 EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	
122	B.3 LA CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	
123	B.4 CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO	
124	B.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	
128	B.6 RESULTADOS OBTENIDOS	
128	B.7 COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE DEFLECTÓMETRO	
129	B.8 RESUMEN Y CONCLUSIONES	
130	B.9 DOCUMENTOS ANEXOS	





NORMA DE SECCIONES
DE FIRME DE LA
COMUNITAT VALENCIANA

OBJETO, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y CONTENIDOS



1. OBJETO, ÁMBITO DE APLICACIÓN Y CONTENIDOS

Esta norma recoge un procedimiento de diseño de firmes en el que se ha articulado el binomio solicitud real - respuesta estructural dando cabida tanto a consideraciones teóricas como a otras basadas en la experiencia acumulada en la Comunitat Valenciana. Se pretende, en última instancia, la optimización de los recursos destinados a la construcción de infraestructuras viarias.

Esta norma es de aplicación a los proyectos de firmes de carreteras de nueva construcción y de acondicionamiento de las existentes y, salvo justificación en contrario, también a los de reconstrucción total de firmes. Dichas carreteras son las que forman parte del sistema viario de la Comunitat Valenciana, exceptuando las vías de titularidad estatal.

La norma no es aplicable a los pavimentos sobre puentes ni en túneles. Tampoco es aplicable en los proyectos de rehabilitación superficial o estructural de los firmes y pavimentos de las carreteras en servicio, en los que ha de seguirse lo establecido en la Norma 6.3 IC "Rehabilitación de firmes".

Esta norma sólo es válida en los supuestos considerados en cada apartado. En otro caso deberán justificarse las soluciones adoptadas, manteniendo en lo posible los principios y las recomendaciones que se dan para garantizar una razonable equivalencia estructural de las secciones.

En general no se admite la construcción del firme por etapas, salvo en casos muy justificados y exclusivamente para las categorías de tráfico pesado T31 y T32, siempre y cuando la sección de firme inicialmente construida resulte estructuralmente suficiente hasta la ejecución de la segunda etapa y su superficie cumpla todos los requisitos exigidos a las capas de rodadura y a sus materiales constituyentes. En todo caso deberá recabarse autorización expresa a la Direcció General d'Obres Pùbliques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport.

Junto a las especificaciones que se recogen en esta norma se establecerán las medidas necesarias para el cumplimiento de la legislación que en materia ambiental y de seguridad y salud estuviera vigente en cada momento.

En el capítulo 2 se presenta el sistema viario del territorio de la Comunitat Valenciana, cuya titularidad se reparten dos administraciones: la estatal y la autonómica. En concreto, la red viaria autonómica responde al contenido del artículo 49.14 del Estatuto de Autonomía, el cual establece que la Generalitat tiene competencia exclusiva en las carreteras y caminos cuyo itinerario transcurra íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana. La aplicación de las disposiciones de la norma de secciones de firme de la Comunitat Valenciana se circunscribe al conjunto de las carreteras de titularidad autonómica, con independencia de que sean gestionadas por los ayuntamientos, por las diputaciones provinciales o por la propia Generalitat.

El capítulo 3, “Parámetros de dimensionamiento”, trata de las solicitaciones a las que se ve sometido el firme a lo largo de su vida útil, de la caracterización de su cimiento y de algunas singularidades que pudieran derivarse de su ubicación en zonas climáticas determinadas. Hay que destacar que se consideran las acciones derivadas del tráfico pesado de una manera más precisa que en la norma del Ministerio de Fomento, propugnándose la obtención de los espectros reales de cargas y expresando en todo caso el tráfico pesado en ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de proyecto. Sin embargo, en ausencia de estudios específicos se permite la valoración del tráfico pesado como en la Norma 6.1 IC; no obstante, se establecen, dependiendo de la calidad de la información obtenida en cada caso, aumentos o disminuciones del espesor de la capa estructural de la sección de firme proyectada respecto de la indicada en el catálogo incluido como referencia en el presente documento.

Mejorar las posibilidades de elección del tipo de explanada, con el rigor técnico necesario, constituye el objetivo primordial del apartado dedicado al cimiento del firme. Igual que hace la Norma 6.1 IC, se consideran como explanadas de máxima calidad las estabilizadas con cemento (aquí denominadas E4), pero se introduce una nueva categoría en la que se incluyen las formadas con suelos seleccionados de altas prestaciones (explanadas E3), las cuales, en la vigente normativa estatal, se engloban necesariamente en la categoría E2. También de manera análoga a como se presenta en dicha normativa estatal, para facilitar la labor del proyectista se presenta un cuadro de formación de explanadas según la naturaleza del terreno subyacente y con la posibilidad de empleo de distintos materiales (naturales o estabilizados).

Los capítulos 4 y 5 establecen las directrices que deben seguirse en el proceso de diseño de las secciones de firme, así como los criterios que se han tenido en cuenta en la propuesta recogida en el capítulo 6. Se definen los parámetros de caracterización de los distintos materiales, incluyendo sus correspondientes funciones de transferencia. Asimismo, se dan las necesarias pautas para la obtención, en los puntos más desfavorables en cada caso, de las tensiones y deformaciones producidas por las correspondientes acciones, indicándose la manera de valorarlas mediante las citadas funciones de transferencia.

Con el capítulo 6, “Secciones de Firmes”, se quiere poner a disposición del proyectista un instrumento para que, una vez conocido el tráfico pesado y elegida la categoría de explanada, pueda tener una referencia inmediata de la sección más adecuada, según la disponibilidad y el coste de los materiales utilizables. A tal fin se presenta un catálogo de secciones de firme, de interpretación sencilla y de similar estructura que los que se incluyen en la Norma 6.1 IC.

Finaliza la norma con dos capítulos, “Arcenes” y “Aspectos constructivos”, que contienen diversas recomendaciones extraídas de la experiencia en la construcción de carreteras en la Comunitat Valenciana.

EL SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA



2. EL SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA

La ley 6/1991 de la Generalitat, de 27 de marzo, de Carreteras de la Comunitat Valenciana, define el sistema viario de la Comunitat Valenciana como el conjunto de todas las vías de tránsito rodado que trascurren por su territorio, independientemente de su titularidad y de sus características. En su título II “Elementos del sistema viario” se establece la clasificación funcional del sistema, indicando que está integrado por las siguientes redes:

- a.** Red de carreteras del Estado, compuesta por las vías que tengan dicha calificación legal.
- b.** Red básica de la Comunitat Valenciana, destinada a unir entre sí los núcleos básicos del sistema de asentamientos, conectar con la Red de carreteras del Estado y proporcionar acceso a las grandes infraestructuras del sistema de transportes.
- c.** Red local de la Comunitat Valenciana, en la que se integran las carreteras recogidas en el catálogo del sistema viario y no incluidas en la Red básica de la Comunitat.
- d.** Red de caminos de dominio público de la Comunitat Valenciana, compuesta por todas las vías de titularidad pública susceptibles de tránsito rodado, pero no incluidas en los apartados anteriores.

Las competencias que en materia de carreteras corresponden a la Generalitat encuentran su marco legal en la Constitución Española de 1978 y en el Estatuto de Autonomía de la Comunitat Valenciana. Son estas disposiciones en las que se ampara el Real Decreto 1627/1984, de 1 de agosto, sobre traspasos de funciones y servicios de la Administración del Estado a la Comunitat Valenciana en materia de carreteras (BOE nº 221, de 14 de septiembre de 1984).

La Constitución Española de 1978 establece que las comunidades autónomas podrán asumir competencias en materia de obras públicas de interés para ellas en su propio territorio (artículo 148.1.4); en materia de carreteras, sobre aquellas cuyo itinerario se desarrolle íntegramente en su territorio y, en los mismos términos, en materia de transporte por carretera (artículo 148.1.5). El Estatuto de Autonomía de la Comunitat Valenciana, aprobado por Ley Orgánica 5/1982, de 1 de julio, y modificado por Ley Orgánica 1/2006, de 10 de Abril, establece que la Generalitat tiene competencia exclusiva sobre las obras públicas que no tengan calificación legal de interés general del Estado o cuya realización no afecte a otra comunidad autónoma (artículo 49.13), y sobre las carreteras y caminos cuyo itinerario transcurra íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana (artículo 49.14).

Sobre las bases de estas previsiones constitucionales y estatutarias fueron transferidas a la Generalitat determinadas funciones y servicios de la Administración del Estado en materia de carreteras por medio del Real Decreto 1627/1984, de 1 de agosto, y, en concreto, la administración y gestión de las carreteras que pasan a ser titularidad de la Comunidad Autónoma, y las funciones que la Ley 51/1974 de Carreteras atribuye a los órganos de la Administración del

Estado: la facultad de proyectar, construir, conservar y explotar nuevas carreteras. Según este Decreto de transferencias se consideran en la red hasta entonces administrada por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo dos categorías:

- a.** Carreteras estatales: todas las que se encuentran integradas en itinerarios de interés general del Estado, definiéndose como tales los siguientes:
 - Los itinerarios de tráfico internacional, incluidos en los correspondientes convenios.
 - Los itinerarios de acceso a los principales pasos fronterizos.
 - Los itinerarios de acceso a los puertos de interés general del Estado y a los aeropuertos de interés general servidos por líneas regulares de tráfico.
 - Los itinerarios de enlace entre las comunidades autónomas peninsulares, a través de los principales núcleos de población del territorio del Estado, formando una red continua.
- b.** Carreteras de titularidad autonómica: aquellas cuyo itinerario se desarrolla íntegramente en el territorio de la Comunitat Valenciana y no forman parte de los itinerarios de interés general del Estado.

La tabla 1 recoge la distribución por provincias y por titularidad de las carreteras de la Comunitat Valenciana.

	ESTADO	GENERALITAT	DIPUTACIONES	TOTAL
Castellón	407	1.022	698	2.127
Valencia	816	825	1.937	3.578
Alicante	650	1.064	1.005	2.719
Total	1.873	2.911	3.640	8.424

Tabla 1. Longitud de las carreteras de la Comunitat Valenciana [km].

En términos de densidad de red (longitud de red / superficie), el mayor coeficiente corresponde a Alicante (0,4669), mientras que Valencia y Castellón tienen cifras prácticamente idénticas: 0,3308 y 0,3204), respectivamente (tabla 2). Los ratios longitud de red / número de habitantes se indican en la tabla 3.

	ESTADO	GENERALITAT	DIPUTACIONES	TOTAL
Castellón	0,0613	0,1539	0,1052	0,3204
Valencia	0,0755	0,0763	0,1791	0,3308
Alicante	0,1117	0,1827	0,1726	0,4669
Total	0,0805	0,1250	0,1564	0,3619

Tabla 2. Densidad de las redes viarias de la Comunitat Valenciana [km/km²].

	LONGITUD DE RED	Nº HABITANTES	RATIO
Castellón	2.127	573.282	0,00371
Valencia	3.578	2.486.483	0,00144
Alicante	2.719	1.825.264	0,00149
Total	8.424	4.885.029	0,00172

Tabla 3. Longitud de las redes viarias por número de habitantes en la Comunitat Valenciana [km/habitante].

Además de las redes de carreteras recogidas en las tablas 1, 2 y 3, ciertos caminos acondicionados y conservados por diversas administraciones (locales, agrarias, etc.) sirven de soporte a determinados tráficos interurbanos que en ocasiones llegan a ser apreciables.

La red estatal de la Comunitat Valenciana conecta ésta con las comunidades vecinas de Cataluña, Aragón, Castilla–La Mancha y Murcia. Además, existen tramos cuya finalidad consiste en proporcionar los principales accesos a los puertos de interés general del Estado: por ejemplo, la V-30, que comunica la A-7 con el puerto de Valencia. Las carreteras que conforman la red estatal en el territorio de la Comunitat Valenciana se recogen en la tabla 4.

A-23	A-3	N-IIIa
A-7	A-35	V-11
AP-7	N-220	V-21
CS-22	N-322	V-23
N-225	N-330	V-30
N-225a	N-332	V-31
N-232	N-337	A-31
N-234	N-344	A-70
N-238	N-420	A-77
N-340	N-III	N-325
		N-338

Tabla 4. Carreteras de la red del Estado en la Comunitat Valenciana.

La red autonómica tiene una longitud total de 6.551 km, estando gestionada por la Generalitat y por las tres Diputaciones provinciales. Jerárquicamente, se estructura en dos categorías:

- Red básica.
- Red local.

con 944 y 5.605 km, respectivamente.

Los principales ejes que configuran la red básica se detallan en la tabla 5A. Por otra parte, las carreteras de la red local que presentan mayores intensidades de tráfico se relacionan en la tabla 5B. En la tabla 6 se incluye un análisis de las carreteras de titularidad autonómica por rangos de intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD_P) en el carril de proyecto.

CASTELLÓN	CV-10 CV-11 CV-12 CV-13 CV-14 CV-15 CV-16 CV-17 CV-18 CV-20 CV-21 CV-25
VALENCIA	CV-25 CV-30 CV-31 CV-32 CV-33 CV-35 CV-36 CV-37 CV-40 CV-41 CV-42 CV-43 CV-50 CV-60 CV-81
ALICANTE	CV-70 CV-80 CV-81 CV-83 CV-84 CV-86 CV-91 CV-95

Tabla 5A. Principales carreteras de la red básica autonómica.

CASTELLÓN	CV-142 CV-150 CV-226 CV-260
VALENCIA	CV-310 CV-315 CV-320 CV-336 CV-368 CV-370 CV-375 CV-405 CV-406 CV-520 CV-680
ALICANTE	CV-737 CV-742 CV-743 CV-753 CV-909

Tabla 5B. Principales carreteras de la red local autonómica.

INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS PESADOS EN EL CARRIL DE PROYECTO	IMD _P ≥ 2.000	6,17%
	2.000 > IMD _P ≥ 800	17,30%
	800 > IMD _P ≥ 500	9,50%
	500 > IMD _P ≥ 200	18,60%
	200 > IMD _P ≥ 100	11,90%
	100 > IMD _P ≥ 50	10,90%
	50 > IMD _P ≥ 20	14,90%
	IMD _P < 20	10,60%

Tabla 6. Longitud [%] de red autonómica por rangos de IMD_P.

PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO



3. PARÁMETROS DE DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento de un firme requiere el conocimiento, entre otros, de los siguientes parámetros:

- El tráfico pesado: intensidad, composición, distribución de cargas y su configuración.
- Las características del cimiento del firme, y en particular su capacidad de soporte.
- Las condiciones climáticas que puedan afectar al comportamiento del firme.
- Las características de los materiales empleados en las distintas capas del firme.

3.1 TRÁFICO

La sección de firme de una carretera de nueva construcción debe adecuarse, entre otros parámetros, al nivel de las solicitaciones de tráfico pesado previsto durante la vida útil establecida para aquélla. A los efectos del dimensionamiento práctico de la sección de firme, dicho nivel de solicitaciones se representa mediante la denominada “categoría de tráfico pesado” (apartado 3.1.4).

3.1.1 Estudios de tráfico. Niveles de información

Para la determinación de la categoría de tráfico pesado se empleará la información a la que se hace referencia a continuación, estableciéndose, en función de su cantidad, procedencia, fiabilidad y actualización, tres niveles de calidad de dicha información:

1. **Nivel inferior**, si se dispone únicamente de:
 - Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio (IMD_p).
2. **Nivel medio**, si se dispone de:
 - Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio (IMD_p).
 - Coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado (CAM).
3. **Nivel superior**, si se dispone al menos de:
 - Espectro completo del tráfico pesado.
 - Estudio de velocidades de circulación.
 - Distribución temporal del tráfico pesado.

En cualquiera de los casos, es preceptiva la elaboración de un estudio de evolución del tráfico pesado, en el cual se contemplará el tráfico inducido y el generado en los meses siguientes a la puesta en servicio, especialmente en el caso de obras de duplicación de calzada, así como el que pudiera derivarse de otras actuaciones incluidas en el Plan de Infraestructuras Estratégicas de la Comunitat Valenciana (*PIE*). En el caso de no disponer de datos concretos sobre la evolución del tráfico pesado o de su asignación a los distintos carriles de la calzada, se adoptarán las siguientes hipótesis:

- La tasa de crecimiento del tráfico pesado puede considerarse constante e igual al valor medio de las obtenidas en los últimos cinco años en la estación de aforo permanente o de control (primaria o secundaria) más próxima a la zona de estudio y localizada en el mismo itinerario. Esta misma tasa de crecimiento se empleará para determinar la IMD_P en el año de puesta en servicio.
- Puede considerarse que el año de puesta en servicio es el tercero a partir de la fecha de redacción del proyecto.
- En caso de construcción de vías de dos calzadas mediante la duplicación de una carretera convencional, se considerará en el año de la puesta en servicio un incremento adicional del tráfico pesado del 7%.
- En calzadas de dos carriles y con doble sentido de circulación, incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados que circulan por la calzada.
- En calzadas de dos carriles por sentido de circulación, incide sobre el carril exterior la totalidad de los vehículos pesados que circulan por la calzada.
- En calzadas de tres o más carriles por sentido de circulación, incide sobre el carril exterior el 85 % de los vehículos pesados que circulan por la calzada.

3.1.2 Tráfico equivalente de proyecto

El dimensionamiento de la estructura del firme requiere adoptar una carga tipo de cálculo; a efectos de aplicación de esta norma, se considera como referencia un eje simple con ruedas gemelas y carga total de 128 kN, con la configuración precisa definida en el apartado 5.2.

El tráfico equivalente de proyecto (TEP_{128kN}) es un concepto aplicable a los niveles de información medio y superior que se define como el número acumulado de ejes equivalentes de 128 kN (EE_{128kN}) previsto para el carril de proyecto durante el período de diseño del firme. Para el nivel de información medio, cuando no se dispongan de otros datos acerca de la evolución del tráfico pesado, el tráfico equivalente de proyecto se obtendrá a partir de la expresión:

$$TEP_{128kN} = IMD_P \cdot 365 \cdot CAM \cdot \frac{(1+r)^{VD} - 1}{r}$$

en la cual r es la tasa de crecimiento del tráfico pesado (en tanto por uno), VD es el período de diseño de la sección de firme, y CAM es el coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado, definido de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.1.3.

El período de diseño será en general diferente para firmes flexibles y semirrígidos que para firmes rígidos. Salvo justificación en contra por parte del proyectista, el período de diseño será:

- Firmes flexibles y semirrígidos: 20 años.
- Firmes rígidos: 30 años.

En el caso del nivel de información superior, para cada una de las categorías de vehículo pesado i (TEP_{128kNi}), se calculará el número de ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de proyecto mediante la siguiente expresión:

$$TEP_{128kN} = IMD_{Pi} \cdot 365 \cdot CAM_i \cdot \frac{(1+r)^{ND} - 1}{r}$$

donde IMD_{Pi} representa la intensidad media diaria de vehículos pesados de cada categoría considerada i , en el carril de proyecto y en el año de puesta en servicio, y CAM_i representa el coeficiente de agresividad medio correspondiente a dicha categoría i , calculado tal y como se indica en el apartado 3.1.3. El número total de ejes equivalentes de 128 kN acumulados durante el período de diseño de la sección, es decir, el tráfico equivalente de proyecto (TEP_{128kN}), en base al cual se establecerá la categoría de tráfico pesado para el dimensionamiento del firme, de acuerdo con la tabla 9, se obtendrá como resultado de la siguiente expresión:

$$TEP_{128kN} = \sum TEP_{128kNi}$$

3.1.3 Agresividad del tráfico pesado

El efecto de un vehículo pesado sobre el firme depende fundamentalmente de la configuración de los ejes (simple, doble, triple), de la carga de cada eje y del tipo de firme.

A efectos del dimensionamiento de la sección de un firme, el coeficiente de agresividad de un vehículo pesado se define como el número de ejes equivalentes de 128 kN que ejercen el mismo daño sobre el firme que el producido por el conjunto de sus ejes. El valor promedio de los coeficientes de agresividad (CA) de los vehículos pesados que circulan sobre una sección de firme se denomina coeficiente de agresividad medio (CAM).

Cuando no se disponga de ninguna información relativa al coeficiente de agresividad medio (CAM), podrán emplearse los valores genéricamente establecidos para la red de carreteras de la Comunitat Valenciana, que figuran en la tabla 7, en función de la propia categoría de tráfico pesado y del tipo de firme.

Para el nivel de información superior, a partir de los datos recogidos en campañas de aforo y de pesaje dinámico se establecerá el espectro del tráfico pesado previsto para la carretera en cuestión, es decir, se definirá la composición detallada del tráfico pesado, la

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
FIRME	Flexible	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
	Semirrígido y rígido	1,0	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4

Tabla 7. Coeficiente de agresividad medio del tráfico pesado (CAM).

disposición, tipo y magnitud de las masas de sus ejes, y la velocidad de paso por la estación, distinguiendo al menos entre las siguientes categorías de vehículos:

- Vehículos rígidos de dos ejes.
- Vehículos rígidos de tres ejes.
- Vehículos rígidos o articulados de cuatro ejes.
- Vehículos articulados de cinco ejes.
- Vehículos articulados o trenes de carretera de más de cinco ejes.

A partir de estos datos, para cada vehículo pesado considerado individualmente, se calculará su coeficiente de agresividad (CA) como la suma de los ejes equivalentes de 128 kN que ejercen el mismo daño sobre el firme que cada uno de los ejes reales correspondientes a esa configuración.

A estos efectos, se considera que un eje simple que soporta un peso total P_i [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la siguiente expresión:

$$EE_{128kN} = \left(\frac{P_i}{128} \right)^a$$

Análogamente, se considera que un eje doble (tándem) que soporta un peso total P_j [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la expresión:

$$EE_{128kN} = 1,4 \cdot \left(\frac{P_j/2}{128} \right)^a$$

Del mismo modo, un eje triple (trídem) que soporta un peso total P_k [kN] ejerce sobre el firme un daño igual al que produciría un número de ejes equivalentes de 128 kN dado por la expresión:

$$EE_{128kN} = 2,3 \cdot \left(\frac{P_k/3}{128} \right)^a$$

En las relaciones anteriores, α es un exponente que depende del tipo de firme:

- Firmes flexibles: $\alpha = 4$
- Firmes semirrígidos y rígidos: $\alpha = 8$

Para cada categoría de vehículo pesado i , se determinará su coeficiente de agresividad medio (CAM_i), como el promedio de los coeficientes de agresividad (CA) de los vehículos pesados correspondientes a dicha categoría.

3.1.4 Categorías de tráfico pesado

A los efectos de aplicación de esta norma se definen nueve categorías de tráfico pesado, según la IMD_P que se prevea para el carril de proyecto en el año de puesta en servicio para el nivel inferior de información, o bien según el tráfico equivalente de proyecto (TEP_{128kN}), para los niveles medio y superior de información.

Las tablas 8 y 9 presentan dichas categorías de tráfico para los niveles inferior, y medio y superior, respectivamente.

La tabla 9 se ha obtenido suponiendo una tasa media anual del crecimiento del tráfico igual al 4,0 %, un período de proyecto de 20 años para los firmes flexibles y semirrígidos y de 30 años para los rígidos, y los coeficientes de agresividad media del tráfico pesado indicados en la tabla 7.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
IMD_P	≥ 4.000	< 4.000 ≥ 2.000	< 2.000 ≥ 800	< 800 ≥ 500	< 500 ≥ 200	< 200 ≥ 100	< 100 ≥ 50	< 50 ≥ 20	< 20

Tabla 8. Categorías de tráfico pesado. Nivel inferior de información.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T21	T22	T31	T32	T41	T42
TEP_{128kN} [10 ⁶]	Flexible	$\geq 30,4$	$< 30,4$ $\geq 15,2$	$< 15,2$ $\geq 4,35$	$< 4,35$ $\geq 2,72$	$< 2,72$ $\geq 1,09$	$< 1,09$ $\geq 0,543$	$< 0,217$ $\geq 0,054$	$< 0,054$
		$\geq 39,1$	$< 39,1$ $\geq 19,6$	$< 19,6$ $\geq 6,09$	$< 6,09$ $\geq 3,80$	$< 3,80$ $\geq 1,52$	$< 1,52$ $\geq 0,761$	$< 0,272$ $\geq 0,109$	$< 0,109$
	Rígido	$\geq 73,7$	$< 73,7$ $\geq 36,8$	$< 36,8$ $\geq 11,5$	$< 11,5$ $\geq 7,16$	$< 7,16$ $\geq 2,87$	$< 2,87$ $\geq 1,43$	$< 1,43$ $\geq 0,5127$	$< 0,512$ $\geq 0,164$

Tabla 9. Categorías de tráfico pesado. Niveles medio y superior de información.

3.2 EL CIMIENTO DEL FIRME

Se denomina explanada a la superficie de apoyo del firme. Por tanto, la explanada es la parte superior del cimiento del firme. Este cimiento está constituido en general por los propios suelos o la roca de la traza, por un suelo de aportación o, al menos en su parte superior, por un suelo estabilizado in situ; ocasionalmente, el cimiento del firme puede ser el tablero de una estructura, aunque esta situación está excluida del objeto de esta norma.

Tradicionalmente se ha identificado el cimiento con la coronación del relleno o con la parte superior del fondo del desmonte, hasta una profundidad de 50 cm. En el estado actual de la técnica se debe considerar como parte del cimiento todo el espesor de materiales bajo la explanada cuyo comportamiento pueda influir en el del firme. Aunque ese espesor depende tanto de la naturaleza de los materiales como de la del firme, puede admitirse que llega hasta los 2 m.

En la formación de la explanada el objetivo debe ser conseguir una superficie:

- con geometría definida, de manera que el espesor de la capa inferior del firme pueda ser sensiblemente uniforme;
- poco sensible a los cambios de humedad;
- con unas pendientes que permitan desaguar por gravedad el caudal que pueda infiltrarse a través del firme.

3.2.1 Materiales naturales

A los efectos de la formación de las explanadas, se consideran seis tipos de materiales naturales, según las características definidas en el artículo 330 del PG-3 del Ministerio de Fomento:

- **M: Suelos marginales o inadecuados.**
- **0: Suelos tolerables** (con $\text{CBR} \geq 3$).
- **1: Suelos adecuados** (con $\text{CBR} \geq 5$, excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas, en cuyo caso deberán tener $\text{CBR} \geq 6$).
- **2: Suelos seleccionados** (con $\text{CBR} \geq 10$, excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas de categoría E2, en cuyo caso deberán tener $\text{CBR} \geq 12$).
- **3: Suelos seleccionados** (con $\text{CBR} \geq 20$, excepto cuando se dispongan en la capa superior de las empleadas en la formación de las explanadas de categoría E3, en cuyo caso deberán tener $\text{CBR} \geq 30$).
- **R: Roca.**

3.2.2 Estabilización de suelos

A los efectos de la formación de las explanadas, se consideran tres tipos de materiales estabilizados, según las características definidas en el artículo 512 del PG-3 del Ministerio de Fomento:

- **S-EST1:** Suelos estabilizados in situ con cal o con cemento (con $\text{CBR} \geq 6$ a los 7 días, y un mínimo del 2,0 % de cal o de cemento).
- **S-EST2:** Suelos estabilizados in situ con cal o con cemento (con $\text{CBR} \geq 12$ a los 7 días, y un mínimo del 3,0 % de cal o de cemento).
- **S-EST3:** Suelos estabilizados in situ con cemento (con una resistencia a compresión simple de al menos 1,5 MPa a los 7 días, y un mínimo del 3,0 % de cemento).

3.2.3 Categorías de explanada

A efectos de definir la estructura del firme en cada caso, se establecen cuatro categorías de explanada, denominadas respectivamente E1, E2, E3 y E4, las cuales podrán formarse de alguna de las maneras definidas en el apartado 3.2.4.

La categoría de la explanada se determinará a partir de los resultados de ensayos de auscultación de la deflexión mediante un deflectómetro de impacto configurado para ejercer una carga de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diámetro, o equivalente en términos de presión de contacto sobre la superficie.

A partir de las deflexiones registradas por el deflectómetro, se calculará el módulo elástico de superficie del cimiento del firme, que representa su rigidez equivalente, aplicando la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

donde E_0 es el módulo elástico de superficie del cimiento del firme, ν es el coeficiente de *Poisson* considerado, que depende de la propia categoría de la explanada, σ_0 es la presión aplicada sobre la superficie, y d_0 la deflexión registrada bajo el punto de aplicación de la carga.

Las categorías de la explanada se definirán en base a los siguientes valores de referencia de los módulos elásticos de superficie:

- **E1:** $E_{0,ck} \geq 100$ MPa; $\nu = 0,40$
- **E2:** $E_{0,ck} \geq 140$ MPa; $\nu = 0,40$
- **E3:** $E_{0,ck} \geq 255$ MPa; $\nu = 0,35$
- **E4:** $E_{0,ck} \geq 440$ MPa; $\nu = 0,30$

Los rangos anteriores se refieren al valor característico del módulo elástico de superficie $E_{0,ck}$ obtenido como la media (m) menos una vez la desviación típica (s) de los resultados de al menos siete ensayos en el caso de longitudes de explanada a evaluar inferiores a 500 m, de diez ensayos para longitudes entre 500 y 1.000 m, o del número de ensayos que se obtenga como resultado de dividir entre 100 la longitud a evaluar cuando ésta sea superior a 1.000 m, es decir, realizando un ensayo cada 100 m. Estas longitudes deben entenderse referidas a tramos de formación o capacidad de soporte homogénea de las explanadas, para cuya definición deben emplearse los métodos estadísticos oportunos a partir de los resultados obtenidos en los ensayos.

Para poder establecer la categoría de la explanada por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

En caso de no disponerse de deflectómetro de impacto, se podrán emplear los módulos de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga de ensayos de carga con placa definidos en la norma NLT-357, con los siguientes valores de referencia:

- **E1:** $E_{v2} \geq 50$ MPa.
- **E2:** $E_{v2} \geq 100$ MPa.
- **E3:** $E_{v2} \geq 225$ MPa.
- **E4:** $E_{v2} \geq 425$ MPa.

3.2.4 Formación de explanadas

En la figura 1 se recogen las distintas posibilidades de formación de explanadas. En dicha figura, el espesor mínimo considerado de un suelo determinado en el terreno subyacente es de 1 m, al que hay que sumar los espesores de los materiales aportados o estabilizados que se indican explícitamente en cada caso.

Las explanadas E1 se podrán formar, cualquiera que sea la naturaleza del terreno subyacente, utilizando en la parte superior del cimiento suelos adecuados (o mejores) con CBR igual o mayor de 6 o suelos estabilizados in situ con cal o con cemento del tipo S-EST1.

Las explanadas E2 se podrán formar, cualquiera que sea la naturaleza del terreno subyacente, utilizando en la parte superior del cimiento suelos seleccionados con CBR igual o mayor de 12 o suelos estabilizados in situ con cal o con cemento del tipo S-EST2.

Las explanadas E3 se podrán formar, siempre que el terreno subyacente esté formado por suelos adecuados o materiales de mejor calidad, utilizando en la parte superior del cimiento suelos seleccionados con un CBR igual o mayor de 30.

Las explanadas E4 se podrán formar, siempre que el terreno subyacente esté formado por suelos adecuados o materiales de mejor calidad, utilizando en la parte superior del cimientto suelos estabilizados in situ con cemento del tipo S-EST3.

Si los terrenos subyacentes están constituidos por suelos inadecuados, marginales o tolerables, sólo se podrán formar sin restricciones explanadas de categoría E1 o E2.

En las categorías de explanada E3 y E4, la naturaleza de la capa de subbase vendrá condicionada por la naturaleza de la explanada: sobre explanadas constituidas por suelos naturales (E3) sólo se podrán disponer subbases de zahorra, y sobre explanadas estabilizadas (E4) sólo se podrán disponer subbases de suelocemento, excepto bajo pavimentos de hormigón para categorías de tráfico pesado T31 e inferiores.

En las categorías de explanada E2, la naturaleza de la capa de subbase vendrá determinada preferentemente por la naturaleza de la explanada. Sobre explanadas constituidas por suelos naturales se dispondrán preferentemente subbases de zahorra, y sobre explanadas estabilizadas se dispondrán preferentemente subbases de suelocemento

En el caso de pedraplenes y rellenos todouno, 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 E2 o E3, según el CBR de dicho suelo seleccionado. Para conseguir una explanada E4, deberá estabilizarse su parte superior (S-EST3) en un espesor de 25 cm si se emplean suelos seleccionados del tipo 3, o en 30 cm si se emplean suelos seleccionados del tipo 2. Únicamente en este caso de estabilizar un espesor de 30 cm se podrán emplear en la coronación suelos adecuados. Alternativamente, se podrá formar también la explanada E4 disponiendo directamente sobre la transición un suelocemento fabricado en central con un espesor mínimo de 15 cm.

Salvo justificación en contrario, a los efectos de la definición de las secciones de firme empleando el catálogo incluido en el apartado 6.1, se unificarán las explanadas por su categoría, independientemente del tipo de obra de tierra subyacente y de las características y espesores de los materiales que la formen, de tal manera que no haya tramos diferenciados en el proyecto de longitud inferior a 500 m.

TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANACIÓN (DESMMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-JUNO)					
SUELOS MARGINALES O INADECUADOS (M)	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 (únicamente suelos seleccionados 2)</p>		
E3			<p>Espesor mínimo de 100 cm (únicamente suelos seleccionados 3)</p>		
E4					

M Suelos marginales o inadecuados (Art. 330 del PG-3)

S-EST 1 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

0 Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)

S-EST 2 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

1 Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)

S-EST 3 Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)

2 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

3 Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)

HM Hormigón (Art. 610 del PG-3)

R Roca

ZA Zahorra artificial

BC Suelocemento

Espesores mínimos en centímetros

Figura 1. Formación de la explanada.

3.3 CLIMA

Las condiciones climáticas de la zona en la que se ubica una carretera afectan al dimensionamiento del firme en diferentes aspectos, tal y como se indica en el apartado 5.3, por lo que deberán ser consideradas por el proyectista. Hay que tener en cuenta que aunque la Comunitat Valenciana cuenta en general con un clima benigno, se dan marcados signos de continentalidad en las zonas del interior así como notables episodios de lluvias torrenciales en los meses de primavera y otoño.

A los efectos del dimensionamiento del firme se han establecido en la Comunitat Valenciana cuatro zonas térmicas, en función de las temperaturas ambientales máxima y mínima anuales, y dos zonas pluviométricas, en función de la precipitación media anual.

ZONA TÉRMICA	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
$T_{MÁX}$	≤ 28	> 28 y ≤ 32	> 28 y ≤ 32	> 32
$T_{mín}$	< -6	< -6	≥ -6	–

Tabla 10. Zonas térmicas.

ZONA PLUVIOMÉTRICA	ZP1	ZP2
P	< 600	≥ 600

Tabla 11. Zonas pluviométricas.

Siendo:

- $T_{MÁX}$: máxima anual de las medias mensuales de las temperaturas máximas diarias, en °C, para un período de medida continuado de 30 años.
- $T_{mín}$: mínima anual de las medias mensuales de las temperaturas mínimas diarias, en °C, para un período de medida continuado de 30 años.
- P : precipitación media anual, en mm, para un período de medida continuado de 30 años.

Para la determinación de las zonas térmica y pluviométrica a considerar se analizarán las series de datos disponibles en la estación meteorológica representativa más cercana. Cuando la longitud de la carretera a proyectar sea tal que haya más de una estación representativa, en ningún caso se podrá realizar un promedio de los datos de las mismas, siendo preceptiva la división de la carretera en tramos, cuyos límites, a efectos de definición de las zonas climáticas, estarán determinados por los límites de influencia de cada una de las estaciones.

En caso de no disponer de series de datos de las estaciones meteorológicas próximas representativas, o de que dicha serie de datos no abarque un período mínimo de 30 años, podrá establecerse la clasificación de la zona climática mediante los mapas genéricos que se han elaborado para la Comunitat Valenciana y que se incluyen en las figuras 2 y 3.

Cuando la serie de datos exista y abarque un período de al menos 30 años, pero no sea continuada, se deberán completar los datos mediante la utilización justificada de las herramientas estadísticas oportunas. En ningún caso se podrán completar series en las que la ausencia de datos abarque un período de 5 años continuos.



Figura 3. Zonas pluviométricas de la Comunitat Valenciana.

TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO



4. TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento o diseño estructural del firme es una parte de los estudios técnicos que hay que acometer en la redacción de un proyecto de carreteras. El dimensionamiento va más allá de la simple elección del espesor de las capas que componen la sección estructural: las exigencias relativas a los materiales empleados, a los procesos de puesta en obra y al control de calidad de la unidad de obra terminada influyen decisivamente en que la capacidad estructural sea la prevista, por lo que deberán ser tenidas en cuenta durante todo el proceso.

El ingeniero deberá conocer con la mayor precisión posible todos los factores de diseño: vida útil, solicitaciones del tráfico pesado, capacidad de soporte del cimiento del firme, características mecánicas de los materiales que forman parte de las capas del firme y condiciones climáticas que pueden afectar a su comportamiento. Además, hay otros factores, no estrictamente técnicos, que el ingeniero habrá de valorar (situación geográfica, económica y ambiental de la carretera cuyo firme va a proyectar), ya que pueden condicionar algunas decisiones en el proceso de dimensionamiento.

El conjunto de cuestiones que es necesario analizar en el dimensionamiento del firme se considerarán globalmente, pues en cada una de las fases las decisiones que se adopten pueden afectar y condicionar a las tomadas en fases anteriores; por tanto, el dimensionamiento debe ser planteado como un proceso dinámico y permanentemente retroalimentado.

Esta norma prioriza el dimensionamiento del firme mediante métodos analíticos, cuya utilización debe ajustarse necesariamente al siguiente esquema:

1. Análisis de datos previos: estudios anteriores y experiencias en la zona de estudio.
2. Evaluación de condicionantes del proyecto: técnicos, económicos, geográficos y de cualquier otra índole que puedan afectar al dimensionamiento.
3. Prediseño: definición inicial de la sección de firme en base a las conclusiones de los análisis anteriores, teniendo en cuenta las especificaciones y recomendaciones sobre espesores máximos y mínimos de las distintas capas.
4. Definición de la capa de rodadura según los criterios funcionales que sea necesario satisfacer.
5. Modelización mecánica de las capas del firme y de su cimiento, de acuerdo con lo establecido en el apartado correspondiente de esta norma.
6. Cálculo de la respuesta estructural del firme, empleando una aplicación informática que tenga las características requeridas.

7. Comprobación de la vida útil del firme para los tipos de deterioro considerados, empleando para ello las leyes de fatiga o de deformación apropiadas (o las que correspondan, en caso de considerar otros deterioros).
8. Análisis de sensibilidad de los factores que el proyectista considere que su dispersión en la puesta en obra pueda suponer una merma en la capacidad estructural o funcional del firme: módulos elásticos, espesores de capas, resistencias a flexotracción de los materiales con cemento, condiciones de adherencia entre las capas, capacidad de soporte del cimiento del firme, etc.
9. Ajuste de espesores, de acuerdo a criterios constructivos o técnicos.
10. Definición de la sección transversal del firme (realizando un diseño específico para los arceles), junto con su sistema de drenaje si se requiere.

En los procesos de dimensionamiento o diseño estructural de los firmes, tanto si se emplean métodos empíricos como si se utilizan métodos analíticos, se deben distinguir dos tipos de estudios, según su nivel de detalle:

- **Estudios preliminares.** Su objetivo fundamental es estimar el coste total del proyecto. En este caso, los estudios geotécnicos, de caracterización del cimiento, de materiales, de tráfico y, en definitiva, todos los necesarios para la definición detallada del firme, no estarán aún disponibles, por lo que la sección se dimensionará, generalmente, por analogía con otros casos similares.
- **Estudios detallados.** En ellos se deben definir todas y cada una de las características técnicas del firme: cimiento, materiales y espesores de las capas, exigencias particulares que se deben plantear, etc. Estos estudios serán organizados en las siguientes fases:
 - definición de tramos homogéneos,
 - estudio del cimiento del firme y de formación de la explanada,
 - diseño propiamente dicho de las posibles secciones estructurales del firme,
 - análisis de los factores que sean necesarios para la toma de decisiones: condiciones locales, análisis de costes de construcción y de conservación, etc.

Las cuestiones básicas que han de analizarse al llevar a cabo el proceso son las siguientes:

- Calidad de servicio que se pretende dar, con lo que ineludiblemente se debe abordar el plan de conservación del firme (deseablemente en el marco de un sistema de gestión).
- Estrategias de inversión que puedan estar impuestas, y que condicionarán la definición del período de proyecto (vida de servicio o vida útil).
- Tipos de materiales que puedan utilizarse en la sección del firme. Sin excluir que el proyectista pueda considerar otros, los tipos de materiales sobre los que se apoya el desarrollo de esta norma son los siguientes:

- Mezclas bituminosas y otros materiales tratados con ligantes hidrocarbonados.
- Hormigones, hormigones magros y otros materiales tratados con conglomerantes hidráulicos.
- Materiales granulares no tratados.
- Suelos.

En concreto, las secciones que se incluyen en el catálogo propuesto en esta norma (cuya intención es la de constituir una referencia para el dimensionamiento analítico) se basan en el empleo de las siguientes unidades de obra:

- Mezclas bituminosas.
- Hormigones.
- Hormigones magros.
- Materiales con cemento.
- Zahorras artificiales.

En cualquier caso, el proyectista podrá justificar el empleo de materiales diferentes (nuevos o tradicionales) si son avalados por los correspondientes estudios y análisis que garanticen un correcto comportamiento de las secciones de firme constituidas con ellos.

El proyectista valorará todas las cuestiones de ingeniería y constructivas involucradas antes de abordar el diseño del firme, relacionando éste con otras partes del proyecto y garantizando su compatibilidad con lo establecido en ellas:

- **Geometría de la carretera.** Las anchuras de los carriles y de los arcenes deben ser conocidos por el proyectista del firme y éste debe tener en cuenta las opciones o posibilidades futuras de ampliación de la calzada, lo que puede afectar especialmente al dimensionamiento del arcén. Por otro lado, valores elevados de la pendiente longitudinal son un importante aspecto a considerar, ya que velocidades bajas del tráfico pesado en las rampas producen tensiones y deformaciones elevadas en la estructura del firme, las cuales requieren consideraciones especiales sobre el comportamiento de los materiales.
- **Movimientos de tierras.** Se debe tener en cuenta la evaluación previa de la magnitud de los movimientos de tierras, valorando la distribución lineal de desmontes y terraplenes, así como su altura y la naturaleza prevista de los fondos de desmonte.
- **Recogida y drenaje de las aguas** que puedan llegar al firme, bien desde la superficie, bien desde capas freáticas.
- **Consideraciones constructivas.** Los plazos disponibles para la ejecución de las obras pueden alterar la estrategia para la selección del tipo de firme. Por otra parte, las capacidades y la experiencia de los constructores locales y la disponibilidad de materiales de la zona deben ser tenidas en cuenta, en particular en proyectos pequeños.
- **Capa de rodadura.** Además de establecer la capacidad estructural del firme y su duración prevista, el proyectista debe definir en detalle la capa de rodadura, cuyas exi-

gencias dependerán de la categoría de la carretera, de su geometría, del nivel de cargas que deba soportar, del clima de la zona, etc. Los tipos de capas de rodadura que se consideran en esta norma son los siguientes:

- Mezclas bituminosas drenantes.
- Mezclas bituminosas en capas de pequeño espesor.
- Mezclas tipo hormigón asfáltico.
- Riegos con gravilla.
- Lechadas bituminosas.
- Hormigones con distintas técnicas de acabado superficial.

En todo caso, las características superficiales mínimas a exigir serán las siguientes:

- La regularidad superficial (valorada mediante el IRI).
- La macrotextura (valorada por la MPD o mediante la altura de arena, MTD).
- La resistencia al deslizamiento (valorada mediante el CRT o mediante el CRL).

DIRECTRICES PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANALÍTICO



5. DIRECTRICES PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANALÍTICO

Esta norma pretende proporcionar al proyectista las herramientas necesarias para que éste pueda definir, en cada caso particular, la sección de firme que mejor se adapte a los condicionantes técnicos, económicos, de disponibilidad de materiales o de cualquier otra índole de la obra considerada. Por ello, se incluyen en este capítulo directrices para el dimensionamiento de las secciones mediante métodos analíticos.

5.1 INTRODUCCIÓN

Como en todo proceso de diseño estructural, para el dimensionamiento analítico de los firmes se requiere:

- Una teoría para predecir los estados de deterioro o fallo de la estructura.
- Una caracterización de las propiedades de los materiales acorde con la teoría seleccionada.
- Una forma de determinar las relaciones entre las magnitudes de los parámetros para conseguir el comportamiento deseado.

La teoría que se asume en esta norma es la de considerar los firmes como sistemas multicapa elásticos sometidos a las acciones del tráfico pesado. Para definir dichos sistemas se adoptan los siguientes supuestos básicos (hipótesis de *Burmister*):

- Las capas del firme y en su caso del cimiento son de amplitud indefinida en el plano horizontal.
- Las capas tienen un espesor uniforme.
- La última capa (la inferior de las consideradas en el cimiento) es infinita en sentido vertical (y se caracteriza como un espacio semiindefinido de *Boussinesq*).
- Las distintas capas están compuestas por materiales elásticos lineales, homogéneos e isótropos; estos materiales se caracterizan mediante su *módulo de elasticidad* (E) y su *coeficiente de Poisson* (ν).

Se aceptan además en la modelización las siguientes simplificaciones:

- Cada una de las cargas que actúa sobre el firme se representa mediante una presión distribuida uniformemente sobre un área circular en la superficie del pavimento.

- Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre las capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales), parcial o nula.
- Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos (con las salvedades que se indican más adelante para los pavimentos de hormigón).
- Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas, de modo que no alteran las hipótesis anteriores.
- No se consideran los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento.
- No se considera la masa propia del firme.

En el caso de los firmes rígidos, la presencia de juntas (o de las fisuras cosidas mediante las armaduras en los pavimentos armados continuos) hace que en rigor la teoría multicapa no pueda ser aplicada en los mismos. No obstante, las tensiones máximas que se originan en ellos pueden ser evaluadas con suficiente aproximación aplicando a los resultados del análisis multicapa los coeficientes de mayoración que se indican más adelante.

Con estas hipótesis y simplificaciones, las ecuaciones en derivadas parciales que resultan del planteamiento del problema se resuelven mediante transformadas. La respuesta de la estructura se obtiene entonces en forma de integrales definidas que se resuelven numéricamente. Para ello, se utilizan aplicaciones informáticas de las que existen muchas versiones en el mercado (bastantes de ellas de acceso gratuito en Internet).

Para saber si el firme prediseñado está correctamente dimensionado, es decir, si el espesor de las capas es suficiente, se empieza determinando el estado tensional producido por una carga tipo. La carga tipo se fija a partir de las regulaciones sobre masas de los vehículos pesados y presiones de inflado de los neumáticos; en España, la regulación es la que se establece en el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de Diciembre. A efectos de la aplicación de esta norma, se considera que la carga máxima por eje simple de referencia es de 13 t o 128 kN, y que la presión máxima de inflado permitida es de 900 kPa.

A partir de los valores de las tensiones y de las deformaciones obtenidas en el cálculo se determina el número N_f de veces que el firme es capaz de soportar la aplicación de la carga tipo mediante un análisis de fatiga o de deformaciones. Para ello se han debido establecer previamente las *funciones de transferencia* (leyes de fatiga o leyes de deformación) de los materiales que componen el firme. El valor de N_f debe ser superior al número N_f de aplicaciones de carga previstas durante el período de proyecto (es decir, el tráfico equivalente de proyecto), deducidas del estudio de tráfico correspondiente, de acuerdo con el apartado 3.1 de esta norma.

En el análisis de los firmes rígidos, los resultados del análisis multicapa deben mayorarse mediante un coeficiente que depende del tipo de pavimento de hormigón. Los valores de dichos coeficientes son los que se indican a continuación:

- Pavimentos de hormigón en masa con juntas sin pasadores: 1,75.
- Pavimentos de hormigón en masa con juntas con pasadores: 1,45.
- Pavimentos continuos de hormigón armado: 1,20.

Las citadas *funciones de transferencia* son expresiones matemáticas obtenidas a partir de ensayos de laboratorio y que deben ser calibradas en estudios a escala real, con las que se determina el número N_f de aplicaciones de la carga tipo que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural por fatiga, o al valor límite de deformaciones plásticas acumuladas, a partir de ciertos *parámetros críticos* que forman parte de la respuesta del material a la sollicitación. En la práctica del diseño estructural de los firmes dichas funciones se obtienen de la literatura técnica, salvo que la normativa que se utilice prescriba el empleo de unas funciones determinadas.

En el dimensionamiento analítico de firmes se suele aceptar el concepto de daño acumulado de acuerdo a la hipótesis de *Miner*, según la cual si una capa con un módulo de elasticidad E_i y un coeficiente de *Poisson* ν es capaz de soportar N_{ij} aplicaciones de la carga tipo j , la fracción de daño producido por n_{ij} aplicaciones de dicha carga será:

$$d_j = \frac{n_j}{N_{ij}}$$

de modo que el agotamiento estructural de la capa se producirá cuando se verifique la igualdad:

$$\sum_j d_j = 1$$

5.2 CARGA TIPO Y TRÁFICO DE PROYECTO

El conocimiento del tráfico de vehículos pesados que solicitarán la sección estructural del firme es fundamental desde dos puntos de vista: por un lado, la categoría de tráfico pesado considerada supone un criterio para la definición de las exigencias de calidad que deben ofrecer los materiales empleados en la construcción del firme; por otro lado, el tráfico pesado representa un parámetro fundamental en el análisis del comportamiento a fatiga o frente a deformaciones de la sección del firme.

A los efectos de establecer las exigencias a los materiales que constituirán la sección será suficiente la definición de la categoría de tráfico pesado, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.1 de esta norma, teniendo en cuenta el nivel de información de tráfico adoptado. Sin embargo, para llevar a cabo el cálculo de la sección de firme, el proyectista debe conocer el *Tráfico Equivalente de Proyecto*, el cual se expresará como el número de ejes equivalentes de 128 kN que debe soportar la sección de firme a lo largo de su

vida de proyecto (TEP_{128kN}), en función de lo establecido en el apartado 3.1 de esta norma y determinado de acuerdo con el nivel de información de tráfico adoptado.

Se considera que el eje equivalente es un eje simple, con ruedas gemelas y una carga total de 128 kN. Según lo expuesto más arriba, se asume que la carga por rueda se aplica sobre un área circular y también, con carácter general, que la presión de contacto es igual a la presión de inflado del neumático (algo que no es exacto, pero que ofrece una estimación suficientemente aproximada para utilizarla en el cálculo, que queda del lado de la seguridad).

La relación entre el radio de la superficie circular de contacto, la carga total por rueda y la presión de contacto es la siguiente:

$$P = q \cdot \pi \cdot R^2 \rightarrow R = \sqrt{\frac{P}{q \cdot \pi}}$$

siendo:

- **P**: carga sobre la rueda [N].
- **q**: presión de contacto (aproximadamente igual a la de inflado) [Pa].
- **R**: radio de la superficie circular de contacto [m].

Para un eje equivalente de 128 kN, se tienen, por tanto, los siguientes valores en cada rueda:

- $P = \frac{128.000}{4} = 32.000 \text{ N}$
- $q = 900 \text{ kPa}$
- $R = 10,64 \text{ cm}$

A efectos de cálculo se emplea una carga de dos ruedas de 32.000 N cada una, con una separación entre sus respectivos centros igual a tres radios, es decir, 31,92 cm (de modo que existe una separación entre los bordes interiores de ambas ruedas igual a un radio, es decir, 10,64 cm). El punto medio de aplicación de las cargas está localizado a una distancia de 15,96 cm de cada uno de los centros de las ruedas, tal y como se indica en la figura 4.

El proyectista podrá, cuando las configuraciones de los vehículos pesados en su caso particular sean diferentes a éstas, y en base a estudios de tráfico debidamente justificados, emplear otros valores de carga por rueda, de presión de inflado y de distribución de carga. En ese caso, deberá justificar adecuadamente la adopción de un nuevo eje de referencia, los valores adoptados del *Coficiente de Agresividad Media (CAM)* y la asignación de la categoría de tráfico pesado correspondiente.

<p>Carga por eje: $P = 128 \text{ kN}$ Carga por semieje: $P/2 = 64 \text{ kN}$ Carga por rueda: $P/4 = 32 \text{ kN}$</p>	$\sigma = \frac{P/4}{\pi \cdot R^2} \rightarrow 900 \cdot 10^3 = \frac{32 \cdot 10^3}{\pi \cdot R^2} \rightarrow R = 10,64 \text{ cm}$
---	--

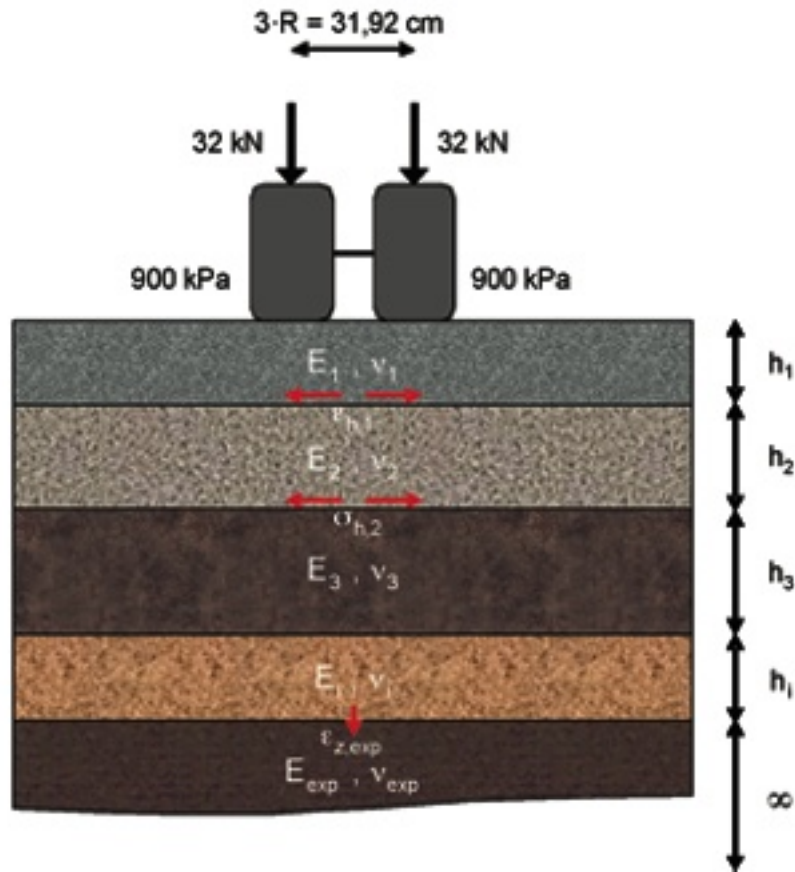


Figura 4. Esquema de carga y sección tipo.

5.3 DATOS CLIMÁTICOS

De acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma, se deberá tener en cuenta, a efectos del dimensionamiento de la sección de firme, en qué zonas térmica y pluviométrica se sitúa la obra que se está proyectando, tal y como se indica en el apartado 6.2.

El proyectista deberá tener en consideración que la zona térmica en la que se localice la obra afectará, fundamentalmente, a:

- El módulo elástico de cálculo de las mezclas bituminosas.
- La elección del tipo y características exigibles al ligante bituminoso empleado en las mezclas bituminosas.

- La distancia entre juntas en los pavimentos de hormigón en masa sin pasadores en las juntas, y entre fisuras inducidas en la prefisuración de capas de otros materiales con cemento.
- La adopción de medidas complementarias si las temperaturas previstas son muy elevadas o muy bajas.

Por otro lado, la zona pluviométrica en la que se localice la obra afectará, fundamentalmente, a:

- La elección del tipo y características exigibles a la capa de rodadura.
- La necesidad, o no, de sellado de las juntas transversales en los pavimentos de hormigón en masa.
- La adopción de medidas complementarias si son previsibles precipitaciones muy intensas o largos períodos de sequía extrema.

5.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

5.4.1 Niveles de calidad de la información

Para el establecimiento de los parámetros característicos de los materiales a efectos del cálculo de las secciones de firme, se consideran tres posibles situaciones según la cantidad y calidad de las informaciones previas disponibles:

- **Nivel inferior:** si no se dispone de datos específicos sobre los materiales.
- **Nivel medio:** si se dispone sólo de los datos básicos sobre los materiales: tipo de mezclas bituminosas, resistencias exigidas a los materiales tratados con cemento, etc.
- **Nivel superior:** si se dispone de los datos necesarios para caracterizar por completo los materiales: composición y formulación de las mezclas bituminosas, tipo de ligante empleado, resistencias exigidas y previsibles de los hormigones y otros materiales con cemento, formación precisa de la explanada (y no tan sólo su categoría), etc.

5.4.2 Módulos elásticos y coeficientes de Poisson

De acuerdo con las bases del diseño asumidas en esta norma, el comportamiento de los materiales empleados en una sección de firme se considera elástico y lineal y, por tanto, su caracterización a efectos de cálculo se llevará a cabo mediante su módulo de elasticidad (E) y su coeficiente de *Poisson* (ν). Salvo que se disponga de estudios que aconsejen el empleo de otros valores diferentes, se utilizarán los que se incluyen en el apartado 6.2 de esta norma. En todo caso, los módulos elásticos utilizados en el dimensionamiento (módulos elásticos de cálculo) dependerán de la zona térmica considerada, así como del nivel de calidad de la información de los materiales:

- En caso de que el nivel de información de los materiales sea el inferior, se emplearán en cualquier caso los valores medios (E_{MED}) indicados en el apartado 6.2.; en el

caso de las mezclas bituminosas, estos valores medios deberán corregirse, tal y como se indica en dicho apartado, según la zona térmica en la que se localice la obra.

- En caso de emplear el nivel de información de los materiales medio, el proyectista podrá, justificadamente, adoptar el módulo de cálculo que considere más adecuado a las condiciones particulares de la obra y de los materiales; en este caso, los módulos elásticos empleados no podrán quedar fuera del intervalo $E_{mín} - E_{MÁX}$ indicado en el apartado 6.2.
- En caso de emplear el nivel de información de los materiales superior, el proyectista podrá utilizar, justificadamente, el método de cálculo que considere oportuno para establecer el módulo elástico de las distintas capas, siempre que dicho método sea capaz de tener en cuenta, al menos, las variables siguientes:
 - Para las mezclas bituminosas: tipo de ligante empleado y sus características (punto de reblandecimiento, penetración a 25 °C, índice de penetración), temperatura de la mezcla, composición y formulación de la mezcla.
 - Para los hormigones y otros materiales con cemento: composición y formulación de la mezcla, resistencias previsibles.
 - Para los materiales no tratados: humedad del material, estado tensional.

5.4.3 Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia son ecuaciones que relacionan la respuesta del firme a la aplicación de la carga tipo (en términos de tensiones y deformaciones) con el número de aplicaciones de dicha carga que la sección es capaz de resistir antes de llegar a una situación de fallo (agotamiento estructural, límite de deformación plástica acumulada, etc.). Salvo que se disponga de estudios que justifiquen el empleo de otras funciones de transferencia diferentes, se utilizarán las que se incluyen en el apartado 6.2 de esta norma.

En general, el modo de fallo de las mezclas bituminosas y de los materiales con cemento es la fisuración por esfuerzos de tracción repetidos e inferiores a su límite de rotura, por lo que la función de transferencia de dichos materiales es una *ley de fatiga*; por otro lado, el modo de fallo de los materiales no tratados es generalmente la acumulación de deformaciones verticales permanentes, por lo que su función de transferencia es una *ley de deformaciones*. No obstante, el proyectista podrá considerar, justificadamente, otros modos de fallo además de éstos.

No se consideran de aplicación las leyes de fatiga a las mezclas bituminosas dispuestas en capas de rodadura de pequeño espesor (mezclas tipo BBTM) o drenantes (mezclas tipo PA), puesto que no se encuentran sometidas, generalmente, a esfuerzos de tracción.

5.5 ESPESORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE CAPA

Una vez definido el tráfico equivalente de proyecto y fijados el resto de los parámetros de diseño, mediante el dimensionamiento analítico pueden calcularse distintas secciones estructuralmente suficientes. Para evitar una excesiva heterogeneidad en el inventario de fir-

mes de las carreteras de nueva construcción dimensionadas con la presente norma, las capas constituyentes de la sección deberán cumplir, en cualquier caso, y sin perjuicio de lo establecido en el apartado 6.2 sobre espesores de tongada extendida, las siguientes disposiciones relativas a espesores de capa:

- El espesor total de mezclas bituminosas en caliente en una sección de firme no podrá ser inferior a 5 cm ni superior a 35 cm. En caso de que las mezclas bituminosas se dispongan sobre una capa de gravacemento, el espesor total mínimo de aquéllas será de 15 cm en todos los casos.
- El espesor total de mezclas bituminosas de alto módulo no podrá ser inferior a 7 cm ni superior a 13 cm.
- El espesor total de suelocemento o de gravacemento no podrá ser inferior a 20 cm ni superior a 30 cm.
- El espesor total de zahorra artificial no podrá ser inferior a 20 cm (15 cm en el caso de arceles) ni superior a 40 cm.

5.6 CONDICIONES DE ADHERENCIA ENTRE CAPAS

Dado que la adherencia entre las diferentes capas que constituyen un firme es uno de los factores que más influye en su respuesta ante la aplicación de las cargas, deberá garantizarse, tomando las medidas que se consideren necesarias durante la fase de proyecto y en la obra, que se produce en todos los casos el mayor grado posible de adherencia entre todas las capas. A efectos de cálculo, se consideran tres situaciones posibles para cada interfaz:

- **Adherencia total:** No hay deslizamiento relativo entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz son iguales en ambas capas, apareciendo los correspondientes esfuerzos tangenciales.
- **Adherencia parcial:** Hay un deslizamiento relativo limitado entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz no son iguales en ambas capas, pero existen esfuerzos tangenciales.
- **Adherencia nula:** Hay un deslizamiento relativo total entre ambas capas, de modo que los desplazamientos y deformaciones en la interfaz no son iguales en ambas capas y no existen esfuerzos tangenciales.

En general, y salvo justificación en contra por parte del proyectista, se supondrá grado de adherencia total entre capas, excepto en los siguientes casos:

- Cuando sobre la capa de apoyo de un pavimento de hormigón se disponga una lámina de plástico, se considerará adherencia nula.
- Entre dos capas de materiales con cemento se considerará adherencia parcial.
- Si la relación entre módulos de dos capas contiguas es superior a 10 se considerará adherencia parcial.

- En la fase de construcción, cuando exista evidencia de que no se están garantizando las condiciones de adherencia total correspondiente, se considerará adherencia parcial o nula.

Siempre que se calcule la sección considerando adherencia parcial o total entre algunas de sus capas deberán diseñarse las medidas oportunas para garantizarla (riegos de adherencia, de imprimación, etc.), y deberán establecerse los controles correspondientes durante la puesta en obra.

Cuando la aplicación informática empleada para el dimensionamiento no permita la modelización de la adherencia parcial entre capas, se tomará para su utilización en la función de transferencia correspondiente la media de los resultados correspondientes (deformaciones o tensiones, según corresponda) a los casos de adherencia total y de adherencia nula.

5.7 PARÁMETROS CRÍTICOS

Los parámetros críticos forman parte de la respuesta del firme ante la aplicación de la carga y son los que permiten, a través de las funciones de transferencia correspondientes, determinar el número máximo de aplicaciones de la carga tipo que cada material es capaz de soportar. Los valores críticos que han de considerarse son los siguientes:

- **Mezclas bituminosas:** máxima deformación horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa (ϵ_h).
- **Capas con cemento y suelos estabilizados S-EST3:** máxima tensión horizontal de tracción en la fibra inferior de la capa (σ_h).
- **Capas granulares y explanadas de categoría E1, E2 y E3:** máxima deformación vertical de compresión en la fibra superior de la capa o de la explanada (ϵ_z).

Se determinarán en cada caso los valores de cálculo de los parámetros críticos en los puntos *donde adquieran sus valores máximos*, es decir, se estudiará si las máximas sollicitaciones se producen entre las ruedas gemelas o en el centro de ellas.

5.8 APLICACIONES INFORMÁTICAS

Para la obtención de la respuesta de la sección estructural del firme bajo la aplicación de la carga tipo se empleará una aplicación informática acorde con las hipótesis descritas en este capítulo y que permita llevar a cabo todos los análisis indicados en los apartados anteriores. Se recomienda, en principio, el empleo de programas de distribución libre y gratuita.

Es deseable, aunque no resulte imprescindible, que la aplicación elegida permita algunas de las siguientes posibilidades:

- La entrada de datos en unidades del sistema internacional o en múltiplos y submúltiplos de ellas.
- Diferentes grados de adherencia entre las capas.
- La aplicación de cargas múltiples.
- Un número no limitado de capas.
- La visualización gráfica de los resultados.

SECCIONES DE FIRME



6. SECCIONES DE FIRME

6.1 CATÁLOGO DE SECCIONES DE FIRME

Además de proporcionar al proyectista las directrices necesarias para el dimensionamiento analítico de las secciones de firmes, en esta norma se ha optado también por presentar posibles soluciones de referencia en un catálogo (figura 5), las cuales han sido dimensionadas con criterios analíticos y empíricos. Los espesores indicados en las secciones del catálogo se consideran mínimos en cualquier punto de la sección transversal del carril de proyecto, y sólo serán de aplicación directa si los datos disponibles de tráfico son los correspondientes al nivel superior de información.

Puesto que las secciones propuestas como referencia sólo pueden considerarse equivalentes para unas categorías de tráfico pesado y de explanada determinadas sólo en primera aproximación, es obligación del proyectista seleccionar la que, como resultado de un análisis de adecuación técnica y económica, resulte más apropiada a las condiciones concretas del proyecto, primando a estos efectos las cuestiones relacionadas con la disponibilidad de materiales y con los costes previsibles de conservación.

Cada sección se designa por un código de tres o de cuatro dígitos:

- Los dos primeros en el caso de secciones denominadas con cuatro dígitos, o el primero en el caso de secciones denominadas con tres dígitos, indican la categoría de tráfico pesado (T00 a T42).
- El tercero en el caso de secciones denominadas con cuatro dígitos o el segundo en el caso de secciones denominadas con tres dígitos, indica la categoría de explanada (E1 a E4).
- El último hace referencia al tipo de firme, con el siguiente criterio:
 - 1 para firme flexible (mezclas bituminosas sobre zahorra artificial).
 - 2 para firme semirrígido (mezclas bituminosas sobre suelocemento).
 - 3 para firme semirrígido (mezclas bituminosas sobre gravacemento).
 - 4 para firme rígido (pavimento de hormigón).

En el caso de que el dimensionamiento de la sección se realice empleando los niveles de calidad de la información de tráfico inferior o medio, el espesor de la capa estructural indicado en el catálogo (figura 5) se deberá incrementar en 3 cm (tres centímetros) para las categorías de tráfico pesado T21 o superiores, y en 2 cm (dos centímetros) para el resto. A estos efectos se considerará como capa estructural el suelocemento, la gravacemento, o el pavimento de hormigón en las secciones tipo 2, 3, o 4 respectivamente. En las secciones tipo 1 se considera como capa estructural la inferior de mezcla bituminosa, si por encima de ella hay por lo menos otras dos; si no existiesen al menos tres capas de mezcla bituminosa, el espesor de la capa de zahorra artificial situada más arriba en el firme entre las que pudieren existir se incrementará en 5 cm (cinco centímetros).

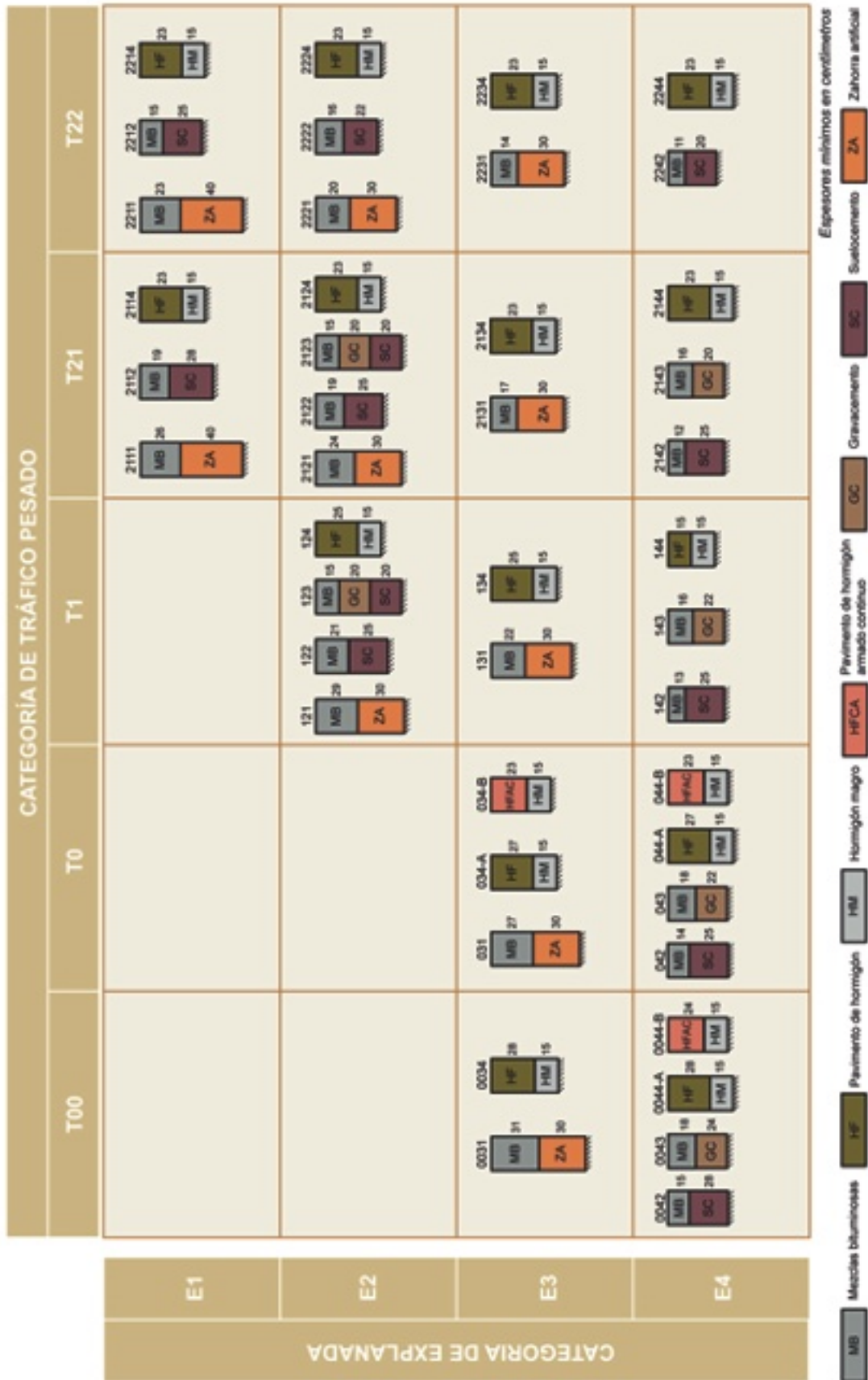


Figura 5A. Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2 (T21 y T22) en función de la categoría de explanada.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T31	T32	T41	T42 ⁽¹⁾
E1	<p>3111 MB 20 ZA 40 3112 MB 14 SC 26 3114 HF 21 ZA 20</p>	<p>3211 MB 17 ZA 40 3212 MB 13 SC 26 3214 HF 21 ZA 20</p>	<p>4111 MB 12 ZA 40 4112 MB 12 SC 26 4114 HF 20 ZA 20</p>	<p>4211 MB 15 ZA 40 4214 HF 18 ZA 20</p>
E2	<p>3121 MB 17 ZA 30 3122 MB 15 SC 22 3124 HF 21 ZA 20</p>	<p>3221 MB 14 ZA 30 3222 MB 14 SC 22 3224 HF 21 ZA 20</p>	<p>4121 MB 11 ZA 30 4122 MB 13 SC 20 4124 HF 20 ZA 20</p>	<p>4221 MB 15 ZA 30 4224 HF 18 ZA 20</p>
E3	<p>3131 MB 11 ZA 30 3134 HF 21 ZA 20</p>	<p>3231 MB 15 ZA 40 3234 HF 21 ZA 20</p>	<p>4131 MB 15 ZA 26 4134 HF 20 ZA 20</p>	<p>4231 MB 15 ZA 20 4234 HF 18 ZA 20</p>
E4	<p>3142 MB 10 SC 20 3144 HF 21</p>	<p>3244 HF 21</p>	<p>4144 HF 20</p>	<p>4244 HF 18</p>

(1) En las categorías de tráfico T42 podrá disponerse un riego bicapa con gravilla con sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

Espeores mínimos en centímetros

MB Mezcla bituminosa
 SC Pavimento de homojón
 HF Mezcla bituminosa
 ZA Subcemento
 ZA Zahorra artificial

Figura 5B. Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T22) y T4 (T41 y T42) en función de la categoría de explanada.

6.2 MATERIALES

En este apartado se analizan los posibles materiales a utilizar en las secciones de firmes dimensionadas de acuerdo a la norma (figura 5), para los cuales los correspondientes Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares deberán tener en cuenta las especificaciones complementarias que se expresan en este apartado y en los anejos correspondientes.

6.2.1 Mezclas bituminosas en caliente

Puesto que las características mecánicas de los materiales tratados con ligantes bituminosos dependen de la temperatura y de la velocidad de aplicación de la carga, los cálculos que se realicen para el dimensionamiento de la sección deberán contemplar valores de temperatura representativos de las condiciones específicas del proyecto, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma. A estos efectos, los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12 deberán multiplicarse por el coeficiente corrector γ_{ZT} indicado en la tabla 13, en función de la zona térmica en la que se localice la obra considerada.

En lo referente al tiempo de aplicación de la carga, se considera, salvo mejor criterio del proyectista debidamente justificado, un valor de frecuencia de 10,0 Hz. En los casos en los que se prevea una velocidad de los vehículos pesados reducida, se podrá considerar una frecuencia de aplicación de la carga de 6,5 Hz. En función de la frecuencia de aplicación de la carga, se modificarán los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12, multiplicándolos por el coeficiente corrector γ_{Hz} indicado en la tabla 13.

El valor del módulo elástico de las mezclas bituminosas que se debe emplear en el dimensionamiento de la sección (módulo elástico de cálculo $E_{CÁLCULO}$) es, por tanto, el módulo medio (E_{MED}) multiplicado por los coeficientes correctores γ_{ZT} y γ_{Hz} :

$$E_{CÁLCULO} = E_{MED} \cdot \gamma_{ZT} \cdot \gamma_{Hz}$$

Del mismo modo, los valores extremos que definen el rango admisible de los módulos elásticos para el nivel de información medio de los materiales ($E_{mín}$ y $E_{MÁX}$) que figuran en la tabla 12 deben multiplicarse en cada caso por el factor de corrección γ_{ZT} indicado en la tabla 13, para tener en cuenta la zona térmica en la que se localiza la obra.

Las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas son del tipo:

$$\epsilon_h = a \cdot N_f^{-b}$$

Donde ϵ_h es la deformación horizontal de tracción máxima en la capa y el valor de a depende del tipo de mezcla bituminosa. Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 12.

La utilización de una mezcla bituminosa en caliente de características genéricas en el dimensionamiento estará limitada exclusivamente al nivel inferior de calidad de información de los materiales, cuando no se puedan precisar los tipos de las mezclas bituminosas en caliente que compongan la sección. Asimismo, se podrá utilizar en la fase de prediseño de la sección, de acuerdo con lo indicado en el capítulo 4. En estos casos, esa mezcla bituminosa genérica se caracterizará por un valor de E_{MED} de 6.000 MPa, un coeficiente de Poisson de 0,35 y unos coeficientes a y b de $6,691 \cdot 10^{-3}$ y 0,27243 respectivamente.

TIPO	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	E_{MED} [MPa]	ν	a	b
BBTM 11 B M BBTM 8 B M	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
BBTM 11 A F BBTM 8 A F	4.000	5.250	5.000	0,35	-	-
PA 11	2.500	3.250	3.000	0,35	-	-
AC 16 surf D AC 22 surf D AC 22 bin D	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 16 surf S AC 22 surf S AC 22 bin S AC 32 bin S	3.500	9.500	7.000	0,33	$6,920 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin G AC 32 bin G AC 22 base G AC 32 base G	2.500	7.000	5.000	0,33	$6,443 \cdot 10^{-3}$	0,27243
AC 22 bin 15/25 AM AC 22 base 15/25 AM	10.000	14.000	11.000	0,30	$6,612 \cdot 10^{-3}$	0,27243

Tabla 12. Características mecánicas de las mezclas bituminosas.

ZONA TÉRMICA	γ_{ZT}	FRECUENCIA [Hz]	γ_{Hz}
ZT1	1,25	10,0	1,00
ZT2	1,00	6,5	0,85
ZT3	0,80		
ZT4	0,75		

Tabla 13. Coeficientes correctores γ_{ZT} y γ_{Hz} para mezclas bituminosas.

Cuando el nivel de calidad de información del tráfico sea el superior, y se opte por el dimensionamiento mensual, utilizando el concepto de daño de fatiga acumulado según la hipótesis de Miner, los valores de los módulos elásticos indicados en la tabla 12 deberán multiplicarse por el coeficiente corrector g_{MENSUAL} indicado en la tabla 14, en función de la zona térmica en la que se localice la obra considerada y del mes del año considerado, de forma que el módulo elástico de cálculo para cada mes i ($E_{\text{CÁLCULO}}$) es, por tanto, el módulo medio (E_{MED}) multiplicado por los coeficientes correctores γ_{MENSUAL} y γ_{Hz} :

$$E_{\text{CÁLCULO}} = E_{\text{MED}} \cdot \gamma_{\text{MENSUAL}} \cdot \gamma_{\text{Hz}}$$

ZONA TÉRMICA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ZT1	1,75	1,70	1,50	1,40	1,10	0,85	0,60	0,65	0,85	1,15	1,50	1,65
ZT2	1,60	1,50	1,30	1,10	0,85	0,60	0,40	0,40	0,55	0,85	1,25	1,50
ZT3	1,25	1,20	1,05	0,90	0,70	0,50	0,40	0,35	0,45	0,70	0,95	1,20
ZT4	1,30	1,20	1,00	0,85	0,65	0,45	0,30	0,30	0,40	0,65	0,95	1,20

Tabla 14. Coeficiente corrector $\gamma_{MENSUAL}$ para mezclas bituminosas.

Los espesores de cada capa de mezcla bituminosa estarán dentro de los rangos establecidos en la tabla 15. En general, y con el objetivo de dotar a la sección de firme de la mayor continuidad posible, el número de capas debe ser el menor posible.

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T00 a T21	T22 y T31	T32 a T42
Rodadura	PA 11 ⁽¹⁾	4		
	BBTM 11 B M	3		
	BBTM 8 B M		2	
	BBTM 11 A F	3		
	BBTM 8 A F		2	
	AC 16 surf D			
	AC 22 surf D		5-6	5
	AC 16 surf S			
Intermedia	AC 22 bin D	5-10		
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S			
	AC 22 bin G ⁽²⁾			
	AC 32 bin G ⁽²⁾			
	AC 22 bin 15/25 AM	7-13		
Base	AC 32 base S	7-15		
	AC 22 base G			
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 AM	7-13		

Tabla 15. Espesores de las capas de mezcla bituminosa.

⁽¹⁾ Se podrán proyectar pavimentos con mezcla drenante PA, siempre que se justifique detalladamente su idoneidad para el caso concreto del que se trate. La justificación deberá tener en cuenta, entre otros factores, la inclinación longitudinal de la vía, la pluviometría de la zona, la intensidad total del tráfico y la necesidad de reducir el ruido en las márgenes de la carretera. En cualquier caso, la longitud pavimentada con este tipo de mezcla no será inferior a 500 m.

⁽²⁾ Las mezclas tipo AC 22 bin G y AC 32 bin G únicamente podrán emplearse cuando la capa de rodadura sea tipo AC (es decir, nunca bajo rodaduras tipo PA o BBTM) y con una dotación mínima de ligante del 4,0 % en masa sobre el total del árido seco incluido el polvo mineral.

Como capa de rodadura deberá emplearse la que satisfaga las condiciones funcionales exigidas, en función del tráfico y de la categoría y características geométricas de la carretera; salvo justificación en contra, deberán tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para las categorías de tráfico pesado T00 a T21 se emplearán como capa de rodadura las mezclas bituminosas del tipo BBTM (preferentemente las correspondientes al huso granulométrico B).
- Con el fin de mejorar la seguridad y comodidad de la circulación en tiempo de lluvia, en carreteras ubicadas dentro de la zona pluviométrica ZP2 con intensidad de tráfico superior a 10.000 vehículos/día, independientemente del tráfico pesado, se emplearán como capa de rodadura las mezclas bituminosas del tipo BBTM (preferentemente las correspondientes al huso granulométrico B).

Con categorías de tráfico pesado T00 a T21 y categorías de explanada E3 o E4 podrán utilizarse, previa justificación técnica por parte del proyectista, mezclas bituminosas de alto módulo tanto en capas de base (AC 22 base 15/25 AM) como en capas intermedias (AC 22 bin 15/25 AM).

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear, que será seleccionado, en función de la capa a que se destine la mezcla bituminosa en caliente, de la zona térmica en que se encuentre y de la categoría de tráfico pesado, entre los que se indican en las tablas 16A y 16B.

ZONA TÉRMICA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 a T21	T21	T22 a T32	T41 y T42	Arcenes
ZT1, ZT2, ZT3	50/70	35/50			
	PMB 25/55-65	50/70	50/70	50/70	50/70
	PMB 45/80-65	PMB 45/80-60b	PMB 45/80-60b		
ZT4	35/50	35/50			
	PMB 25/55-65	50/70	35/50		
	PMB 45/80-65	PMB 25/55-65	50/70	50/70	50/70
		PMB 45/80-60b	PMB 45/80-60b		
		PMB 45/80-65			

Tabla 16A. Tipo de ligante a emplear (capa de rodadura y siguiente).

ZONA TÉRMICA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
	T00 y T0	T1 y T21	T22 a T32
ZT1, ZT2, ZT3	50/70 PMB 25/55-65	50/70	50/70
ZT4	35/50 50/70 PMB 25/55-65	35/50 50/70	50/70

Tabla 16B. Tipo de ligante a emplear (capa de base, bajo otras dos).

Para mezclas bituminosas en caliente AC 22 bin 15/25 AM o AC 22 base 15/25 AM, el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear será PMB 10/40-70 para la categoría de tráfico pesado T00 y 15/25 para las categorías de tráfico pesado T0, T1 y T21.

Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0, en las mezclas bituminosas a emplear en capas de rodadura se utilizarán exclusivamente betunes asfálticos modificados con polímeros.

Para mezclas bituminosas PA 11, además de los betunes modificados indicados en la tabla 16A, se podrá emplear el tipo PMB 45/80-60a, para las categorías de tráfico pesado T00 a T1.

6.2.2 Materiales con cemento

Las características mecánicas de los materiales con cemento evolucionan con el tiempo, por lo que en el dimensionamiento analítico del firme se deben tener en cuenta:

- Las características a medio y a largo plazo, de forma que sea posible valorar el comportamiento de la capa durante toda la vida útil del firme.
- Las características a corto plazo, de forma que sea posible la comprobación de la capacidad estructural de la capa para soportar los esfuerzos iniciales: tráfico de obra o tráfico durante el primer año tras la puesta en servicio.

La ley de fatiga de un material con cemento depende de la tensión horizontal de tracción máxima en la capa σ_h y de la resistencia a flexotracción a largo plazo $R_{F,LP}$ del material:

$$\frac{\sigma_h}{R_{F,LP}} = \gamma_T \cdot (1 - a \cdot \log N_i)$$

El coeficiente γ_T se emplea para ajustar el modelo teórico al comportamiento real y su valor es de 0,8 para categorías de tráfico pesado T21 o superiores, y de 1,0 para categorías de tráfico pesado T22 o superiores.

Puesto que las funciones de transferencia de este tipo de materiales presentan pendientes reducidas, una pequeña variación en la relación entre la tensión de cálculo y la resistencia a flexotracción del material da como resultado una gran modificación en el número de aplicaciones de carga admisibles; por este motivo, los valores de la resistencia a flexotracción de los materiales tratados con cemento considerados en el cálculo no podrán ser superiores a los que figuran en la tabla 17.

Para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T22 el hormigón del pavimento tendrá una resistencia característica mínima a flexotracción de 4,5 MPa a 28 días (HF-4,5). Para las categorías T1, T21 y T22 dicha resistencia podrá disminuirse a 4,0 MPa (HF-4,0) incrementando en 2 cm los espesores indicados en el catálogo de secciones de firme (figura 5).

Para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T31, T32, T41 y T42 o eventualmente en arcenes, el hormigón del pavimento tendrá una resistencia característica mínima a flexotracción de 4,0 MPa a 28 días (HF-4,0), aunque también podrá disminuirse dicha resistencia a 3,5 MPa (HF-3,5) incrementando en 2 cm los espesores indicados en el catálogo de secciones de firme (figura 5).

La cuantía geométrica del pavimento continuo de hormigón armado será del 0,7% para HF-4,5 y del 0,6% para HF-4,0. En este tipo de pavimentos se dispondrán anclajes al terreno en las secciones extremas, así como en las secciones especiales que lo requieran.

En el caso de los materiales granulares tratados con cemento, habitualmente no es sencillo conocer su resistencia a flexotracción; no obstante se puede estimar a partir de correlaciones con la resistencia a tracción indirecta o con la resistencia a compresión. Si no se dispusiese de correlaciones más precisas para el material empleado en cada caso particular, pueden utilizarse las siguientes relaciones teóricas aproximadas:

- $R_{C,LP} = 2 \cdot R_{C,7}$
- $R_{T,LP} = 0,12 \cdot R_{C,LP}$
- $R_{F,LP} = 1,50 \cdot R_{T,LP}$

donde $R_{C,7}$ y $R_{C,LP}$ son las resistencias a compresión simple a 7 días y a largo plazo, respectivamente, y $R_{T,LP}$ es la resistencia a tracción indirecta y $R_{F,LP}$ la resistencia a flexotracción a largo plazo.

A efectos de aplicación de las funciones de transferencia, cuando no se conozcan exactamente las características de las capas que forman el cimiento, las explanadas de categoría E1 y E2 se considerarán análogas a un material granular, independientemente de que su capa superior esté estabilizada con cal o con cemento. Por otro lado, las explanadas de categoría E4 se considerarán análogas a los materiales tratados con cemento.

Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 17.

CATEGORÍA	TIPO	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	E_{MED} [MPa]	ν	a	R_{FLP}
Hormigón	HF-4,5	30.000	38.000	35.000	0,25	0,065	5,50
	HF-4,0	27.000	35.000	32.000	0,25	0,065	4,80
	HF-3,5	25.000	35.000	29.000	0,25	0,065	4,20
Suelocemento	SC	2.000	8.000	6.000	0,25	0,065	0,90
Gravacemento	GC	18.000	22.000	20.000	0,25	0,065	1,60
Hormigón magro	HM	20.000	30.000	24.000	0,25	0,065	3,00
Suelo estabilizado in situ	S-EST1	100	300	150	0,35	-	-
	S-EST2	200	600	350	0,35	-	-
	S-EST3	1.000	3.000	1.500	0,25	0,065	0,45
Macizo semiindefinido	E4	280	400	300	0,30	-	-

Tabla 17. Características mecánicas de los materiales con cemento.

Las capas de firme constituidas por materiales con cemento compactados con rodillo deberán ser extendidas en tongadas de un espesor mínimo de 20 cm y un espesor máximo de 30 cm.

Con el objetivo de controlar y limitar la reflexión de fisuras de retracción de las capas tratadas con cemento en la superficie del pavimento, será necesario prefisurar dichas capas con una distancia entre juntas transversales de contracción que dependerá de la categoría del tráfico pesado, de la zona climática en la que se ubique la obra, y de la naturaleza de la propia capa, tal y como se indica en la tabla 18.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	Zona térmica	Suelocemento	Gravacemento
T00 a T22	ZT1	3,5	3,0
	ZT2	3,0	2,5
	ZT3 y ZT4	4,0	3,5
T31 a T42	ZT1	-	3,5
	ZT2	4,0	3,0
	ZT3 Y ZT4	-	4,0

Tabla 18. Distancia entre juntas transversales de contracción [m].

Los suelos estabilizados *in situ* cumplirán las prescripciones del Artículo 512 “Suelos estabilizados in situ” del Pliego PG-3. Por su parte, el suelocemento y la gravacemento cumplirán las prescripciones del Artículo 513 “Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)” del Pliego PG-3, con las siguientes modificaciones:

- La granulometría del material empleado en la fabricación del suelocemento no deberá ajustarse a ningún huso. El tamaño máximo no será superior a 40 mm.
- No se fijarán límites máximos a la resistencia media a compresión a siete días, cuando las capas de suelocemento o gravacemento se prefisuren.

En los pavimentos de hormigón en masa con pasadores en las juntas transversales, éstas se dispondrán con una separación de 5,0 m. En los pavimentos sin pasadores, la distancia entre juntas transversales de contracción será de 4,0 m en las zonas térmicas ZT3 y ZT4, y de 3,5 m en las ZT1 y ZT2.

Con tráficos de proyecto T32 o superiores, las juntas longitudinales irán provistas de barras de unión y se sellarán en todos los casos. Respecto al sellado de las juntas transversales, tanto de contracción como de hormigonado, según la zona pluviométrica, se proyectará de acuerdo al siguiente criterio:

- Zona pluviométrica ZP1: podrán dejarse sin sellar.
- Zona pluviométrica ZP2: selladas como las juntas longitudinales.

Se proyectarán juntas transversales de dilatación ante estructuras o donde pudiera estar especialmente impedido el movimiento de las losas del pavimento. En estos casos en la fase de proyecto se estudiará el diseño específico de dichas juntas.

En las curvas con radio inferior a 200 m será precisa la realización de un estudio especial sobre la disposición de juntas transversales de contracción o de dilatación, con el fin de limitar las posibles tensiones que pudieran producirse por el efecto de las temperaturas. A falta de dicho estudio, en la mayoría de los casos podrá ser suficiente con la disposición de juntas de dilatación al comienzo y al final de la curva, manteniendo la longitud de las losas adoptada para el conjunto de la obra.

Las bases de hormigón magro cumplirán las prescripciones del Artículo 551 “Hormigón magro vibrado” del Pliego PG-3, con la siguiente modificación:

- La resistencia media a compresión simple a 7 días será igual o superior a 8 MPa.

Por su parte, los pavimentos de hormigón vibrado cumplirán las prescripciones del Artículo 550 “Pavimentos de hormigón” del Pliego PG-3, con las siguientes modificaciones:

- Los pasadores irán provistos de una funda de plástico antiadherente al menos en la mitad y cumplirán con las prescripciones de la Norma UNE-EN 13877-3.

- De acuerdo con el tipo de producto de sellado que se emplee, éste deberá cumplir las prescripciones de la Norma UNE-EN 14188-1 (productos aplicados en caliente), UNE-EN 14188-2 (productos de sellado aplicados en frío) ó UNE-EN 14188-3 (perfiles preformados).
- Cuando se prevea la extensión de una capa de rodadura de mezcla bituminosa sobre un pavimento de hormigón armado continuo, el curado se realizará con emulsión bituminosa o mediante cubrición con lámina plástica. En dicho caso, con carácter previo a la extensión de la mezcla bituminosa de rodadura, se aplicará el correspondiente riego de adherencia.

6.2.3 Materiales no tratados

Puesto que las características mecánicas de los materiales no tratados (materiales granulares y suelos naturales) dependen de la humedad de la capa, los cálculos que se realicen para el dimensionamiento de la sección deben contemplar valores de humedad representativos de las condiciones específicas del proyecto, de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3 de esta norma.

El control de las deformaciones permanentes acumuladas en los materiales no tratados se establece mediante la limitación de la máxima deformación vertical de compresión en la capa (que suele localizarse en su fibra superior):

$$\varepsilon_z = a \cdot N_f^{-b}$$

Además, para evitar que se produzcan descompresiones en las capas constituidas por materiales no tratados, se debe cumplir la condición de que la tensión horizontal máxima en las mismas sea inferior a la suma de la tensión vertical máxima más el peso propio del firme sobre ellas (de espesor h_F cm), asumiendo una densidad simplificada de éste de $2,20 \text{ t/m}^3$:

$$\sigma_h \leq \sigma_z + 2,20 \cdot 10^{-3} \cdot h_F$$

Cuando no se conozcan exactamente las características de las capas que forman el cimientó, las explanadas de categoría E1 y E2 se considerarán análogas a un material granular, independientemente de que su capa superior esté estabilizada con cal o con cemento.

El módulo de elasticidad de las zahorras depende de la capacidad de soporte de las capas subyacentes (expresada a través de su módulo de elasticidad E_G) y del espesor de la propia capa (h). Salvo que se disponga de estudios que permitan o aconsejen el empleo de otros valores diferentes se utilizarán los que se incluyen en la tabla 19.

CATEGORÍA	TIPO	E_{\min} [MPa]	E_{\max} [MPa]	E_{MED} [MPa]	ν	a	b
Zahorra artificial ⁽¹⁾	ZA	80	600	$0,206 \cdot h^{0,45} \cdot E_s$	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Macizo semi-indefinido	E1	35	65	50	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E2	70	105	85	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
	E3	155	280	215	0,35	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25
Suelo natural	-	30	250	10·CBR	0,40	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,25

Tabla 19. Características mecánicas de los materiales no tratados.

⁽¹⁾ Para el cálculo de E_{MED} se aplicará la expresión indicada, en la que E_s es el módulo del macizo semi-indefinido, tongada, o capa subyacente en MPa, y h es el espesor en mm de la tongada para la que se calcula el módulo de elasticidad, obteniéndose el resultado en MPa.

Las capas de firme y las empleadas en la formación de la parte superior del cimiento constituidas por materiales no tratados deberán ser extendidas en tongadas de un espesor mínimo de 20 cm (15 cm en el caso de arcenes) y un espesor máximo de 30 cm.

6.2.4 Otros materiales

Además de los materiales relacionados anteriormente, podrán utilizarse los que el proyectista, previa justificación técnica y económica, considere oportunos, entre los siguientes:

- Riegos con gravilla.
- Mezclas bituminosas abiertas en frío.
- Gravaemulsión.
- Gravaescoria.
- Macadam.

Tanto su caracterización mecánica como las funciones de transferencia empleadas en su caso deberán estar convenientemente justificadas.

6.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS SECCIONES DE FIRME

6.3.1 Introducción

Con la evaluación económica de los firmes se pueden pretender dos objetivos diferentes. El primero se puede enmarcar en las tareas de planificación de la Administración: comparar diferentes tipos de soluciones de manera que se puedan establecer directrices de carácter general que, en cualquier caso, deberán ser revisadas al materializarlas en un proyecto concreto. El segundo objetivo consiste en la estimación, para una sección determinada, de cuáles son, en las condiciones concretas del proyecto, los costes de construcción y, en su caso, los de conservación que se van a producir en el futuro. Para determinar estos costes es necesario conocer, entre otros, aspectos tales como la situación geográfica de la obra, su volumen, la disponibilidad de materiales de construcción, el equipamiento del que disponen las empresas que pueden ser adjudicatarias de la obra, la época del año en la que se van a ejecutar los trabajos, etc. En definitiva, esta evaluación económica es la que hay que llevar a cabo mediante un estudio detallado en el momento de redactar el proyecto, pudiendo existir notables diferencias de un caso a otro, aun habiendo escogido en ambos la misma solución técnica.

Los criterios para llevar a cabo una evaluación económica dependen del organismo que la realice (Administración pública, empresa privada o entidad financiera), de su alcance (evaluación de planes o de proyectos) y de la posibilidad de expresar contablemente los costes y beneficios que se producen a lo largo del tiempo que se considere en el análisis. El criterio que se utiliza habitualmente cuando se trata de proyectos de obras promovidas por las administraciones públicas es el del valor actualizado neto (VAN), el cual expresa la diferencia entre la suma de los beneficios actualizados netos y la suma de los costes actualizados netos, y es uno de los índices de significado más claro en la valoración económica de proyectos, por cuanto resulta más interesante aquél en que el VAN sea mayor (o menos negativo, si los costes superan a los beneficios).

Los análisis económicos deben extenderse a un determinado período o *ciclo* vital, que es el tiempo para el que se quiere que el coste global actualizado sea mínimo. A veces se considera un período de análisis económico igual al período de proyecto de las distintas secciones de firme. Sin embargo, no se debe confundir un concepto meramente económico con otro de significado estrictamente técnico. Debe tenderse a elegir un período 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 períodos de análisis inferiores a 5 años (lo que no tiene sentido) o superiores a 35.

En esta norma se considera como más apropiado tomar un período de análisis de 40 años. De esta forma cabe incluir en el análisis económico todas las operaciones que puedan tener lugar desde el momento de la construcción del firme, incluyendo las operaciones de rehabilitación que sean necesarias tras la finalización del período de proyecto para seguir aprovechando la infraestructura existente. Por otro lado, este período de análisis permite comparaciones entre secciones de firme que son diseñadas para períodos de proyecto diferentes entre sí.

Para poder sumar los diferentes costes que se producen a lo largo del período de análisis y hallar el coste global de una sección es preciso una actualización de los que se pro-

ducen en diferentes momentos. La tasa de actualización a que se fije es pues un parámetro fundamental del cálculo. Para la evaluación de inversiones públicas, se suele trabajar con tasas de actualización variando entre el 4 y el 15 %. Para proyectos de infraestructuras de transporte es habitual adoptar el valor $a = 6$ %. En todo caso, será la Administración la que fije qué tasa de actualización debe ser utilizada en cada momento.

La elección de una determinada tasa tiene gran influencia en el resultado de los estudios económicos. Si la tasa elegida es alta, las estrategias de inversión que resultan más favorables son las que tienen menores inversiones iniciales (suponiendo, por tanto, menor durabilidad en principio) y prevén para el futuro bastantes rehabilitaciones de mediana durabilidad. Estas estrategias pueden resultar peligrosas, pues el estado del firme puede bajar del mínimo aceptable si no se cumple estrictamente lo planificado. Por el contrario, tasas bajas favorecen estrategias marcadas por inversiones iniciales altas que retrasan la necesidad de rehabilitaciones importantes. Su aplicación exige, sin embargo, que no haya restricciones presupuestarias.

En los análisis económicos se considera que la tasa de actualización se mantiene constante a lo largo de todo el período de análisis (al contrario de lo que suele suceder con los tipos de interés en los análisis financieros). Por otro lado, se recomienda trabajar con *euros constantes*, es decir, no considerar incluida la inflación en la tasa de actualización.

6.3.2 Costes de construcción

La forma habitual de determinar los costes de construcción en las obras públicas parte del hecho (no estrictamente cierto, sin embargo) de que no hay diferencia entre quien suministra los materiales y quien los pone en obra. Los costes finales se obtienen así como la suma de los correspondientes a cada una de las unidades de obra definidas en el pliego de prescripciones técnicas (precios unitarios). A su vez, resulta habitual justificar los costes de cada unidad de obra como la suma de cuatro componentes:

- Costes de los materiales.
- Costes de la mano de obra.
- Costes de la maquinaria.
- Costes indirectos.

Al coste final obtenido como suma del de las distintas unidades de obra (precio unitario multiplicado por la medición de esa unidad) se le denomina habitualmente coste de ejecución material. Este debe ser incrementado en los porcentajes que la Administración tenga establecidos como de gastos generales o de estructura y de beneficio industrial, así como el correspondiente al impuesto sobre el valor añadido (IVA). Se obtiene así finalmente el presupuesto base de licitación.

6.3.3 Costes de los usuarios

Hay que distinguir entre dos clases de costes que el usuario debe soportar: los costes genéricos de explotación y los costes específicos asociados a operaciones de conservación o de rehabilitación.

Los costes genéricos de explotación pueden a su vez agruparse en cuatro categorías:

- Gastos de funcionamiento del vehículo: consumo de combustible, lubricantes, neumáticos, piezas de repuesto, reparaciones y depreciación.
- Costes relacionados con el tiempo de recorrido.
- Costes de los accidentes.
- Costes asociados a la comodidad de los usuarios.

Estos costes genéricos de explotación dependen de la regularidad superficial, de la resistencia al deslizamiento y de la velocidad, estando dichas variables relacionadas entre sí. Por ejemplo, al disminuir la regularidad, aumentando el desgaste del vehículo y la incomodidad del usuario, disminuye así mismo la velocidad, aumentando el tiempo de recorrido y disminuyendo el consumo de combustible y la gravedad de los accidentes. Además, la velocidad también está influida por el nivel de servicio que la carretera proporciona, disminuyendo cuando aumenta la intensidad de la circulación. No existen suficientes datos sobre la influencia del comportamiento del pavimento sobre los costes del usuario asociados a la explotación normal de la carretera. Pero 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, la Administración no suele incluir este concepto en sus estudios de rentabilidad.

Por otro lado, las operaciones de conservación y de rehabilitación, por llevarse a cabo generalmente con circulación, inducen en los usuarios unos costes específicos asociados a esas operaciones y que dependen de:

- La programación de las obras.
- La intensidad de la circulación.
- La regulación que se haga de esa circulación.

La estructura de estos costes es igual a la de los costes genéricos de explotación. Pero en este caso el factor predominante es el relacionado con la demora provocada por la limitación de velocidad. En menor grado, siempre que los trabajos se señalicen adecuadamente, están los costes derivados de accidentes.

Con bajas intensidades de circulación los vehículos habrán de reducir su velocidad normal hasta una velocidad limitada (e incluso en ocasiones habrán de detenerse si así lo exige la regulación de la circulación); con dicha velocidad limitada se transitará por la zona de obras hasta que, rebasada ésta, se pueda recuperar la velocidad normal. Si la intensidad de la circulación supera la capacidad de la regulación dispuesta se producirán retenciones y la demora y el consumo de combustible aumentarán notablemente. Por tanto, tener en cuenta estos costes con altas intensidades de circulación puede influir decisivamente en la elección de la estrategia de conservación más adecuada: interesarán los firmes más duraderos y que exijan el menor número de operaciones de rehabilitación, que también habrán de ser lo más duraderas posible.

6.3.4 Costes de conservación y costes globales

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

$$C = C_1 + C_2 - C_3 + C_4 \quad [1]$$

donde:

- C es el coste global de la sección.
- C_1 es el coste de construcción (inversión inicial).
- C_2 es el coste de conservación, incluyendo tanto los costes de las operaciones ordinarias como los costes de rehabilitaciones que se producen durante el período al que se extiende el análisis económico, todos ellos actualizados al año de la construcción.
- C_3 es el valor residual de la sección al final del período al que se extiende el análisis económico y actualizado al año de la construcción.
- C_4 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 combustible, etc.

El coste de conservación está formado por dos sumandos y viene dado por la expresión:

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad [2]$$

donde:

- C_{21} son los costes de conservación ordinaria a lo largo del período de análisis.
- C_{22} son los costes de las rehabilitaciones u operaciones de conservación extraordinarias realizadas durante el período de análisis.

Los costes de conservación ordinaria C_{21} pueden ser evaluados de dos formas diferentes. La primera consiste en estimar las distintas operaciones que han de ser llevadas a cabo durante el período de proyecto, calculando sus respectivos costes y actualizándolos al año de la construcción. Esta 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 período de análisis el gasto que se produce por ese concepto es un porcentaje b del coste de construcción C_1 de la sección de que se trate. Por tanto:

$$C_{21} = b/100 \cdot C_1 \cdot [(1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40}] \quad [3]$$

Si se considerase $a = 6 \%$,

$$C_{21} = 0,1505 \cdot b \cdot C_1 \quad [4]$$

Para poder evaluar los costes de las rehabilitaciones C_{22} es preciso prever qué operaciones de ese tipo se van a realizar durante el período de análisis. Si se han previsto, por ejemplo, actuaciones extraordinarias de conservación a los 10, 20, 30 y 35 años, de coste respectivo R_{10} , R_{20} , R_{30} y R_{35} , el coste actualizado del conjunto de las mismas vendrá dado por la expresión:

$$C_{22} = R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} \quad [5]$$

Si se considerase $a = 6 \%$,

$$C_{22} = 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} \quad [6]$$

El valor residual C_3 de una sección de firme es lo que esta sección cuesta al final del período 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 (aunque según algunos autores, sólo habría que considerar el coste de los materiales y no el de la puesta en obra):

$$C_3 = V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} \quad [7]$$

Si se considerase $a = 6 \%$,

$$C_3 = 0,0010 \cdot V \cdot C_1 \quad [8]$$

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 período de análisis. De todos modos, el valor residual suele influir poco en los análisis económicos, pues se sitúa al final del período, y tanto menos cuanto más alta sea la tasa de actualización.

En definitiva, el coste global de una sección vendrá dado por la expresión siguiente:

$$C = C_1 + b/100 \cdot C_1 \cdot \left[(1+a)^{-1} + (1+a)^{-2} + \dots + (1+a)^{-40} \right] + R_{10} \cdot (1+a)^{-10} + R_{20} \cdot (1+a)^{-20} + R_{30} \cdot (1+a)^{-30} + R_{35} \cdot (1+a)^{-35} - V/100 \cdot C_1 \cdot (1+a)^{-40} + C_4 \quad [9]$$

Si se considerase $a = 6 \%$,

$$C = C_1 + 0,1505 \cdot b \cdot C_1 + 0,56 \cdot R_{10} + 0,31 \cdot R_{20} + 0,17 \cdot R_{30} + 0,13 \cdot R_{35} - 0,0010 \cdot V \cdot C_1 + C_4 \quad [10]$$

6.4 ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN

En el proyecto, las secciones de firme no descartadas en una primera fase de evaluación técnica han de compararse, como se ha indicado en el apartado anterior, desde el punto de vista de sus costes de construcción y, en última instancia, de sus costes globales, incorporando para ello los costes de conservación ordinaria y los de rehabilitación estimados para el período de análisis establecido (así como, si fuese posible, los inducidos en los usuarios como consecuencia de las actuaciones de conservación).

El cálculo de los costes de construcción debe hacerse a partir de las secciones tipo establecidas para tramos rectos y por unidad de longitud, incluyendo, por tanto, los arceles. Así mismo, se ha de incluir el coste de la formación de la explanada, tanto en la opción de empleo de suelos de aportación como en la de estabilización in situ por incorporación de cal o de cemento. En las mediciones de las secciones se han de añadir los sobrecargos y los derrames que correspondan. Los costes unitarios empleados serán los de ejecución material, con la precisión a la que se haya llegado en el proyecto de trazado.

Los costes globales han de incluir, como ya se ha expuesto, tanto los de construcción como, convenientemente actualizados, los de conservación a lo largo del período de análisis, y el valor residual que se le pueda suponer a cada sección al final de dicho período. Los costes de conservación se establecerán de acuerdo con hipótesis verosímiles y suficientemente justificadas de estrategias de conservación ordinaria y de rehabilitación periódica para cada sección durante el período de análisis económico. Como mínimo, se han de considerar dos estrategias diferentes. De todas formas, para simplificar el proceso, la valoración de los costes de conservación se puede reducir a la sección de menor coste de construcción y a aquellas otras que no lo superen en más de un 20 %. Finalmente la sección de firme elegida será la que presente un coste global actualizado más bajo.

La estrategia de conservación y de rehabilitación de un tramo de carretera con características homogéneas se puede definir como el conjunto de actuaciones que sería preciso desarrollar durante su vida útil para que los indicadores de comportamiento del firme no traspasaran los límites establecidos. Su elaboración está vinculada a numerosos factores, de índole tanto técnica como económica:

- Tráfico.
- Disponibilidad de materiales.
- Tipo de sección estructural del firme.
- Medios humanos y materiales disponibles.
- Asignaciones presupuestarias anuales o plurianuales, etc...

El objetivo de una estrategia de conservación y de rehabilitación debe ser, con las restricciones correspondientes, lograr la más larga vida del firme con el menor coste. Esto lleva lógicamente a que no todas las estrategias que pudieran plantearse técnicamente sean económicamente adecuadas, pero todas ellas pueden incluirse en dos grandes grupos:

- El primer grupo de estrategias está formado por las que prevén fundamentalmente unas grandes operaciones de rehabilitación que han de realizarse en momentos concretos y muy separados en el tiempo, y que intentan restituir prácticamente las condiciones iniciales del firme.
- El otro grupo comprende las estrategias en las que se prevén principalmente unas operaciones frecuentes, de manera que las características iniciales del firme se vayan perdiendo con la mayor lentitud posible.

Las estrategias de conservación y de rehabilitación que deben ser consideradas para la determinación de los costes globales de las secciones de firme consideradas técnicamente adecuadas en el proyecto deben ser, según se ha indicado, como mínimo dos, en cuyo caso cada una de ellas debe estar encuadrada en los dos grupos que se acaban de describir. En todo caso, el proyectista solicitará de los correspondientes servicios de conservación las informaciones necesarias para establecer primero esas estrategias y, seguidamente, valorarlas económicamente.

ARCENES



7. ARCENES

7.1 GENERALIDADES

Salvo justificación en contrario, el firme de los arcenes de anchura no superior a 1,00 m será, por razones constructivas, prolongación del firme de la calzada adyacente. Su ejecución será simultánea, sin junta longitudinal entre la calzada y el arcén.

En arcenes de anchura superior a 1,00 m, su firme dependerá de la categoría de tráfico pesado prevista para la calzada y de la sección adoptada en ésta; se evitará en lo posible la aparición de nuevas unidades de obra. Salvo justificación en contrario, se adoptará una de las soluciones que se indican en los apartados siguientes, que están previstas para unas sollicitaciones del tráfico pesado acordes con las funciones propias de los arcenes.

Para las categorías de tráfico pesado T00 a T31 y en las vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías es preceptivo, por exigencias de seguridad de la circulación vial, que los arcenes dispongan de una capa de rodadura completa transversalmente y con la misma rasante que la calzada, de manera que no haya un escalón entre ambas superficies.

En el caso de que, de acuerdo con los estudios de tráfico, se consideren probables sollicitaciones más intensas que las que en principio corresponderían a la categoría de tráfico pesado adoptada, será posible justificar, con carácter excepcional, secciones de los arcenes de mayor capacidad estructural que las indicadas en este apartado, previa autorización de la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria d'Infraestructures i Transport. En este supuesto se podría llegar incluso a disponer el mismo firme que en la calzada, aprovechando las ventajas constructivas y permitiendo así en caso necesario utilizar los arcenes como carriles adicionales o, si a medio plazo fuera previsible, ensanchar la calzada a costa del arcén sin obligaciones constructivas adicionales.

7.2 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T00 A T21

En los firmes con capa de rodadura bituminosa, en todos los casos las capas de rodadura e intermedia del arcén serán prolongación de las dispuestas en la calzada y, por tanto, de idéntica naturaleza. Su espesor no bajará en ningún caso de 15 cm sobre zahorras artificiales y de 10 cm sobre capas tratadas con cemento.

Debajo del pavimento del arcén se podrá optar por disponer:

- Suelocemento, procurando enrasar con la cara inferior de las mezclas bituminosas de la calzada y en todo caso con el espesor mínimo indicado en el apartado 6.2.2. Esta solución con suelocemento, que preceptivamente será prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18, será preferente cuando se emplee este tipo de material o gravacemento en la calzada. El resto del espesor, hasta alcanzar la explanada, se completará con zahorra artificial.

- Zahorra artificial, procurando enrasar con la cara inferior de las mezclas bituminosas de la calzada y en todo caso con las limitaciones de espesores especificadas en el apartado 6.2.3.

Si se justifica por razones constructivas, y en el caso de que no se emplee en el firme de la calzada, en las categorías de tráfico pesado T1 o T21 el suelocemento podrá sustituirse por un suelo seleccionado o adecuado estabilizado in situ con cemento tipo S-EST3, con una resistencia a compresión simple a 7 días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18.

En los firmes con pavimento de hormigón, en las categorías de tráfico pesado T00 y T0, el pavimento del arcén será de hormigón en masa, de idénticas características que el utilizado en la calzada, y con un espesor mínimo de 15 cm, salvo en sus 50 cm interiores, en los que su espesor deberá coincidir, en todo caso, con el correspondiente al de la calzada. Hasta alcanzar la explanada se dispondrá una zahorra artificial o un suelocemento. El pavimento del arcén irá atado al pavimento de la calzada mediante barras de unión.

Para la categoría de tráfico pesado T1 y T21 los arcenes podrán pavimentarse con hormigón en masa o con mezcla bituminosa. Si se pavimentan con hormigón en masa se podrá utilizar una solución igual a la indicada para las categorías de tráfico pesado T00 y T0. Alternativamente se podrá pavimentar el arcén con hormigón magro de espesor uniforme, igual al pavimento de la calzada, con juntas transversales de contracción y atado a éste mediante barras de unión; hasta alcanzar la explanada se dispondrá una zahorra artificial o un suelocemento. Si se dispusiese un arcén con pavimento de mezcla bituminosa en caliente, sus características serán similares a las especificadas en el caso de calzadas con pavimento también de mezcla bituminosa.

La junta entre un pavimento de calzada de hormigón y un arcén también de hormigón deberá sellarse siempre.

7.3 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T22 Y T31

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 de los tipos PA o BBTM, en cuyo caso el pavimento del arcén se constituirá con 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 zahorra artificial hasta alcanzar la explanada; en todo caso las tongadas cumplirán las limitaciones de espesores contenidas en el apartado 6.2.3. Alternativamente, se podrá disponer bajo el pavimento una capa de suelocemento prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18 y con un espesor dentro de los límites indicados en el apartado 6.2.2; el resto, hasta llegar a la explanada, se completará con zahorra artificial. En este caso el suelocemento podrá sustituirse por un suelo seleccionado o adecuado estabilizado in situ con cemento tipo S-EST3, con una resistencia a compresión simple a 7 días no inferior a 2,5 MPa y prefisurado con los espaciamientos indicados en la tabla 18.

7.4 CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO T32 A T42

El arcén, enrasado siempre con la calzada, podrá no estar pavimentado, o tener un pavimento constituido por un riego con gravilla. El firme del arcén estará constituido por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; y el resto, hasta la explanada, podrá ser de zahorra artificial o de suelo seleccionado. Si no se pavimentase se proyectarán arcenes con zahorras cuyos finos tengan un índice de plasticidad (IP) entre 6 y 10.

En vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías el arcén tendrá un pavimento constituido por un tratamiento superficial, el cual podrá no disponerse en los demás casos. La capa de base estará constituida por zahorra artificial, procurando enrasar con una de las capas del firme de la calzada; el resto, hasta llegar a la explanada, será de zahorra, o de suelo seleccionado con un $\text{CBR} \geq 20$ en las condiciones especificadas de puesta en obra.

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS



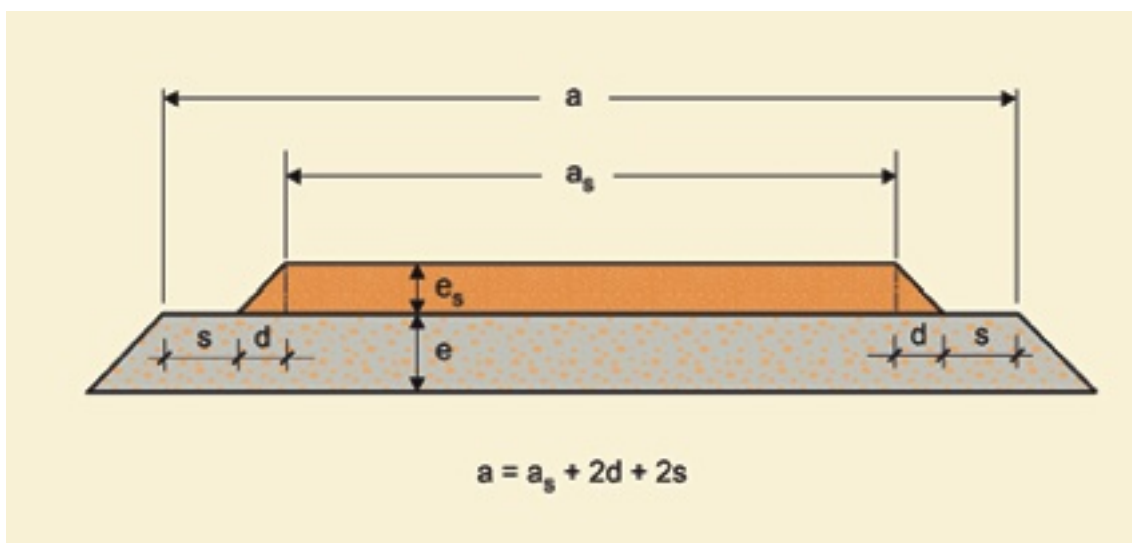
8. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

La anchura de la capa de rodadura rebasará a la teórica al menos en 20 cm por cada borde.

Cada capa del firme tendrá una anchura (a) en su cara superior, igual a la de la capa inmediatamente superior (a_s) más la suma de los sobreamanchos (d) y (s) indicados en la tabla 20. El sobreamancho (s) podrá aumentarse si existe necesidad de disponer de un apoyo para la extensión de la capa superior.

SOBREAMANCHO	MATERIAL	VALOR [cm]
Por derrames (d)	Pavimento de hormigón	0
	Hormigón magro	0
	Todos	e_s
Por criterios constructivos (s)	Mezclas bituminosas	5
	Hormigón magro	20
	Otros materiales con cemento	6 a 10
	Capas granulares	10 a 15

Tabla 20. Valores de sobreamanchos.



DEFINICIONES



9. DEFINICIONES

- **ARCÉN:** A efectos de aplicación de esta norma, se define como la franja longitudinal contigua a la calzada, dotada de firme, pero no destinada al uso por parte de vehículos automóviles más que en circunstancias excepcionales.
- **BERMA:** Franja longitudinal contigua al arcén, si existe, en el borde de la plataforma. Es una zona de seguridad y se utiliza para la eventual circulación de peatones y colocación de elementos auxiliares de la carretera.
- **CALZADA:** Parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos. Se compone de uno o de varios carriles.
- **CAPA DE BASE:** Capa del firme situada debajo del pavimento cuya misión es eminentemente estructural.
- **CAPA DE RODADURA:** Capa superior o única de un pavimento de mezcla bituminosa.
- **CAPA DE SUBBASE:** Capa del firme situada inmediatamente debajo de la capa de base y sobre la explanada, que puede no existir o, por el contrario, estar compuesta por varias capas.
- **CAPA ESTRUCTURAL:** véase **CAPA DE BASE**.
- **CAPA INTERMEDIA:** Capa de un pavimento de mezcla bituminosa situada debajo de la capa de rodadura.
- **CAPACIDAD DE SOPORTE:** Aptitud de un suelo, terraplén, desmonte o explanada para soportar las cargas de tráfico transmitidas a través de la sección de firme.
- **CARRIL:** Cada una de las franjas longitudinales en las que puede estar dividida la calzada, delimitada o no por marcas viales longitudinales, y con anchura suficiente para la circulación de una fila de automóviles que no sean motocicletas.
- **CARRIL DE PROYECTO:** Carril por el que circula el mayor número de vehículos pesados en una calzada.
- **CATEGORÍAS DE EXPLANADA:** Tipos de explanada que se establecen, según su capacidad resistente, a los efectos de dimensionamiento de la sección estructural del firme.
- **CATEGORÍAS DE TRÁFICO PESADO:** Intervalos que se establecen, a los efectos del dimensionamiento de la sección estructural del firme, para la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD_P) o para el tráfico equivalente de proyecto (TEP_{128kN}), según sea el nivel de calidad de la información disponible sobre del tráfico pesado.

- **CIMIENTO DEL FIRME:** Conjunto de capas de suelos naturales, suelos estabilizados u otros materiales que se encuentra bajo el plano de la explanada, que comprende la propia explanada y el terreno natural subyacente.
- **COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD (CA):** Número de ejes equivalentes de 128 kN (EE_{128kN}) que ejercen el mismo daño sobre el firme que el producido por el conjunto de ejes de un vehículo pesado determinado, a efectos del dimensionamiento de la sección de un firme.
- **COEFICIENTE DE AGRESIVIDAD MEDIO (CAM):** Valor promedio de los coeficientes de agresividad (CA) de los vehículos pesados. Este coeficiente puede aplicarse al conjunto total del tráfico pesado (CAM), o por separado para cada una de las categorías de vehículo pesado consideradas (CAM_i).
- **DESMONTE:** Excavación por debajo de la cota del nivel natural del terreno para realizar la explanación de una carretera.
- **EJE EQUIVALENTE (EE_{128kN}):** Eje de referencia para el dimensionamiento de la sección de firme y para la caracterización del tráfico pesado; se trata de un eje simple con ruedas gemelas, que soporta una peso total de 13 t, ejerciendo una presión teórica de contacto de 900 kPa, y cuya separación entre centros de ruedas es, a efectos de cálculo, de 31,92 cm.
- **EJE SIMPLE:** Aquel que dista del eje más próximo más de 1,50 m.
- **EJE TÁNDEM O DOBLE:** Conjunto de dos ejes acoplados, tal que la distancia entre ellos es inferior a 1,50 m.
- **EJE TRÍDEM O TRIPLE:** Conjunto de tres ejes acoplados, tal que la distancia entre cada dos de ellos consecutivos es inferior a 1,50 m.
- **ESTRUCTURA DEL FIRME:** Véase **SECCIÓN DE FIRME**.
- **EXPLANADA:** Superficie superior del cimiento de un firme, sea en desmonte o en terraplén, sobre la que se apoya el firme.
- **FIRME:** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados y, generalmente, tratados, que constituyen la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tráfico y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad.
- **FIRME FLEXIBLE:** Firme constituido por capas granulares no tratadas y, en general, por mezclas bituminosas, aunque en ocasiones puede haber sobre aquéllas sólo un tratamiento superficial.
- **FIRME RÍGIDO:** Firme con pavimento de hormigón.
- **FIRME SEMIRRÍGIDO:** Firme constituido por un pavimento bituminoso de cualquier espesor sobre una o más capas de gravacemento o de suelocemento, con espesor conjunto de éstas igual o superior a 20 cm.

- **FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:** Expresión matemática que permite estimar el número de aplicaciones de carga que un material puede soportar hasta su agotamiento, en función de un determinado parámetro característico de su comportamiento estructural.
- **GRAVACIMIENTO:** Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y ocasionalmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se puede utilizar como capa estructural en firmes de carreteras.
- **HORMIGÓN MAGRO:** Mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimento de hormigón, que se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación.
- **INTENSIDAD MEDIA DIARIA (IMD):** Número total de vehículos que circulan por una sección transversal de la carretera durante un año, dividido entre 365.
- **INTENSIDAD MEDIA DIARIA DE VEHÍCULOS PESADOS (IMD_P):** Número total de vehículos pesados que circulan por una sección transversal de la carretera durante un año, dividido entre 365.
- **LECHADA BITUMINOSA:** Mezcla fabricada a temperatura ambiente, con una emulsión bituminosa, áridos, agua y aditivos, cuya consistencia es adecuada para su puesta en obra y puede aplicarse en una o varias capas.
- **MEZCLA BITUMINOSA ABIERTA EN FRÍO:** Combinación de una emulsión bituminosa, áridos con un contenido de finos reducido y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante. Su proceso de fabricación no implica calentar el ligante ni los áridos, y su puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
- **MEZCLA BITUMINOSA DE ALTO MÓDULO:** Mezcla bituminosa en caliente en la que el valor del módulo de elasticidad a 20 °C es superior a 10.000 MPa.
- **MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE:** Combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y aditivos, de manera que todas las partículas de árido queden recubiertas de una película de ligante; su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos, y su puesta en obra se realiza a una temperatura sensiblemente superior a la ambiente.
- **MÓDULO DE ELASTICIDAD:** En un material de comportamiento esencialmente elástico es el cociente entre la tensión aplicada en un ensayo uniaxial y la deformación unitaria producida en el mismo eje.
- **PAVIMENTO DE HORMIGÓN:** Pavimento constituido por losas de hormigón en masa, separadas por juntas, o por una losa continua de hormigón armado; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

- **PERÍODO DE DISEÑO:** Período de tiempo en el que se pretende que el firme (o la capa que se considere) no presente una degradación estructural generalizada.
- **PLATAFORMA:** Zona de la carretera ocupada por la calzada, arcenes y bermas adyacentes.
- **SECCIÓN DE FIRME:** Conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados colocado sobre la explanada para soportar las cargas del tráfico y permitir la circulación en condiciones de seguridad y comodidad. Constituye la estructura resistente de la calzada o arcén y comprende en general, de abajo arriba, las capas de subbase, base y pavimento.
- **SISTEMA VIARIO DE LA COMUNITAT VALENCIANA:** Conjunto de carreteras, considerando como tales las vías de dominio y uso público proyectadas y construidas, fundamentalmente, para la circulación de vehículos automóviles, sin menoscabo de la debida consideración que en cada caso requerirán otros modos de transporte, como el peatonal, y los caminos de dominio público de cualquier clase aptos, al menos, para el tránsito rodado, independientemente de sus características y titularidad, que discurran por el territorio de la Comunitat Valenciana. No forman parte del Sistema Viario las vías urbanas, salvo que tales vías tengan la condición legal de travesía.
- **SUELO GRANULAR:** Suelo constituido por arenas y gravas en su mayor parte.
- **SUELO ESTABILIZADO IN SITU:** Mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento y agua, realizada en la propia traza de la carretera, que tiene por objeto mejorar determinadas propiedades de aquél, en especial su susceptibilidad a la acción del agua.
- **SUELOCEMENTO:** Mezcla homogénea de materiales granulares (zahorra, suelo granular o productos inertes de desecho), cemento, agua y eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se puede utilizar como capa estructural en firmes de carretera.
- **TERRAPLÉN:** Relleno formado por extensión y compactación de suelos por encima de la cota del terreno natural.
- **TONGADA:** Capa de material de un determinado espesor, extendida de una vez sobre una superficie regular.
- **TRÁFICO EQUIVALENTE DE PROYECTO (TEP_{128kN}):** Número acumulado de ejes equivalentes de 128 kN (EE_{128kN}) previsto para el carril de proyecto durante el período de diseño del firme.
- **TRAMO:** Longitud de vía o carretera entre dos secciones transversales de su trazado.
- **TRAMO DE PROYECTO:** Cada una de las partes en que queda dividida la longitud de la vía o carretera, y que se caracterizan por unos factores de diseño homogéneos.

- **TRATAMIENTO SUPERFICIAL:** Técnica de pavimentación cuyo objetivo es dotar al firme de unas ciertas características superficiales, sin aumento directo y apreciable de la capacidad resistente.
- **VEHÍCULO PESADO:** A efectos de esta norma, vehículo cuya masa total, incluida su carga, sea igual o superior a 3,5 t.
- **VEHÍCULO PESADO RÍGIDO:** Vehículo pesado de más de cuatro ruedas y sin remolque.
- **VEHÍCULO PESADO ARTICULADO:** El compuesto por un elemento tractor (cabeza tractora) y de un elemento remolcado (semirremolque); éste está normalmente provisto sólo de ejes traseros, y apoya, transmite y se articula sobre aquél.
- **VÍA DE SERVICIO:** Camino sensiblemente paralelo a una carretera, respecto de la cual tiene carácter secundario, conectado a ésta solamente en algunos puntos, y que sirve a las propiedades o edificios contiguos. Puede ser de sentido único o de doble sentido de circulación.
- **VIDA ÚTIL:** véase **PERÍODO DE DISEÑO**.
- **ZAHORRA ARTIFICIAL:** Material granular, de granulometría continua, constituido por partículas total o parcialmente trituradas, utilizado como capa de firme.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS



10. SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **IRI**: Índice de Regularidad Internacional [m/km o mm/m].
- **MPD**: *Mean Profile Depth* o profundidad media del perfil [mm].
- **ETD**: *Estimated Texture Depth* o profundidad estimada de textura [mm]. Se trata de una estimación estadística del resultado del ensayo de mancha de arena, obtenida a partir del valor de la MPD. En ausencia de estudios específicos puede emplearse la siguiente expresión:

$$ETD = 0,8 \cdot MPD + 0,2$$

- **MTD**: *Mean Texture Depth* o profundidad estimada de textura [mm]. Resultado del ensayo de mancha de arena.
- **CRL**: Coeficiente de Rozamiento Longitudinal. Es el cociente entre la fuerza horizontal que aparece en el punto de contacto entre neumático y pavimento en el mismo sentido de la marcha (o la proyección sobre esa dirección de una fuerza horizontal que tenga cualquier otra dirección) y la fuerza vertical que actúa sobre dicho punto de contacto. En la práctica, el valor del CRL depende del equipo que se emplee para su medida.
- **CRT**: Coeficiente de Rozamiento Transversal. Es el cociente entre la fuerza horizontal que aparece en el punto de contacto entre neumático y pavimento en el sentido perpendicular al de la marcha (o la proyección sobre esa perpendicular de una fuerza horizontal que tenga cualquier otra dirección) y la fuerza vertical que actúa sobre dicho punto de contacto. En la práctica, el valor del CRT depende del equipo que se emplee para su medida.



ANEXOS

PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE UNIDADES DE OBRA



A. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES DE UNIDADES DE OBRA

A.1 ZAHORRA ARTIFICIAL

A.1.1 Introducción

El Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento establece con carácter general las condiciones mínimas que han de satisfacer los materiales y los procedimientos empleados en la construcción y el control de las distintas unidades de obra, en particular las utilizadas en la constitución de los firmes y pavimentos (Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, publicada en el Boletín Oficial del Estado de 6 de abril de 2004). Sin embargo, algunas prescripciones requieren precisiones adicionales que deben ser establecidas por el Pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto (PPTP) o bien por el *director de las obras*.

Según establece el propio PG-3, lo indicado en el PPTP prevalece en cualquier caso sobre lo establecido en aquél. Por tanto, el PPTP no sólo debe en su caso precisar lo que no haya hecho el PG-3, sino que puede incorporar, modificar o suprimir prescripciones, a fin de adaptar las condiciones de ejecución de las obras a la realidad. Debe tenerse en cuenta a este respecto que el PG-3 tiene un ámbito territorial de aplicación muy extenso y variado, por lo que, en determinados lugares, resulta imprescindible adaptar las especificaciones generales al clima local, a los procedimientos constructivos habituales y a los materiales realmente disponibles sobre cuyo empleo existe una experiencia contrastada positiva.

En base a lo anterior, la Generalitat ha considerado conveniente redactar estas recomendaciones para la redacción de los PPTP, de manera que, sin alterar el espíritu ni la estructura del PG-3, se consiga la máxima adaptación a la realidad de la Comunitat Valenciana, sin merma, por supuesto, de la calidad finalmente conseguida. El PG-3 seguirá constituyendo la prescripción general de referencia, y en este sentido debe citarse expresamente en el pliego del proyecto. Adicionalmente, los párrafos correspondientes de estas recomendaciones deberán ser reproducidos íntegramente en el PPTP, añadiéndose además, si procede, las precisiones requeridas directamente por esos párrafos o por la redacción original del PG-3 en la medida en que no haya sido modificada.

A.1.2 Características generales de los materiales para zahorras

El apartado 510.2.1 es sustituido por texto que se recoge a continuación:

“Para cualquier categoría de tráfico pesado se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001 por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en este artículo, y se declare el origen de los mate-

riales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Asimismo, se tendrá en cuenta lo establecido en el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.”

A.1.3 Limpieza

En relación con lo dispuesto en el apartado 510.2.3 se adopta la siguiente redacción:

“El equivalente de arena, según la UNE-EN 933-8 (empleando la fracción 0/4 mm según se establece en su Anexo A), del material de la zahorra artificial deberá cumplir lo indicado en la tabla 510.1. De no cumplirse esta condición, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente, el equivalente de arena no deberá ser inferior en más de cinco unidades a los valores indicados en la tabla 510.1.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 a T1	T21 a T42 Arcenes de T00 a T22	Arcenes de T31 a T42
EA > 35	EA > 30	EA > 25

Tabla 510.1. Equivalente de arena (EA) de la zahorra artificial.

En el caso de la zahorra natural, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá disminuir en cinco (5) unidades cada uno de los valores mínimos exigidos en la tabla 510.1. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá establecer esa misma disminución de cinco (5) unidades en el valor mínimo del equivalente de arena en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras), así como en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales.”

A.1.4. Resistencia a la fragmentación

Se adopta la siguiente redacción en lugar de la recogida en el apartado 510.2.5:

“El coeficiente de Los Ángeles, según la UNE-EN 1097-2, de los áridos para la zahorra artificial no deberá ser superior a los valores indicados en la tabla 510.2.

Para materiales reciclados procedentes de capas de mezcla bituminosa de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones, así como para áridos siderúrgicos, el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior en cinco (5) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2, siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20, especificado en la tabla 510.3.1.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T1	T21 a T42 y Arcenes
30	35

Tabla 510.2. Valor máximo del coeficiente de Los Ángeles para los áridos de la zahorra artificial.

En el caso de los áridos para la zahorra natural, el valor máximo del coeficiente de Los Ángeles será superior en cinco (5) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2, cuando se trate de áridos naturales. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá establecer ese mismo aumento de cinco (5) unidades en el valor máximo del coeficiente de Los Ángeles en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras), así como en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales.

Para materiales reciclados procedentes de capas de mezcla bituminosa de firmes de carretera o de demoliciones de hormigones y para áridos siderúrgicos a emplear como zahorras naturales el valor del coeficiente de Los Ángeles podrá ser superior hasta en diez (10) unidades a los valores que se exigen en la tabla 510.2.”

A.1.5 Central de fabricación de la zahorra artificial

El texto siguiente sustituye al que figura en el apartado 510.4.1:

“La fabricación de la zahorra artificial para su empleo en firmes de calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T00 a T1 se realizará en centrales de mezcla. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo y la producción horaria mínima de la central.

En cualquier caso, la instalación deberá permitir dosificar por separado las distintas fracciones de árido y el agua en las proporciones y con las tolerancias fijadas en la fórmula de trabajo. El número mínimo de fracciones para las zahorras artificiales será de dos (2).

Las tolvas para los áridos deberán tener paredes resistentes y estancas, bocas de anchura suficiente para que su alimentación se efectúe correctamente, provistas de una rejilla que permita limitar el tamaño máximo, así como de un rebosadero que evite que un exceso de contenido afecte al funcionamiento del sistema de clasificación. Se dispondrán con una separación suficiente para evitar contaminaciones entre ellas. Estas tolvas deberán, asimismo, estar provistas a su salida de dispositivos ajustables de dosificación.

Los sistemas de dosificación de los materiales podrán ser volumétricos; no obstante, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el *director de las obras*, podrá establecer que sean en masa cuando la obra tenga una superficie de pavimentación superior a setenta mil metros cuadrados (70 000 m²).

Si se utilizan centrales de fabricación con dosificadores en masa, éstos deberán ser independientes; al menos uno (1) para cada una de las fracciones del árido. La precisión del dosificador será superior al dos por ciento ($\pm 2\%$).

El agua añadida se controlará mediante un caudalímetro, cuya precisión sea superior al dos por ciento ($\pm 2\%$), y un totalizador con indicador en la cabina de mando de la central.

Los equipos de mezcla deberán ser capaces de asegurar la completa homogeneización de los componentes dentro de las tolerancias fijadas.

Para la fabricación de las zahorras artificiales en vías con categorías de tráfico pesado T21 a T32, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá admitir la fabricación *in situ*. Ésta se realizará por medio de equipos específicos cuyas características deben ser definidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. En todo caso se debe garantizar con ellos una granulometría precisa y homogénea y un buen reparto del agua necesaria para la compactación. Estos equipos deben realizar las operaciones de dosificación, distribución del agua, mezcla y extensión en continuo, sin intervención manual. No deben presentar fugas, goteos ni obstrucciones, ni presentar desgastes o suciedad en sus elementos.

En las carreteras con categoría de tráfico pesado T41 y T42, en los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales, la fabricación de las zahorras artificiales se podrá llevar a cabo *in situ*.

El *director de las obras* aprobará el equipo de fabricación, una vez realizadas las pruebas de producción y comprobadas la correcta dosificación y homogeneización de la mezcla."

A.1.6 Equipos de extensión

El apartado 510.4.3 queda reducido al siguiente párrafo:

"En todos los casos el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá definir, o en su defecto el *director de las obras* deberá aprobar, los equipos de extensión de las zahorras."

A.1.7 Extensión de la zahorra

En el apartado 510.5.4 la redacción queda de la siguiente manera:

"Una vez aceptada la superficie de asiento se procederá a la extensión de la zahorra, en tongadas de espesor no superior a treinta centímetros (30 cm), tomando las precauciones necesarias para evitar segregaciones y contaminaciones. El *director de las obras* podrá aprobar la extensión de tongadas en espesores superiores al indicado si se comprueba que con los equipos de compactación disponibles se consiguen, tanto en la parte superior como en la inferior de la tongada, las densidades mínimas especificadas en el apartado 510.7.1.

Todas las operaciones de aportación de agua deberán tener lugar antes de iniciar la compactación. Después, la única admisible será la destinada a lograr, en superficie, la humedad necesaria para la ejecución de la tongada siguiente."

A.1.8 Densidad

El apartado 510.7.1 queda con la siguiente redacción:

“Para las categorías de tráfico pesado T00 a T1, la compactación de la zahorra artificial deberá alcanzar una densidad no inferior a la que corresponda al cien por cien (100%) de la máxima de referencia, obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.

En el caso de la zahorra natural o cuando la zahorra artificial se vaya a emplear en calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T21 a T42 o en arcenes, se podrá admitir una densidad no inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.

En el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares podrá admitir una densidad no inferior al noventa y cinco por ciento (95%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Proctor modificado, según la UNE 103501.”

A.1.9 Capacidad de soporte

El apartado 510.7.2 queda con la siguiente redacción:

“El control de la capacidad de soporte de las capas de zahorra se basará en los resultados de ensayos de auscultación de la deflexión mediante un deflectómetro de impacto configurado para ejercer una carga de 49 kN sobre una placa de 30 cm de diámetro, o equivalente en términos de presión de contacto sobre la superficie.

A partir de las deflexiones registradas por el deflectómetro, se calculará el módulo elástico de superficie de la capa, que representa su rigidez equivalente, aplicando la siguiente expresión:

$$E_n = \frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot r \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

donde E_0 es el módulo elástico de superficie de la capa, ν es el coeficiente de Poisson considerado (se tomará un valor de 0,35), σ_0 es la presión aplicada sobre la superficie, y d_0 la deflexión registrada bajo el punto de aplicación de la carga.

Los valores de referencia mínimos de los módulos elásticos de superficie serán los especificados en la tabla 510.5A, según la categoría de tráfico pesado considerada.

Los valores de la tabla 510.5A se refieren al valor característico del módulo elástico de superficie $E_{0,ck}$ obtenido como la media (m) menos una vez la desviación típica (s) de los resultados de al menos siete ensayos en el caso de longitudes a evaluar inferiores a 500 m, de diez ensayos para longitudes entre 500 y 1.000 m, o del número de ensayos que se obtenga como resultado de dividir entre 100 la longitud a evaluar cuando ésta sea superior a 1 000 m, es decir, realizando un ensayo cada 100 m.

Para poder llevar a cabo el control de capacidad de soporte de las capas de zahorra artificial por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto

de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

Si no se dispusiese de un deflectómetro de impacto, el *director de las obras* podrá autorizar el control de la capacidad de soporte mediante el ensayo de carga con placa. En ese caso, el valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (E_{v2}), según la NLT-357, será superior al menor valor de los siguientes:

- Los especificados en la tabla 510.5B, establecida según las categorías de tráfico pesado.
- Si la zahorra se apoya directamente sobre la explanada, el valor exigido a esta superficie multiplicado por uno coma tres (1,3).

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
T00 a T1	T21 y T22	T31 y T32	T41 y T42 Arcenes de T21 y T22	Arcenes de T31 a T42
375	345	290	215	175

Tabla 510.5A. Valores de referencia mínimos del módulo elástico de superficie $E_{o,ck}$ [MPa].

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
T00 a T1	T21 y T22	T31 y T32	T41 y T42	Arcenes de T31 a T42
250	150	100	75	60

Tabla 510.5B. Valores mínimos del módulo E_{v2} [MPa].

Además de lo anterior, el valor de la relación de módulos E_{v2}/E_{v1} será inferior a dos unidades (2,0), salvo que el *director de las obras* indicase otro valor.

Las mismas exigencias establecidas para los arcenes de carreteras con categorías de tráfico pesado T31 a T42 serán las que se apliquen en el caso de los caminos de dominio público de cualquier clase (vías no clasificadas como carreteras) y en las vías interiores, públicas o privadas, de las urbanizaciones residenciales."

A.1.10 Rasante, espesor y anchura

Se modifica el contenido del apartado 510.7.3 a fin de cambiar el límite entre las categorías de tráfico pesado a las cuales se les exigen valores distintos, de manera que esta prescripción queda de la siguiente forma:

“Dispuestos los sistemas de comprobación aprobados por el *director de las obras*, la rasante de la superficie terminada no deberá superar a la teórica en ningún punto ni quedar por debajo de ella en más de quince milímetros (15 mm) en calzadas de carreteras con categoría de tráfico pesado T00 a T1, ni en más de veinte milímetros (20 mm) en el resto de los casos. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o el *director de las obras* podrán modificar los límites anteriores.

En todos los semiperfiles se comprobará la anchura de la capa extendida, que en ningún caso deberá ser inferior a la establecida en los Planos de secciones tipo. Asimismo el espesor de la capa no deberá ser inferior en ningún punto al previsto para ella en los Planos de secciones tipo; en caso contrario se procederá según el apartado 510.10.3.”

A.1.11 Criterios de aceptación o rechazo del lote. Regularidad superficial

En relación con el contenido del apartado 510.10.5, su redacción queda como sigue a continuación:

“En el caso de la zahorra artificial, si los resultados de la regularidad superficial de la capa terminada exceden los límites establecidos, se procederá a escarificar la capa en una profundidad mínima de quince centímetros (15 cm) en toda la longitud afectada y se volverá a compactar y refinar por cuenta del Contratista.”

A.1.12 Especificaciones técnicas y distintivos de calidad

El último apartado del artículo 510 del PG-3 (el 510.12) debe adaptarse necesariamente al ámbito administrativo de la Generalitat, por lo que queda así:

“El cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias requeridas a los productos contemplados en este artículo, se podrá acreditar por medio del correspondiente certificado que, cuando dichas especificaciones estén establecidas exclusivamente por referencia a normas, podrá estar constituido por un certificado de conformidad a dichas normas.

Si los referidos productos disponen de una marca, sello o distintivo de calidad que asegure el cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo, se aceptará como tal cuando dicho distintivo esté reconocido por la Generalitat.

El certificado acreditativo del cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo podrá ser otorgado por la Direcció General d'Obres Públiques de la Conselleria de Infraestructures i Transport de la Generalitat o por los organismos españoles públicos y privados autorizados para realizar tareas de certificación o ensayos en el ámbito de los materiales, sistemas y procesos industriales, conforme al Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre.”

A.2 MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

A.2.1 Introducción

En el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento las especificaciones de las mezclas bituminosas en caliente están recogidas en los artículos 542 (Mezclas bituminosas en caliente) y 543 (Mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura). La redacción actual de ambos artículos fue aprobada por Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, publicada en el Boletín Oficial del Estado de 6 de abril de 2004. Sin embargo, la entrada en vigor el 1 de marzo de 2008 del mercado CE de las mezclas bituminosas en caliente, con carácter obligatorio, supone tener que definir estos materiales de acuerdo con las normas UNE-EN 13108 y caracterizarlos mediante los métodos de ensayo descritos en las normas UNE-EN 12697. En tanto en cuanto no se disponga de una guía de aplicación nacional en la que se fijen las opciones de ensayo a aplicar entre las que se recogen en las últimas normas citadas y se establezcan referencias de los correspondientes parámetros (dicho de otro modo: mientras no exista una nueva redacción de los dos citados artículos del PG-3 que no entre en contradicción con la nueva realidad derivada de la obligatoriedad del mercado CE) se estará en una situación transitoria que hay que intentar que se prolongue lo menos posible.

Por ello, la Generalitat ha considerado conveniente recoger en este Anejo a la Norma de Secciones de firme de la Comunitat Valenciana las precisiones indispensables para, al redactar los pliegos de prescripciones técnicas particulares de los proyectos, adaptarse a lo que impone el mercado CE de las mezclas bituminosas en caliente.

A.2.2 Tipos de mezclas bituminosas en caliente

Las Normas UNE-EN 13108 recogen los siguientes tipos de mezclas bituminosas en caliente:

- Hormigón bituminoso (*Asphalt Concrete, AC*).
- Hormigón bituminoso para capas de pequeño espesor (*Béton bitumineux très mince, BBTM*).
- *Soft Asphalt*.
- *Hot Rolled Asphalt, (HRA)*
- *Stone Mastic Asphalt, (SMA)*
- Mástico bituminoso (*Mastic Asphalt*).
- Mezcla porosa (*Porous Asphalt, PA*).

De todos estos tipos, solamente los hormigones bituminosos (AC), los hormigones bituminosos para capas de pequeño espesor (BBTM) y las mezclas porosas (PA) se utilizan de manera generalizada en España y están incluidos en las especificaciones del Ministerio de Fomento; sin embargo, las mezclas del tipo SMA se emplean cada vez más, al menos en

algunas regiones. Los AC incluyen las mezclas densas (D), semidensas (S) y gruesas (G), así como las mezclas de alto módulo (MAM), mientras que los BBTM incluyen tanto los microaglomerados del tipo M como los del tipo F.

La Norma UNE-EN 13108-8 se refiere a un octavo material no citado entre los anteriores: las mezclas recicladas. Pero dicha Norma no se refiere realmente a un tipo de mezcla, sino que en ella se considera el fresado como material constituyente del resto de mezclas bituminosas en caliente, especificando los requisitos para su clasificación y descripción.

A.2.3 Denominaciones de las mezclas bituminosas en caliente

Las mezclas del tipo AC se han de denominar de la siguiente forma:

AC D surf/bin/base ligante granulometría

donde:

- *D* es el tamaño máximo nominal del árido (16, 22 o 32 mm).
- *surf/bin/base* son los indicativos de las capas en las que puede ir situada la mezcla bituminosa (rodadura, intermedia o base).
- *ligante* es el tipo que se utilice según las normas europeas, sea betún asfáltico (norma EN 12591), betún asfáltico duro para mezclas de alto módulo (norma EN 13924) o betún modificado (norma EN 14023).
- *granulometría* es el tipo de huso empleado según la denominación tradicional española: D, S, G o MAM.

En cuanto a las mezclas del tipo BBTM su denominación responde al siguiente esquema:

BBTM D clase ligante

donde *D* (8 u 11 mm) y *ligante* se refieren a lo mismo que en el caso anterior y la *clase* puede ser una de las cuatro definidas en la norma UNE-EN 13108-2: A, B, C o D, correspondiendo la clase A a las mezclas españolas del tipo F y la clase B a las mezclas M.

Finalmente, la denominación de las mezclas porosas es:

PA D ligante

siendo el tamaño máximo nominal del árido de estas mezclas 11 o 16 mm.

Los tamaños máximos nominales citados no excluyen otros posibles que pueden resultar más convenientes en determinadas circunstancias. Por ejemplo, en capas de regularización se podrán utilizar, como ahora es habitual, mezclas del tipo AC con un tamaño máximo nominal de 11 mm o incluso de tan sólo 8 mm.

A.2.4 Empleo de las mezclas bituminosas en caliente

En la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana se han establecido las condiciones de utilización de los distintos tipos de mezclas bituminosas en caliente indicadas en la tabla A.1.

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T00 a T21	T22 y T31	T32 a T42
Rodadura	PA 11 ⁽¹⁾	4		
	BBTM 11 B M	3		
	BBTM 8 B M		2	
	BBTM 11 A F	3		
	BBTM 8 A F		2	
	AC 16 surf D	5-6	5	
	AC 22 surf D			
	AC 16 surf S			
AC 22 surf S				
Intermedia	AC 22 bin D	5-10		
	AC 22 bin S			
	AC 32 bin S			
	AC 22 bin G ⁽²⁾			
	AC 32 bin G ⁽²⁾			
	AC 22 bin 15/25 AM	7-13		
Base	AC 32 base S	7-15		
	AC 22 base G			
	AC 32 base G			
	AC 22 base 15/25 AM	7-13		

Tabla A.1. Espesores de las capas de mezcla bituminosa.

⁽¹⁾ Se podrán proyectar pavimentos con mezcla drenante PA, siempre que se justifique detalladamente su idoneidad para el caso concreto del que se trate. La justificación deberá tener en cuenta, entre otros factores, la inclinación longitudinal de la vía, la pluviometría de la zona, la intensidad total del tráfico y la necesidad de reducir el ruido en las márgenes de la carretera. En cualquier caso, la longitud pavimentada con este tipo de mezcla no será inferior a 500 m.

⁽²⁾ Las mezclas tipo AC 22 bin G y AC 32 bin G únicamente podrán emplearse cuando la capa de rodadura sea tipo AC (es decir, nunca bajo rodaduras tipo PA o BBTM) y con una dotación mínima de ligante del 4,0 % en masa sobre el total del árido seco incluido el polvo mineral (3,85% sobre la masa total de la mezcla).

A.2.5 Husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente

Las mezclas bituminosas en caliente del tipo AC (hormigones bituminosos) deberán tener granulometrías que se inscriban en los siguientes husos que se indican en la tabla A.2.a.

TAMICES UNE-EN 933-2 (MM)	AC16D	AC22D	AC16S	AC22S	AC32S	AC22G	AC32G	AC22MAN
45					100		100	
32		100		100	90-100	100	90-100	100
22	100	90-100	100	90-100		90-100		90-100
16	90-100	73-88	90-100	70-88	68-82	65-86	58-76	70-88
8	64-74	55-70	60-75	50-66	50-66	40-60	35-54	50-66
4	44-59		35-50					
2	31-46	31-46	24-38	24-38	24-38	18-32	18-32	24-38
0,500	16-27	16-27	11-21	11-21	11-21	7-18	7-18	11-21
0,250	11-20	11-20	7-15	7-15	7-15	4-12	4-12	8-15
0,063	4-8	4-8	3-7	3-7	3-7	2-5	2-5	6-9

Tabla A.2.a. Husos granulométricos de los hormigones bituminosos.

Las mezclas PA y BBTM tendrán las mismas granulometrías que las actuales mezclas PA, por un lado, y F y M por otro, definidas, respectivamente, en los hasta ahora vigentes artículos 542 y 543 del PG-3 (en la nueva redacción de estos artículos, ambos tipos de mezclas pasan a estar especificados en el artículo 543), adaptando los tamices de mayor tamaño a la nueva serie. En la tabla A.2.b se definen estos husos.

TAMICES UNE-EN 933-2 (MM)	BBTM 8B*	BBTM 11B*	BBTM 8A*	BBTM 11A*	PA 11
16	100	100	100		
11,2	100	90-100	100	90-100	90-100
8	90-100	60-80	90-100	62-82	50-70
5,6	42-62	50-70			
4	17-27	17-27	28-38	28-38	13-27
2	15-25	15-25	25-35	25-35	10-17
0,500	8-16	8-16	12-22	12-22	5-12
0,063	4-6	4-6	7-9	7-9	3-6

Tabla A.2.B. Husos granulométricos de las mezclas para capas de rodadura de los tipos BBTM y PA.

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz de 4 mm y es retenida por el tamiz de 2 mm será inferior al ocho por ciento (8 %)

A.2.6 Dotaciones mínimas de ligante de las mezclas bituminosas en caliente

Las dotaciones mínimas de betún se expresarán siempre sobre la masa total de la mezcla y serán las que se indican en la tabla A.3.

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	DOTACIÓN MÍNIMA (% s/m)
Rodadura	PA 11	4,30
	BBTM 11 B M	4,75
	BBTM 8 B M	4,75
	BBTM 11 A F	5,20
	BBTM 8 A F	5,20
	AC 16 surf D	4,55
	AC 22 surf D	4,55
	AC 16 surf S	4,55
	AC 22 surf S	4,55
Intermedia	AC 22 bin D	3,85
	AC 22 bin S	3,85
	AC 32 bin S	3,85
	AC 22 bin G	3,85
	AC 32 bin G	3,85
	AC 22 bin 15/25 MAM	5,00
Base	AC 32 base S	3,40
	AC 22 base G	3,40
	AC 32 base G	3,40
	AC 22 base 15/25 MAM	5,00

Tabla A.3. Dotaciones mínimas de betún (tanto por ciento sobre la masa total de la mezcla).

A.2.7 Características exigibles al árido grueso

Para los áridos gruesos empleados en la capa de rodadura se exigirá un coeficiente de pulimento acelerado mínimo determinado según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-8. Los valores a exigir serán los siguientes: mayor o igual a 56 para la categoría de tráfico pesado T00; mayor o igual a 50 para las categorías de tráfico pesado T0 a T22; mayor o igual a 44 para el resto de categorías de tráfico pesado y para arcenes.

A.2.8 Criterios básicos de caracterización de propiedades de las mezclas bituminosas en caliente

Los hormigones bituminosos (AC) y los hormigones bituminosos para capas de pequeño espesor (BBTM) se caracterizarán en función de la proporción de huecos en mezcla, de la sensibilidad a la acción del agua y de la resistencia a las deformaciones plásticas. Por su parte, las mezclas porosas (PA) se caracterizarán en función de la proporción de huecos en mezcla y de la sensibilidad a la acción del agua.

En relación con los huecos en mezcla se exigirán los mismos valores recogidos en los artículos 542 o 543, según corresponda, del PG-3. Las probetas de los hormigones bituminosos del tipo AC16 y AC22 se compactarán por impactos mediante 75 golpes por cara según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-30; las probetas de las mezclas de los tipos BBTM y PA se compactarán según el mismo procedimiento, pero mediante 50 golpes por cara; finalmente, para las mezclas del tipo AC32 se seguirá el procedimiento de compactación por vibración descrito en la norma UNE-EN 12697-32, utilizando un tiempo de vibración de ciento veinte segundos (120 s).

Para valorar la sensibilidad al agua (norma UNE-EN 12697-12) se utilizará la resistencia conservada (relación porcentual entre la resistencia de probetas tras inmersión en agua –entre 68 y 72 h a 40° C– y la de probetas que no han estado en agua) medida el ensayo de tracción indirecta a 15° C (norma UNE-EN 12697-23). Las probetas se deberán fabricar en todos los casos, salvo para las mezclas del tipo AC32, mediante 50 golpes por cara según el procedimiento de compactación por impactos descrito en la norma UNE-EN 12697-30; para las mezclas del tipo AC32, se seguirá el procedimiento de compactación por vibración descrito en la norma UNE-EN 12697-32, aplicando un tiempo de vibración de ochenta segundos (80 s). Las resistencias conservadas obtenidas habrán de superar en todo tipo de mezclas el ochenta por ciento (80 %).

La resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas de los tipos AC y BBTM se evaluará mediante el ensayo de pista de laboratorio descrito en la norma UNE-EN 12697-22; entre las opciones contempladas en esta norma se utilizarán el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, una temperatura de 60° C y la aplicación de carga durante diez mil (10 000) ciclos. Las probetas deberán haber sido compactadas según la norma UNE-EN 12697-33, con el dispositivo de rodillo de acero.

En las mezclas de alto módulo (AC 22 MAM) se verificará que el módulo dinámico a 20° C, determinado según el anexo C de la norma UNE-EN 12697-26, es superior a 11 000 MPa.

Para las mezclas porosas (PA) se valorará el escurrimiento de ligante según la norma UNE-EN 12697-18. Además, para estas mezclas se mantienen las prescripciones actuales recogidas en el PG-3 sobre la limitación de pérdida de partículas a 25° C, que se valorará según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-17.

VALIDACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EXPLANADAS Y CAPAS GRANULARES



B. VALIDACIÓN DEL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE EXPLANADAS Y CAPAS GRANULARES

B.1 INTRODUCCIÓN

La explanada, o más generalmente, su cimiento, tiene una importancia decisiva en el comportamiento del firme, que depende en gran medida de las características de los suelos sobre los que se apoya.

Por otro lado, una de las misiones de la sección de firme es la distribución de las cargas de tráfico a través de las diferentes capas que la componen, con el objetivo de que las tensiones que lleguen al soporte de la misma sean lo suficientemente reducidas como para que no se produzcan deformaciones permanentes que acabarían reflejándose en la rodadura. Por tanto, la calidad de los materiales del cimiento del firme, y de su puesta en obra, influyen de manera determinante no sólo en las características de los materiales que apoyan sobre él, sino también en los espesores definitivos de las capas.

En general, para un mismo nivel de solicitaciones de tráfico, una mayor capacidad portante del cimiento del firme supone que los espesores de las diferentes capas de la sección sean más reducidos respecto a los que sería necesario disponer sobre explanadas de inferior categoría. Por otra parte, si el firme se ha dimensionado suponiendo una determinada capacidad de soporte del cimiento, y por diversos motivos, no se haya podido alcanzar en obra la misma, la vida del firme se verá mermada significativamente.

También en las capas de base de zahorra artificial, con función eminentemente resistente, para lograr ésta, es imprescindible alcanzar una elevada compacidad tras la puesta en obra.

Por tanto, la evaluación cuantitativa de la capacidad de soporte del cimiento del firme, y del grado de compactación de las capas granulares, mediante la realización de ensayos, es imprescindible. Generalmente, el método empleado, y prescrito en las diferentes normativas de firmes, es el ensayo de carga con placa; estos ensayos, pese a ser de empleo prácticamente universal y presentar correlaciones empíricas con el comportamiento del cimiento, presentan el inconveniente de ser extremadamente lentos (lo que limita el número de ensayos realizables, sin interferencia con el progreso normal de la obra, y precisión de la caracterización espacial de la explanada), además de que no simulan la aplicación de las cargas reales del tráfico.

Con el fin de mitigar los inconvenientes que el ensayo de carga con placa presenta, con motivo de los trabajos de redacción de la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana se han desarrollado ensayos de validación del deflectómetro de impacto para la caracterización de explanadas y capas granulares, y para la evaluación de su capacidad de soporte. La metodología de trabajo, así como los resultados de dichos ensayos se exponen en este anejo.

B.2 EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

El deflectómetro de impacto es un equipo con el que se puede evaluar la capacidad estructural de un firme, o la capacidad de soporte de una explanada o capa granular, de manera no destructiva.

El ensayo consiste en la aplicación de una carga al terreno (o firme), mediante un impulso generado por una masa que se deja caer desde una altura determinada sobre un sistema amortiguador, que, a su vez, la transmite hacia una placa circular que se apoya sobre la superficie ensayada. Su objetivo es simular el paso de un eje de un vehículo pesado cargado, para medir la respuesta del terreno ante la aplicación de dicha solicitación. Conociendo la carga aplicada, la respuesta del cimiento, y la naturaleza y estructura del mismo, pueden deducirse las tensiones y deformaciones en cada punto.

El vehículo portador o remolcador del equipo de ensayo se detiene en la sección a auscultar, y se sitúa la placa de apoyo sobre el punto deseado. La placa y los sensores de deflexiones se sitúan en la superficie del pavimento con la configuración especificada. La masa se eleva hasta la altura requerida según el nivel de carga a aplicar. Cuando la masa cae, la fuerza es distribuida por la placa sobre la superficie del firme; en ese momento, se registra el movimiento vertical (deflexión) de dicha superficie bajo los sensores, mediante la instrumentación y equipos electrónicos e informáticos adecuados. Generalmente, en un mismo punto se realizan varios ensayos aplicando diferentes niveles de carga, modificando la altura de caída de la masa.

Para el desarrollo de los trabajos se contó con un deflectómetro de impacto modelo *KUAB-FWD 50*, configurado para generar cargas nominales de 49 kN (5.000 kg) y 64 kN (6.500 kg), obtenidas al dejar caer una doble masa desde una altura determinada sobre una placa circular de 150 mm de radio; esto equivale a aplicar una presión de contacto sobre el firme de 0,694 y 0,902 MPa, respectivamente. El equipo registra la deflexión (deformación vertical de la superficie del firme) bajo el punto de aplicación de la carga y en otros seis puntos situados a una distancia radial del mismo de 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm respectivamente, mediante unos sensores tipo LVDT, lo que permite obtener el denominado cuenco de deflexión o línea de influencia de la deformada.

B.3 LA CARACTERIZACIÓN MEDIANTE DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

Uno de los problemas del ensayo de carga con placa es la lentitud del mismo; en condiciones óptimas, el rendimiento aproximado de un equipo es de aproximadamente 8 ensayos en una jornada. Lo que significa que, ensayando un punto cada kilómetro, en una jornada se habrán ensayado unos 8 km de explanada. Para caracterizar la explanada con precisión, un punto en un kilómetro es estadísticamente insuficiente, por lo que sería deseable aumentar la frecuencia espacial de muestreo, digamos, hasta los 10 ensayos cada kilómetro (un punto cada 100 m). De esta forma, el equipo de carga con placa auscultaría una distancia inferior al kilómetro cada jornada de trabajo.

El deflectómetro de impacto permite rendimientos mucho mayores, del orden de 30 puntos de ensayo por hora; es decir, aproximadamente, ensayando cada 100 m para una caracterización representativa de la explanada, unos 24 km en una jornada de trabajo en

condiciones normales. Con operadores suficientemente experimentados, estos rendimientos pueden ser fácilmente superiores.

Como ya se ha indicado anteriormente en este documento, el deflectómetro de impacto, mediante la aplicación de una carga de magnitud definida, registra la deflexión obtenida bajo el punto de aplicación de la carga y en otros seis puntos situados a una distancia radial del mismo de 20, 30, 45, 60, 90 y 120 cm respectivamente.

La carga aplicada, gracias a la configuración de la placa que transmite el impacto al terreno, es asimilable a una carga flexible circular, de radio a y presión uniforme q . Suponiendo que la carga se aplica sobre un semiespacio indefinido de módulo de elasticidad E y coeficiente de *Poisson* ν , la deflexión en la superficie, bajo el punto de aplicación de la carga, será (ecuación de Boussinesq):

$$d_0 = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{E} \rightarrow E = \frac{2 \cdot q \cdot a \cdot (1 - \nu^2)}{d_0}$$

En general, puede suponerse un coeficiente de *Poisson* de 0,35 para el macizo semiindefinido, por lo que para cada impacto del deflectómetro, el resto de las variables serán conocidas, pudiendo determinar el módulo E del mismo.

Si se realizan ensayos con deflectómetro cada 100 m (o incluso cada 50 m si el proceso normal de la obra lo permite), es posible establecer para cada kilómetro un módulo de elasticidad medio (E_m) y la desviación típica del mismo (E_s), de forma que se puede adoptar un módulo característico (E_{ck}), estadísticamente representativo, de la siguiente forma:

$$E_{ck} = E_m - E_s$$

El objetivo del trabajo de validación abordado en la Norma de Firmes de la Comunitat Valenciana es establecer, a la vista de los resultados obtenidos en el mismo, los valores de referencia exigidos, bien de módulos de elasticidad, bien de deflexión tanto para capas granulares como para explanadas en las obras de carreteras.

B.4 CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CAPAS GRANULARES CON DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

Respecto a los ensayos habituales sobre firmes flexibles, con el objetivo de definir la mejor solución de rehabilitación estructural, se considera necesario señalar las siguientes consideraciones cuando el ensayo se realiza sobre capas granulares:

- Es imprescindible efectuar un impacto previo, denominado de asentamiento, antes de los impactos de ensayo. Si bien este impacto es importante también en los ensayos sobre pavimentos bituminosos, en capas granulares o explanadas, habitualmente menos uniformes en su superficie, es decisivo, de forma que en los impactos sucesivos al de asentamiento se pueden registrar valores de la deflexión bajo punto de aplicación de la carga del orden de un 35 % inferior a la registrada en el inicial (en pavimentos de mezcla bituminosa, las diferencias suponen apenas el 5 %).

- Es habitual registrar comportamientos erráticos en los sensores más alejados del punto de aplicación de la carga. Evidentemente, no podemos esperar que un medio granular, constituido por partículas discretas, se comporte exactamente como un continuo ideal de la mecánica clásica.
- En las explanadas más débiles, de categorías más bajas, es posible que se registren deflexiones demasiado altas; en ese caso, se debería reducir la carga aplicada.
- Aunque se realicen las suposiciones habituales, que consideran el medio como un macizo semiindefinido elástico, homogéneo, e isótropo, la realidad es que las deflexiones en materiales granulares y explanadas dependen de otros parámetros como son el grado de compactación, el contenido de humedad, el ángulo de rozamiento interno de los materiales, la cohesión de los mismos, etc. Por tanto, estos parámetros deben ser considerados a la hora de establecer los módulos elásticos de referencia.

B.5 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Como se ha comentado previamente, el principal objeto del proceso es obtener la validación de los deflectómetros de impacto como sistema de control alternativo a la realización de ensayos de carga con placa.

Aunque el uso más convencional del deflectómetro es el análisis sobre capas de rodadura tanto asfálticas como de hormigón ya existentes, las particularidades del equipo *KUAB* y las de cualquier tipo de deflectómetro de impacto hacen que sea totalmente factible realizar mediciones directamente sobre capas granulares o de tierra, ya que en sus orígenes en Suecia fue utilizado con esta función. Dichas particularidades son: un plato flexible, segmentado en cuatro secciones, cada una de las cuales recibe un cuarto de la carga, lo que en definitiva permite acomodarse a las irregularidades del terreno y repartir uniformemente la carga; la otra, es que los sensores que miden la deformación son sismómetros (LVDT) que permiten leer deflexiones de hasta 5 mm.

En este trabajo, los ensayos se realizaron sobre superficies terminadas (compactadas y refinadas) de explanada, de zahorra artificial y explanadas estabilizadas con cemento. Las campañas de ensayos se han llevado a cabo en carreteras pertenecientes a la Generalitat, Diputaciones de Castellón, Valencia y Alicante y Ministerio de Fomento, que se encontraban en fase de ejecución en las fechas en las cuáles se desarrollaron los ensayos.

Las campañas de ensayos se llevaron a cabo desde el 25 de junio de 2007 hasta el 8 de diciembre de 2007, a lo largo de las tres provincias de la Comunitat Valenciana.

Se han desarrollado ensayos en un total de 16 carreteras, de las cuales algunas han sido ensayadas por duplicado, tanto a nivel de explanada, como posteriormente sobre capa granular. Este doble nivel de ensayos habría sido un objetivo deseable en todas en ellas, pero la naturaleza de la obra, sus dificultades intrínsecas y los ritmos de trabajo de las mismas han hecho que no siempre haya sido posible su consecución.

Uno de los retos más complejos en el desarrollo de la presente investigación desde el punto de vista logístico fue la planificación de los ensayos en cada una de las obras y la coordinación de los equipos (deflectómetro y placa de carga), con los ritmos de trabajo de

las mismas, que en la mayor parte de ocasiones sufrieron retrasos conforme a las fechas previstas por factores de diversa índole, como las adversas condiciones atmosféricas, lo que obligó a un reajuste continuo del calendario de trabajos.

Respecto a las condiciones de desarrollo de los ensayos de campo, éstos se han realizado siempre en el mismo día y lugar para ambos tipos de control (deflectometría y carga con placa).

Para el ensayo de carga con placa se utilizó la placa de 30 cm de diámetro, realizando su ensayo de acuerdo a la norma NLT 357/98. En el caso del deflectómetro, la secuencia de actuación en cada punto analizado fue la siguiente: un primer ensayo de asentamiento, y posterior a éste, se llevan a cabo ensayos con dos cargas de 49 y de 64 kN, respectivamente.

Cada día de trabajo se anotaron los siguientes datos, con la finalidad de obtener una mejor caracterización del tramo de estudio:

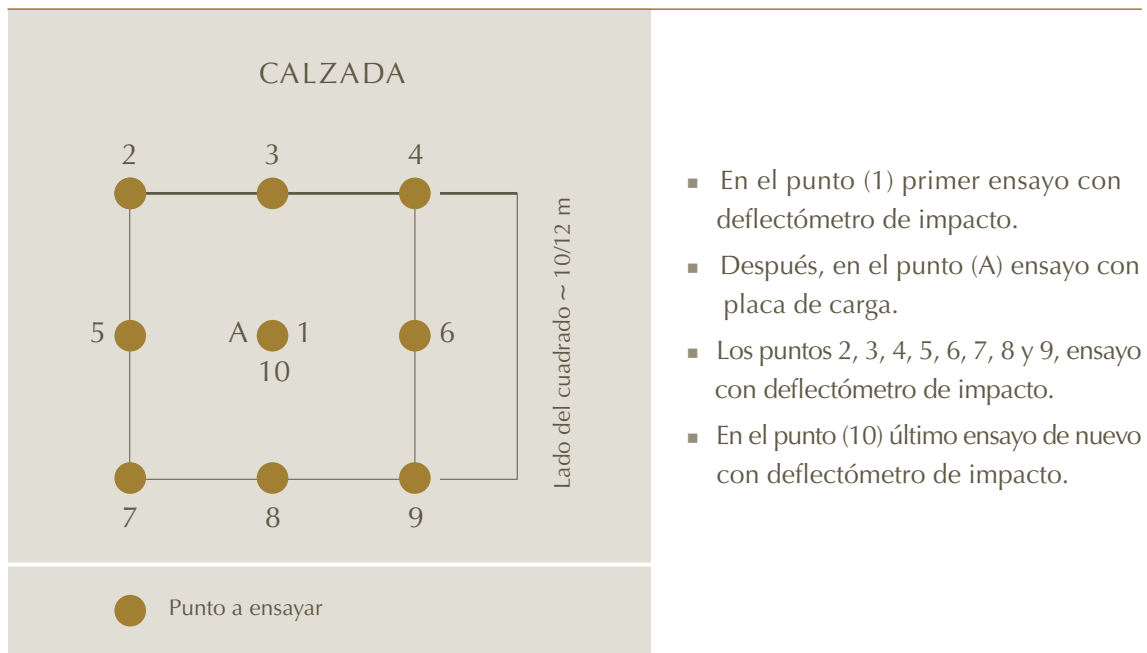
- Nombre de la obra e identificación de la carretera.
- Tipo de superficie ensayada: explanada, explanada estabilizada o zahorra.
- Datos sobre el material subyacente, recabándose toda la información posible al respecto, de modo que permita una buena caracterización del mismo.
- Fecha (día, mes y año).
- Hora de inicio y de finalización.
- Condiciones meteorológicas. Descripción cualitativa y cuantitativa (siempre que ha sido posible) de las condiciones meteorológicas previas al día del ensayo, así como la temperatura ambiente en el momento de realizar el ensayo correspondiente.
- Nombre y tarea de las personas que participan con especial atención a:
 - Operador responsable del deflectómetro de impacto.
 - Operador responsable de la placa de carga.
 - Referencia física de los lugares de ensayo: si está en desmonte o en terraplén, orografía de la zona, cultivos en las zonas colindantes, etc.)
 - P.K. de obra u otra referencia válida.
 - Coordenadas GPS de cada punto de ensayo.
 - Reportaje fotográfico con cámara digital de cada zona de ensayo.

Además se realizó un reportaje fotográfico completo de cada uno de los tramos analizados incluyendo imágenes de los equipos e imágenes de los ensayos conformando un reportaje global de toda la campaña.

Antes de la realización del ensayo de carga con placa se recabaron datos del camión utilizado para el mismo:

- Tipo de camión (marca y modelo).
- Verificación mediante báscula contrastada de la carga del eje y de la presión de los neumáticos.

- Matrícula y nombre del propietario o conductor.
- La metodología empleada para las campañas simultáneas de deflectómetro y placa de carga fue la siguiente:
 1. Se selecciona el punto de ensayo de carga con placa de acuerdo a los criterios de la norma NLT 357/98; la selección de los puntos a ensayar es tomada por el técnico responsable de la carga con placa y en función de los condicionantes particulares de la obra en cuestión.
 2. Sobre la zona del punto seleccionado se marca físicamente un cuadrado de aproximadamente 10/12 m de lado.
 3. Se organiza la realización de los ensayos con deflectómetro de impacto de acuerdo con el siguiente croquis y procedimiento:



El primer punto de ensayo del deflectómetro se encuentra aproximadamente en el centro de la retícula y es el punto donde inmediatamente después se va a realizar el ensayo de carga con placa. El ensayo de carga con placa es un proceso caro, lento y engorroso, que prácticamente necesita 1 h por punto ensayado. Mientras éste se está llevando a cabo en el centro del cuadrado, el deflectómetro realiza 8 ensayos más en los puntos ubicados en las esquinas y centros de los lados del cuadrado (ver croquis). Una vez terminado el ensayo de placa se volverá a ensayar el punto central con deflectómetro para poder contrastar el efecto que ejerce la placa sobre el terreno.

Por tanto, siempre que las dimensiones de la plataforma a analizar lo han permitido, por cada ensayo de carga con placa se han realizado 10 ensayos con deflectómetro de impacto atendiendo a la metodología previamente explicada. En algunas ocasiones, donde el ancho de la carretera a ensayar no permitía maniobrar a los equipos de auscultación, se han redu-

cido las dimensiones de la malla o sido necesario analizar los puntos en línea, con lo que el número de puntos ensayados con el deflectómetro puede haber disminuido ligeramente.

Para definir la equidistancia entre los puntos a ensayar, con la finalidad de obtener una mejor caracterización de los suelos y capas granulares analizadas, disminuyendo el riesgo de defectos ocultos, se utilizó el siguiente criterio en función de la longitud de los tramos:

En tramos cuya longitud sea inferior a 3 000 m, los ensayos se realizaron cada 50 m. Este valor es orientativo y pudo haber variado en función de las condiciones in situ y de las limitaciones del tramo en sí.

En tramos de longitud mayor o igual a 3 000 m, los ensayos presentaron una equidistancia de 150 m, pudiendo variar ligeramente bajo el criterio del técnico responsable atendiendo a los condicionantes propios del tramo.

En la tabla B.1 se puede observar la gran cantidad de puntos de ensayo a lo largo de toda la campaña así como en número de análisis llevados a cabo por el deflectómetro en los diferentes tipos de material:

CARRETERA	TITULARIDAD	PUNTOS DE ENSAYO	Nº ENSAYOS	TIPO DE MATERIAL
Nº 1	Fomento	29	164	Suelo estabilizado
Nº 2	Fomento	6	23	Suelo estabilizado
Nº 3	Fomento	25	133	Suelo estabilizado
Nº 4	Fomento	5	20	Suelo estabilizado
Nº 5	Fomento	6	48	Suelo estabilizado
Nº 6	Consellería	15	77	Suelo seleccionado
Nº 7	Consellería	5	26	Suelo seleccionado
Nº 8	Diputación	47	378	Suelo seleccionado
Nº 9	Consellería	15	148	Suelo seleccionado
Nº 10	Diputación	16	75	Suelo seleccionado
Nº 11	Consellería	42	233	Suelo seleccionado
Nº 12	Consellería	5	20	Zahorra artificial
Nº 13	Diputación	46	459	Zahorra artificial
Nº 14	Diputación	69	477	Zahorra artificial
Nº 15	Consellería	26	127	Zahorra artificial
Nº 15	Fomento	62	232	Zahorra artificial
Total		419	2.640	

Tabla B.1. Relación de carreteras ensayadas.

De todos los ensayos realizados se han guardado los datos brutos, incluidas todas las lecturas de los comparadores de la placa de carga. Todos ellos forman parte de un sistema de archivo en el cuál han sido sometidos a una fase de depuración para su posterior tratamiento analítico y estadístico.

B.6 RESULTADOS OBTENIDOS

En las páginas siguientes se resumen los resultados obtenidos en la campaña de ensayos realizada conjuntamente con placa de carga y deflectómetro de impacto.

En primer lugar, se estudian los valores registrados por el deflectómetro de impacto. A este respecto, en la tabla B.2 se recogen los valores medios de los ensayos por tipo de capa.

TIPO DE MATERIAL	Nº DE ENSAYOS	CARGA MEDIA [kN]	MÓDULO MEDIO [MPa]	DEFLEXIÓN MEDIA [μm]
Suelo estabilizado	388	52,0	733	284
Suelo seleccionado	937	52,2	269	692
Zahorra artificial	1 315	52,4	377	528

Tabla B.2. Resultados obtenidos por tipo de material (valores medios).

Con independencia de la interpretación del valor absoluto de los módulos y las deflexiones obtenidas, se puede comprobar la sensibilidad del equipo a los diferentes tipos de materiales ensayados. El equipo detecta perfectamente la diferencia de capacidad portante del suelo seleccionado respecto a la del suelo estabilizado.

Un segundo nivel de análisis es el estudio de la correlación entre los ensayos de carga con placa y los ensayos con deflectómetro de impacto.

A este respecto se han elaborado las tablas y los gráficos de correlación $E_{v2} - E_o$ entre los diversos parámetros obtenidos en cada tipo de ensayo, trabajando siempre con valores medios. Dichas tablas pueden consultarse en el anexo del presente documento.

B.7. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES TIPOS DE DEFLECTÓMETRO

Los ensayos de deflexión llevados a cabo por *AEPO S.A Ingenieros Consultores* en las diferentes carreteras de la Comunitat Valenciana que forman parte del presente anejo fueron realizados con un deflectómetro de impacto modelo *KUAB-FWD 50*, cuyas características ya han sido detalladas en el apartado B.2.

Para comprobar que los resultados obtenidos son igualmente válidos, independientemente del modelo o marca de deflectómetro utilizado, siempre que el aparato esté calibrado correctamente, se realizaron varios tramos de comparación en los cuáles se midieron simultáneamente las deflexiones con el mencionado *KUAB* así como con otro deflectómetro de diferente marca y modelo.

Los gráficos que se adjuntan en el anexo muestran que no existen diferencias significativas entre las deflexiones registradas por los diferentes tipos de equipos, así como tampoco en los módulos obtenidos.

Por tanto, resulta válido para la caracterización de capas granulares todo tipo de deflectómetro que esté bien calibrado con independencia de su marca o modelo.

B.8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El amplio trabajo realizado de validación del deflectómetro como instrumento apto para la caracterización tanto de capas granulares como de explanadas es uno de los objetivos que se han incluido en la redacción de la Norma de Secciones de Firme de la Comunitat Valenciana.

Establecida la correlación entre el deflectómetro de impacto y la placa de carga, se fijaron, a la vista de los resultados obtenidos, los valores de referencia exigidos, bien de módulos de elasticidad, bien de deflexión tanto para capas granulares como para explanadas en las obras de carreteras.

Se estudió una correlación por cada tipo de material ensayado, obteniéndose los resultados que se pueden observar en los gráficos adjuntos, para finalmente hallar una correlación global que recoja todos los tipos de suelos analizados. A partir de dicha correlación, que presenta un ajuste de 92 %, y conociendo los valores la deflexión d_0 registrada por el deflectómetro, se calculó E_0 (módulo elástico de la superficie del terreno) en base a los cuales se definen las siguientes categorías de explanada:

- **E1:** $E_{0,ck} \geq 100$ MPa; $\nu = 0,40$
- **E2:** $E_{0,ck} \geq 140$ MPa; $\nu = 0,40$
- **E3:** $E_{0,ck} \geq 255$ MPa; $\nu = 0,35$
- **E4:** $E_{0,ck} \geq 440$ MPa; $\nu = 0,30$

Para poder establecer la categoría de la explanada por medio del deflectómetro de impacto, será preceptiva la ejecución de un impacto de asentamiento, y posterior a éste se deberán efectuar al menos dos impactos de 49 kN en cada punto de ensayo, tomando como valor representativo la media de las deflexiones obtenidas en cada uno de ellos, siempre que sus valores no difieran en más de un 5%; en caso contrario, no podrá considerarse el ensayo como válido.

En caso de no disponerse de deflectómetro de impacto, se podrán emplear los módulos de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga de ensayos de carga con placa definidos en la norma NLT-357, con los siguientes valores de referencia:

- **E1:** $E_{v2} \geq 50 \text{ MPa}$
- **E2:** $E_{v2} \geq 100 \text{ MPa}$
- **E3:** $E_{v2} \geq 225 \text{ MP}$
- **E4:** $E_{v2} \geq 425 \text{ MPa}$

Dado que el número de deflectómetros de impacto es ya importante en España y que los programas de cálculo inverso son asequibles y de fácil manejo, este sistema de control debe tener un gran futuro en nuestro país ya que son múltiples las ventajas que presenta:

- Es un instrumento técnicamente útil y fiable para el control de la capacidad portante de la explanada y de las capas granulares.
- Es muy rápido, por lo que permite ensayar un número de puntos relativamente alto, favoreciendo una mejor caracterización de la capa a ensayar, con lo que se disminuye el riesgo de defectos ocultos.
- Se puede obtener directamente el parámetro buscado, en este caso el módulo de elasticidad de las capas.
- Es mucho más económico que la placa de carga.
- Las cargas aplicadas son dinámicas, como las producidas por el tráfico, y de una magnitud similar a éstas.

B.9 DOCUMENTOS ANEXOS

B.9.1 Resultados en suelo seleccionado

E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
281,0	450,0	912,3	461,8	1,60
225,0	375,0	702,0	349,5	1,67
166,6	346,2	717,0	338,8	2,08
236,8	346,1	757,9	315,0	1,46
237,0	346,0	723,4	368,8	1,46
225,0	346,0	694,8	306,8	1,54
167,0	346,0	611,7	359,5	2,07
180,0	321,4	625,0	293,0	1,79
150,0	321,4	496,5	266,4	2,14
145,2	321,4	557,0	241,8	2,21
180,0	321,0	751,3	353,8	1,78

E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
155,0	321,0	502,0	351,8	2,07
150,0	321,0	580,7	295,7	2,14
195,6	300,0	822,3	243,3	1,53
155,0	300,0	563,7	305,3	1,94
136,0	300,0	500,0	335,3	2,21
136,3	281,3	511,0	311,3	2,06
204,5	281,3	754,4	305,2	1,38
204,5	281,2	685,8	291,0	1,38
166,6	281,2	715,5	272,5	1,69
225,0	281,0	781,0	356,1	1,25
214,0	265,0	1052,3	280,2	1,24
180,0	265,0	761,2	307,3	1,47
187,5	264,7	817,5	278,5	1,41
166,6	264,7	632,8	253,7	1,59
160,7	264,7	803,0	338,0	1,65
150,0	264,7	636,6	239,5	1,76
145,1	264,7	671,3	256,3	1,82
132,4	264,7	576,8	298,8	2,00
180,0	250,0	812,7	265,3	1,39
173,1	250,0	663,3	289,2	1,44
155,2	250,0	939,5	234,7	1,61
155,0	250,0	656,3	226,5	1,61
141,0	250,0	809,5	346,8	1,77
140,6	250,0	512,5	237,0	1,78
132,0	250,0	497,0	233,3	1,89
132,0	250,0	567,8	280,3	1,89
180,0	237,0	893,8	272,9	1,32
173,0	237,0	951,5	291,4	1,37
187,5	236,8	1088,8	205,7	1,26
180,0	236,8	957,0	303,3	1,32
145,1	236,8	1368,0	212,8	1,63
132,3	236,8	576,2	272,0	1,79

E_{V1} [MPa]	E_{V2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
140,6	225,0	622,0	244,0	1,60
136,0	225,0	776,8	281,1	1,65
128,6	225,0	619,0	244,1	1,75
128,6	225,0	872,6	279,0	1,75
125,0	225,0	630,3	306,5	1,80
104,7	225,0	602,2	233,3	2,15
145,2	214,3	657,0	120,0	1,48
136,4	214,3	636,5	221,5	1,57
136,3	214,3	775,1	210,5	1,57
115,0	214,0	657,5	270,3	1,86
122,0	205,0	697,8	275,3	1,68
107,0	205,0	575,0	190,7	1,92
100,0	205,0	707,5	184,0	2,05
112,5	204,6	697,8	191,0	1,82
132,3	204,5	770,7	221,4	1,55
132,3	204,5	760,0	217,4	1,55
121,6	204,5	627,4	265,3	1,68
107,1	204,5	675,0	218,5	1,91
97,8	204,5	634,6	267,8	2,09
115,0	196,0	817,1	186,0	1,70
112,5	195,7	595,3	205,1	1,74
102,3	195,7	512,2	258,8	1,91
132,3	187,5	1011,0	238,8	1,42
107,1	187,5	640,2	193,0	1,75
102,0	187,5	719,3	260,5	1,84
97,8	187,5	609,8	247,0	1,92
136,0	180,0	842,4	233,4	1,32
125,0	180,0	800,5	235,6	1,44
121,6	180,0	724,3	250,8	1,48
112,5	180,0	931,5	254,9	1,60
112,5	173,1	928,8	179,5	1,54
85,0	173,0	510,5	176,5	2,04

E_{V1} [MPa]	E_{V2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
100,0	167,0	642,1	218,3	1,67
98,0	167,0	836,5	171,3	1,70
132,4	166,6	803,5	258,8	1,26
128,6	166,6	971,3	207,1	1,30
121,6	166,6	917,0	193,8	1,37
115,3	166,6	667,8	226,1	1,44
100,0	166,6	569,5	184,5	1,67
86,0	161,0	614,3	208,8	1,87
112,5	160,7	1014,5	174,3	1,43
112,5	160,7	932,8	186,5	1,43
104,7	155,2	732,9	159,3	1,48
104,7	155,2	938,8	179,5	1,48
98,0	150,0	581,0	168,8	1,53
112,5	140,6	1028,0	217,3	1,25
76,0	136,0	711,4	164,3	1,79
56,3	107,1	585,8	153,0	1,90
47,4	93,7	540,0	97,3	1,98

B.9.2 Resultados en zorra artificial

E_{V1} [MPa]	E_{V2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
450,0	750,0	818,5	726,0	1,67
375,0	750,0	693,8	644,7	2,00
321,4	642,8	563,3	637,0	2,00
281,2	562,5	416,5	677,0	2,00
300,0	500,0	485,3	460,3	1,67
265,0	500,0	437,0	490,8	1,89
236,8	500,0	522,4	445,3	2,11
236,8	450,0	553,9	398,0	1,90
236,8	450,0	584,4	406,4	1,90
204,5	450,0	481,3	410,3	2,20
225,0	409,1	608,6	351,8	1,82

E_{V1} [MPa]	E_{V2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
204,5	409,1	706,1	342,5	2,00
195,6	409,1	457,2	442,8	2,09
225,0	409,0	485,9	355,6	1,82
250,0	375,0	633,0	368,8	1,50
214,3	375,0	527,8	337,0	1,75
187,5	375,0	501,4	346,5	2,00
187,5	375,0	406,8	410,1	2,00
180,0	375,0	491,7	369,2	2,08
180,0	375,0	499,5	371,8	2,08
180,0	375,0	544,3	382,3	2,08
173,1	375,0	654,5	369,3	2,17
264,7	346,1	555,7	378,7	1,31
250,0	346,1	484,8	311,3	1,38
214,3	346,1	472,0	387,1	1,62
195,7	346,1	490,3	369,8	1,77
195,6	346,1	403,6	342,8	1,77
173,0	346,1	463,6	347,5	2,00
166,6	346,1	524,3	429,0	2,08
160,7	346,1	527,0	335,4	2,15
237,0	346,0	385,5	347,0	1,46
214,0	346,0	396,8	359,7	1,62
214,0	346,0	437,5	384,0	1,62
187,5	346,0	518,0	417,0	1,85
214,2	321,4	483,8	290,6	1,50
204,5	321,4	546,0	348,2	1,57
204,5	321,4	473,3	375,7	1,57
195,6	321,4	800,0	333,5	1,64
195,6	321,4	551,3	342,3	1,64
187,5	321,4	593,8	333,9	1,71
187,5	321,4	565,8	366,4	1,71
180,0	321,4	564,8	416,3	1,79
173,1	321,4	1122,5	362,0	1,86

E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
150,0	321,4	512,8	364,2	2,14
196,0	321,0	464,1	292,5	1,64
180,0	321,0	513,5	347,2	1,78
150,0	321,0	425,2	365,5	2,14
205,0	300,0	853,5	357,8	1,46
195,6	300,0	494,1	386,0	1,53
173,1	300,0	504,1	298,4	1,73
173,1	300,0	480,8	340,0	1,73
167,0	300,0	365,5	306,0	1,80
166,7	300,0	463,0	347,8	1,80
160,7	300,0	478,5	312,3	1,87
155,2	300,0	634,8	309,1	1,93
155,2	300,0	514,5	374,8	1,93
150,0	300,0	624,4	294,0	2,00
150,0	300,0	483,5	353,8	2,00
145,1	300,0	506,6	344,5	2,07
204,5	281,2	459,3	367,2	1,38
166,6	281,2	431,5	320,0	1,62
173,0	281,2	426,6	258,4	1,63
160,7	281,2	462,6	363,1	1,75
155,2	281,2	516,0	317,8	1,81
187,5	281,0	560,6	312,5	1,50
167,0	265,0	638,8	291,3	1,59
136,3	264,7	583,0	298,5	1,94
155,1	250,0	464,6	326,6	1,61
150,0	250,0	434,3	304,3	1,67
145,2	250,0	465,6	242,5	1,72
121,6	250,0	454,8	280,8	2,06
121,6	236,8	589,1	217,3	1,95
125,0	225,0	745,8	263,3	1,80
112,5	225,0	506,5	308,8	2,00
136,3	214,2	568,3	282,8	1,57

E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
125,0	214,2	525,9	271,7	1,71
129,0	205,0	205,0	200,3	1,59
112,5	204,5	231,5	233,8	1,82
100,0	195,7	265,5	216,3	1,96
121,6	187,5	262,7	249,3	1,54
86,5	173,0	249,0	205,0	2,00
77,6	155,2	379,7	153,0	2,00

B.9.3 Resultados en suelo estabilizado

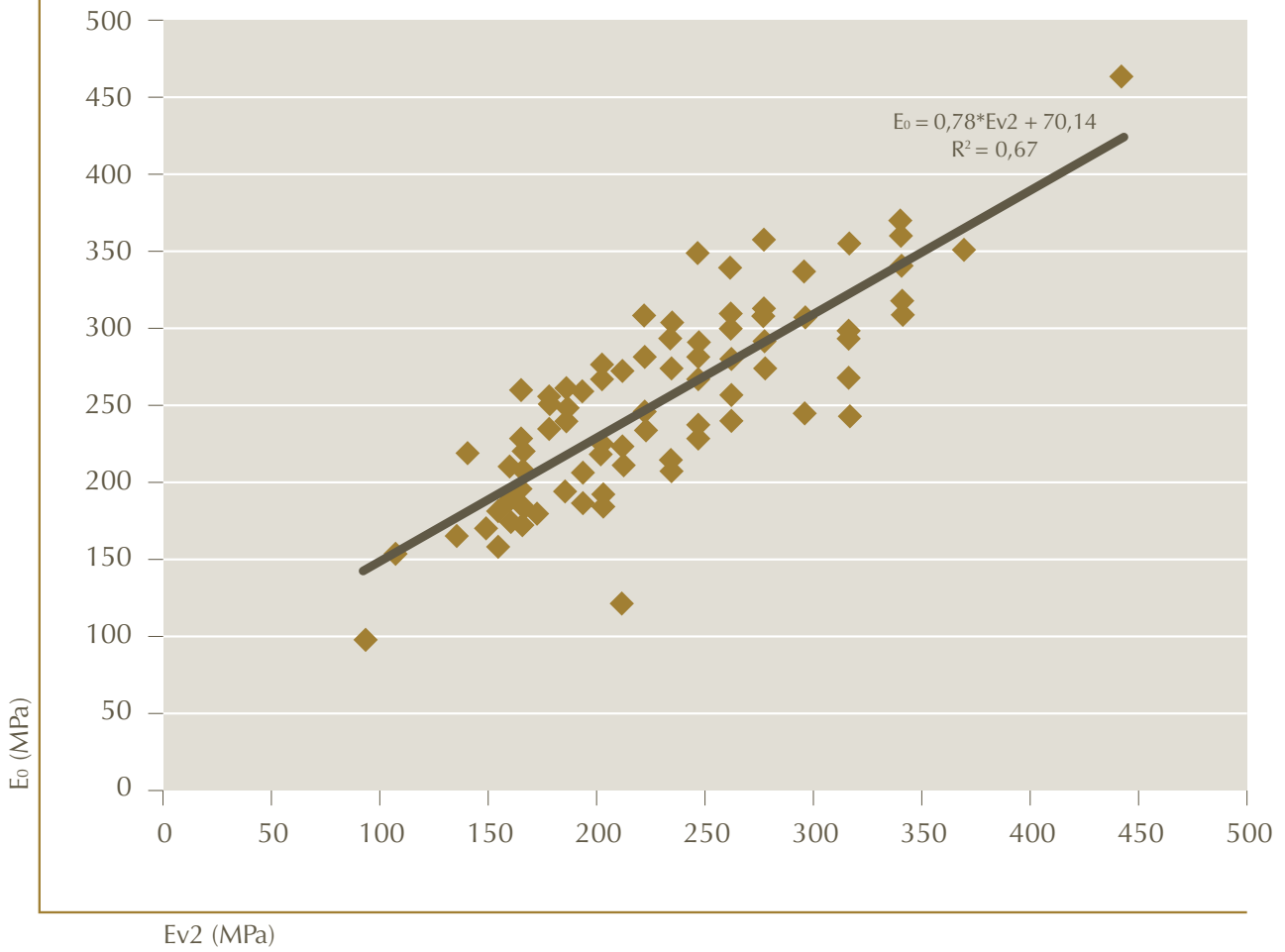
E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
1125,0	1500,0	113,0	1512,3	1,33
750,0	1500,0	141,8	1214,3	2,00
900,0	1125,0	186,0	969,5	1,25
900,0	1125,0	173,3	997,8	1,25
750,0	1125,0	184,5	929,3	1,50
643,0	1125,0	186,3	928,1	1,75
642,9	900,0	224,9	787,2	1,40
563,0	900,0	216,5	775,5	1,60
450,0	900,0	238,0	884,8	2,00
409,1	900,0	161,0	1062,8	2,20
562,5	750,0	198,8	852,3	1,33
562,5	750,0	207,1	821,5	1,33
500,0	750,0	204,3	831,5	1,50
500,0	750,0	231,7	773,1	1,50
450,0	750,0	198,8	922,8	1,67
450,0	750,0	183,0	942,0	1,67
450,0	750,0	233,0	727,3	1,67
409,1	750,0	213,1	832,9	1,83
346,1	750,0	270,0	626,8	2,17
346,1	750,0	208,5	822,5	2,17
500,0	643,0	332,0	547,4	1,29

E_{v1} [MPa]	E_{v2} [MPa]	DEFLEXIÓN [μm]	E_0 [MPa]	k
375,0	643,0	194,3	891,6	1,71
346,0	643,0	271,2	636,9	1,86
500,0	642,9	251,6	681,0	1,29
500,0	642,9	217,7	807,1	1,29
450,0	642,9	236,5	743,0	1,43
375,0	642,9	312,3	546,0	1,71
500,0	642,8	218,8	812,6	1,29
300,0	642,8	288,8	677,3	2,14
300,0	642,8	271,8	665,8	2,14
450,0	562,5	282,8	599,5	1,25
364,1	562,5	294,5	577,5	1,54
346,0	562,5	389,0	442,3	1,63
300,0	562,5	246,3	690,3	1,88
264,7	562,5	253,8	689,3	2,13
375,0	500,0	285,5	606,3	1,33
375,0	500,0	294,8	589,0	1,33
300,0	500,0	252,8	671,5	1,67
250,0	500,0	400,5	438,3	2,00
346,1	450,0	321,5	547,0	1,30
346,0	450,0	330,7	561,1	1,30
300,0	450,0	404,3	453,8	1,50
281,2	450,0	412,3	411,8	1,60
236,9	375,0	576,0	306,3	1,58

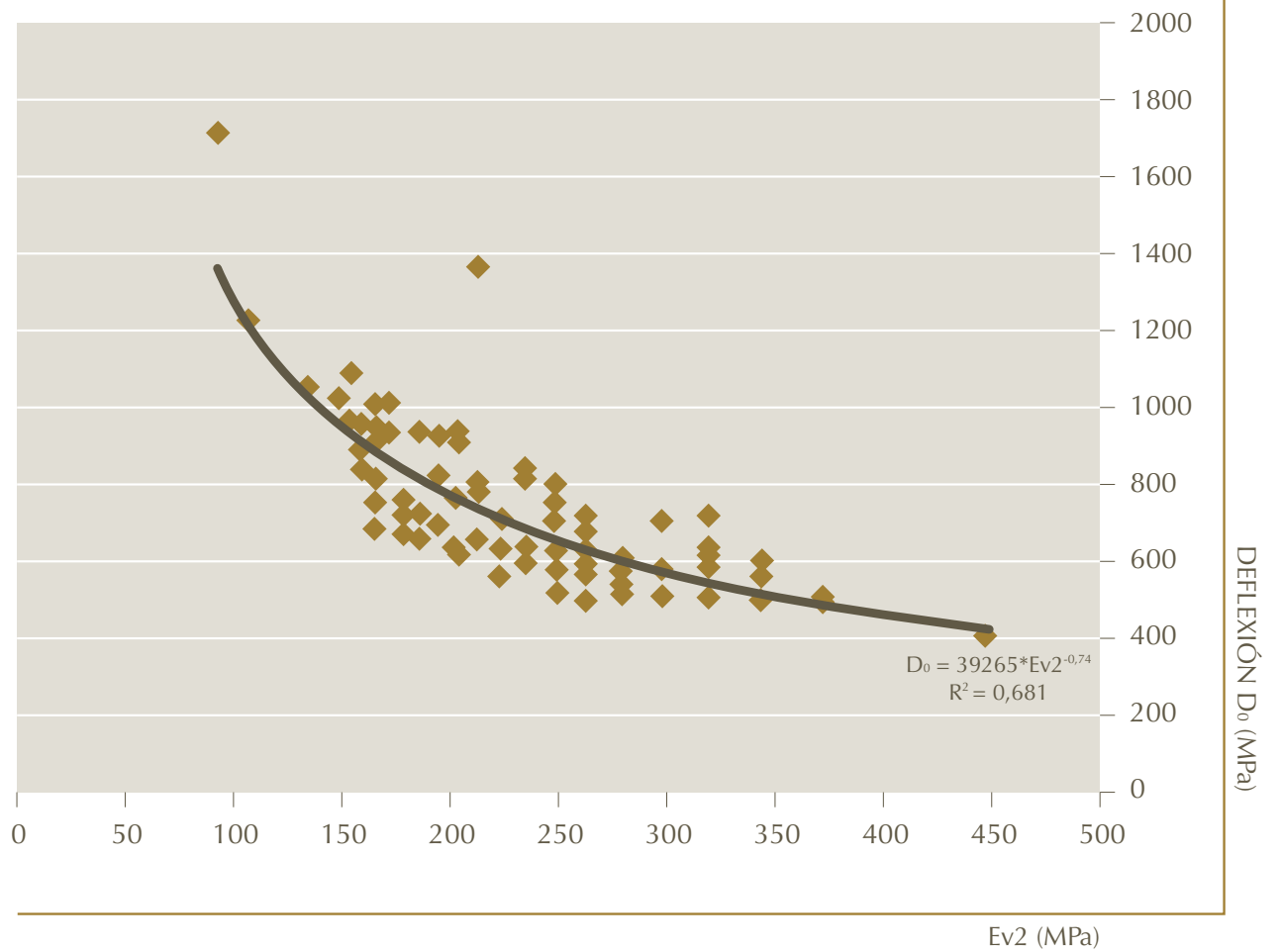
B.9.4 Gráficos

Los gráficos que se adjuntan a continuación recogen la comparativa entre ambos ensayos para cada tipo de material, la ecuación de correlación obtenida y el valor del estadístico R2, que nos indica el grado de ajuste del modelo.

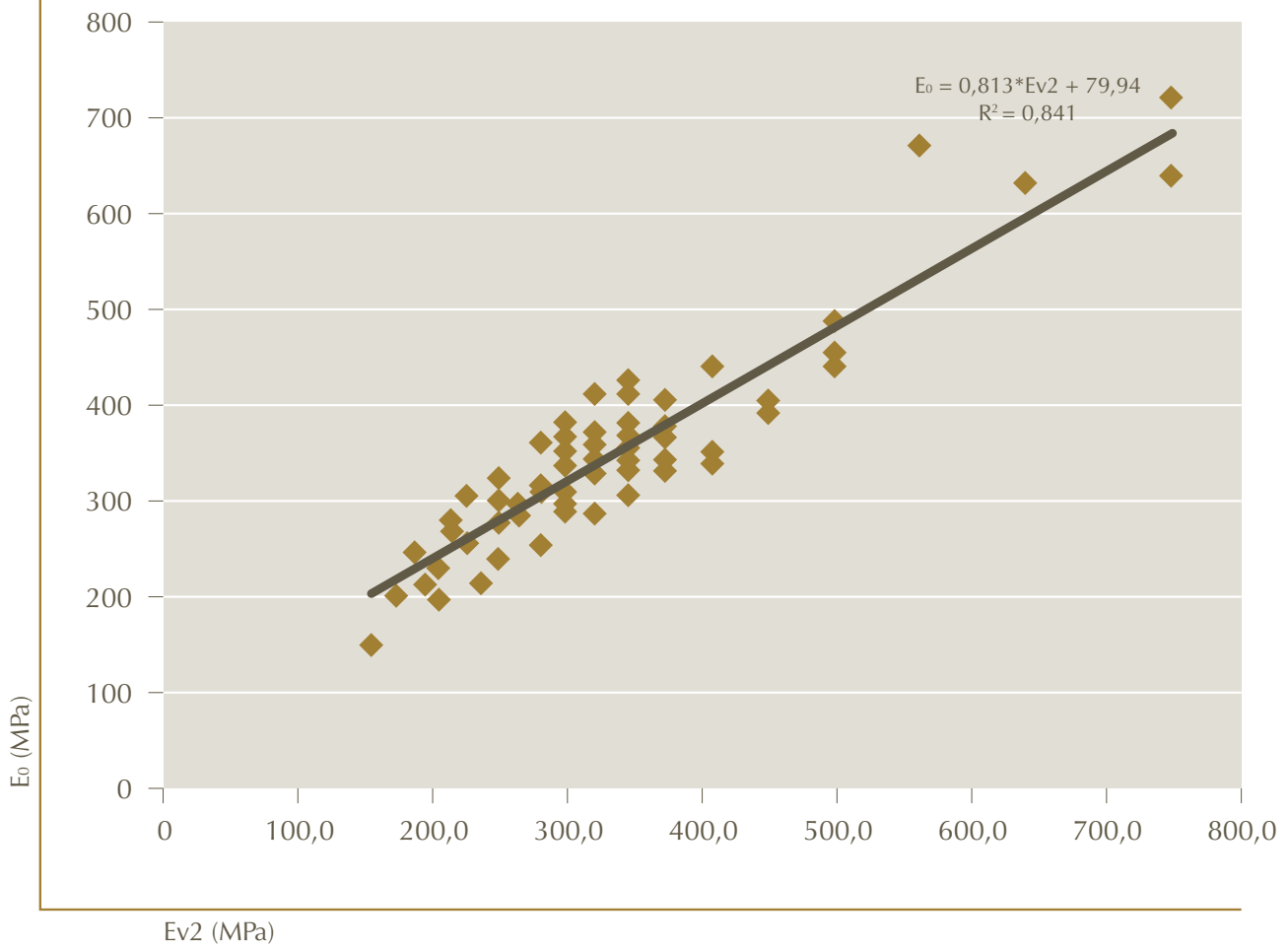
Ev2 PLACA-E₀ SUELO SELECCIONADO



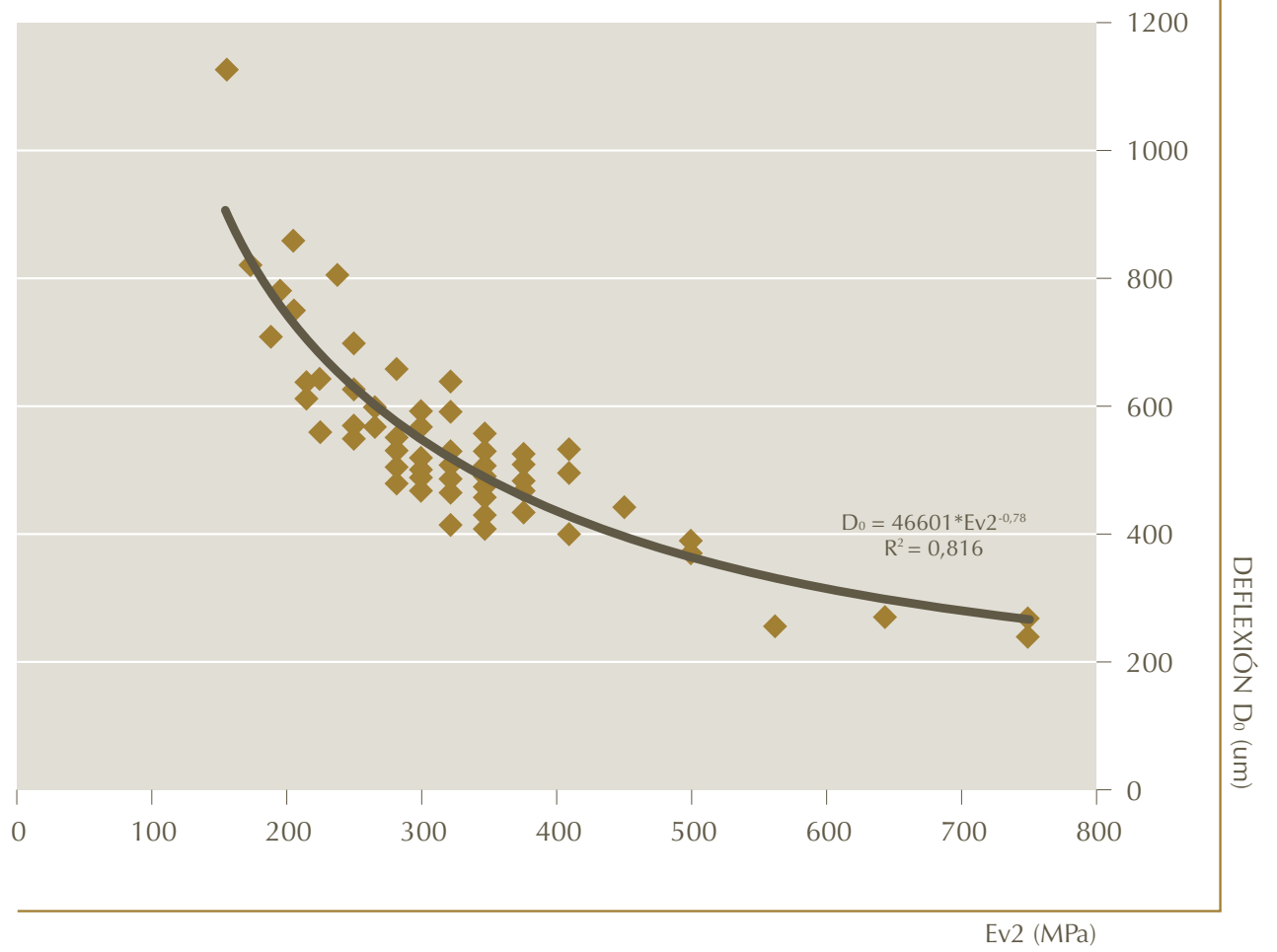
◆ Ev2 PLACA-E₀

Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀ SUELO SELECCIONADO

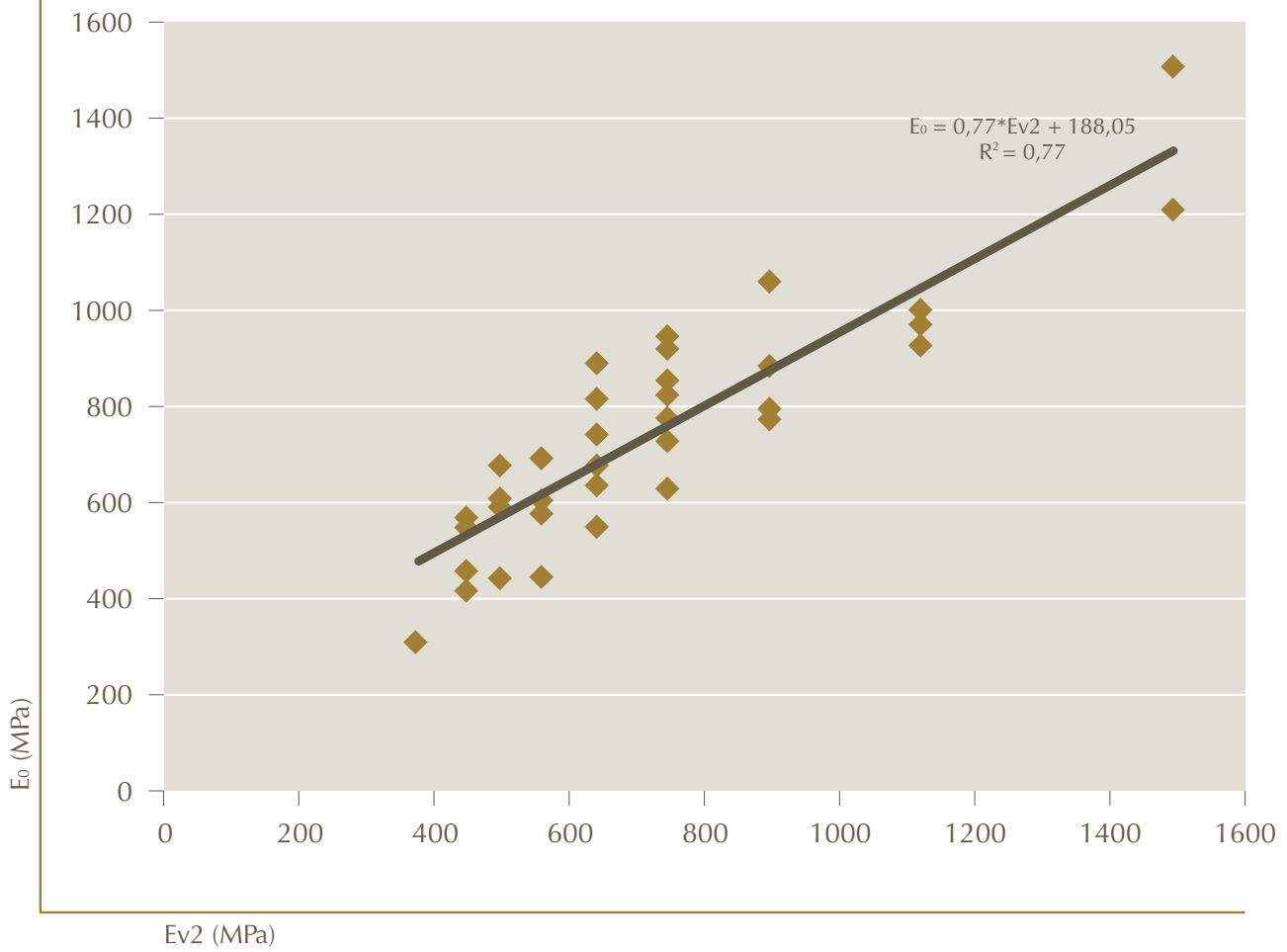
◆ Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀

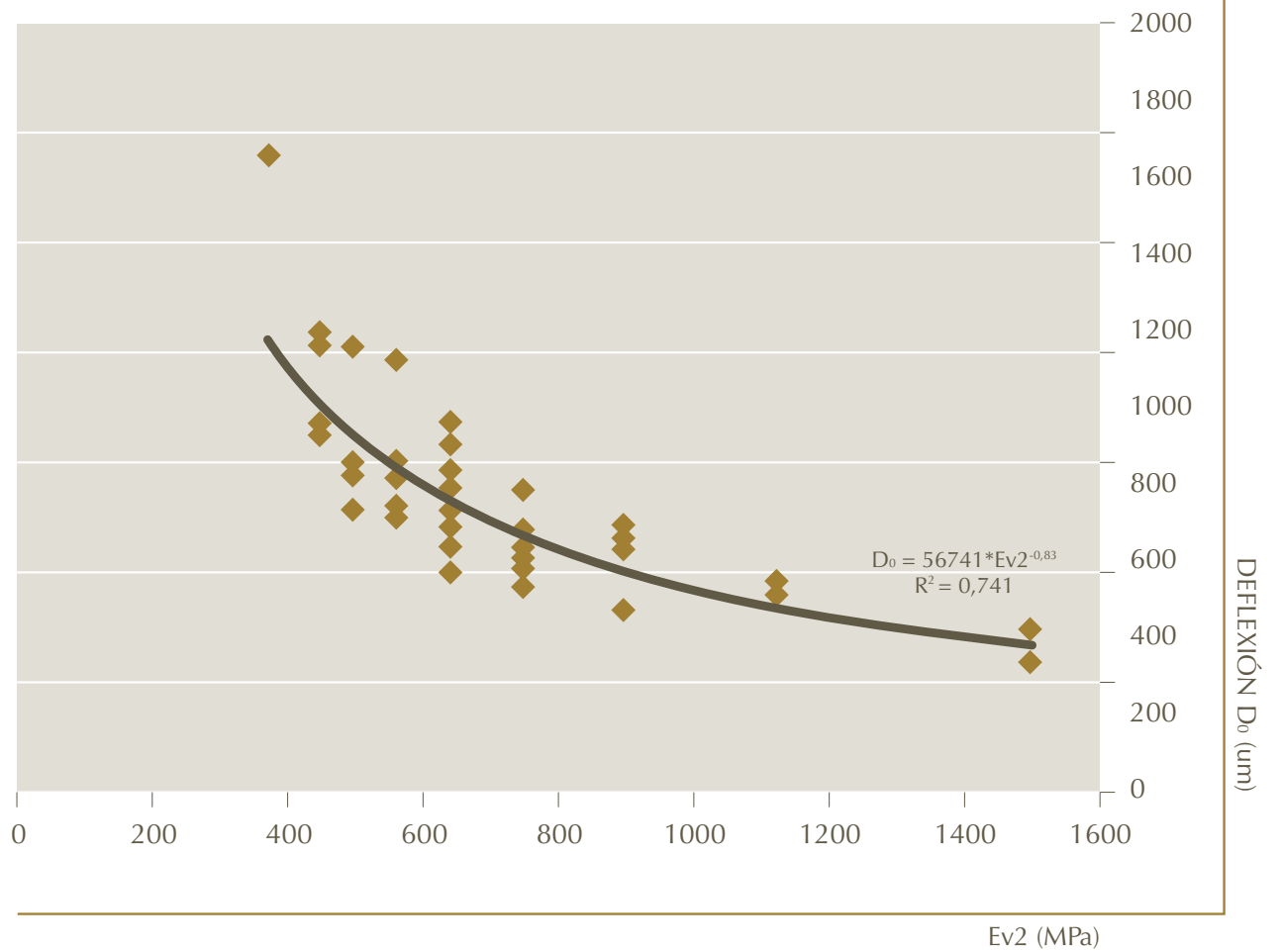
Ev2 PLACA-E₀ ZAHORRA ARTIFICIAL◆ Ev2 PLACA-E₀

Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀ ZAHORRA ARTIFICIAL

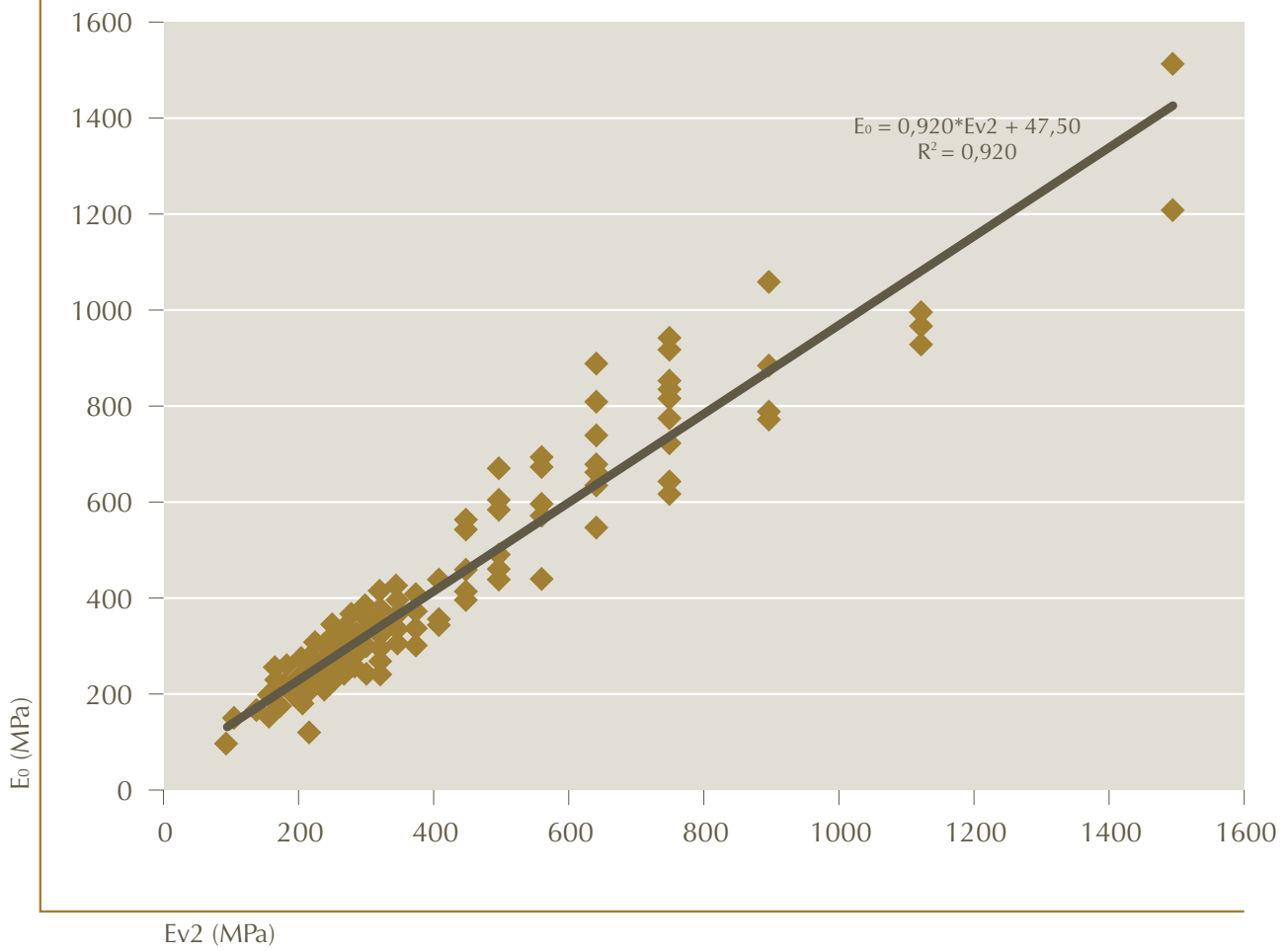


◆ Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀

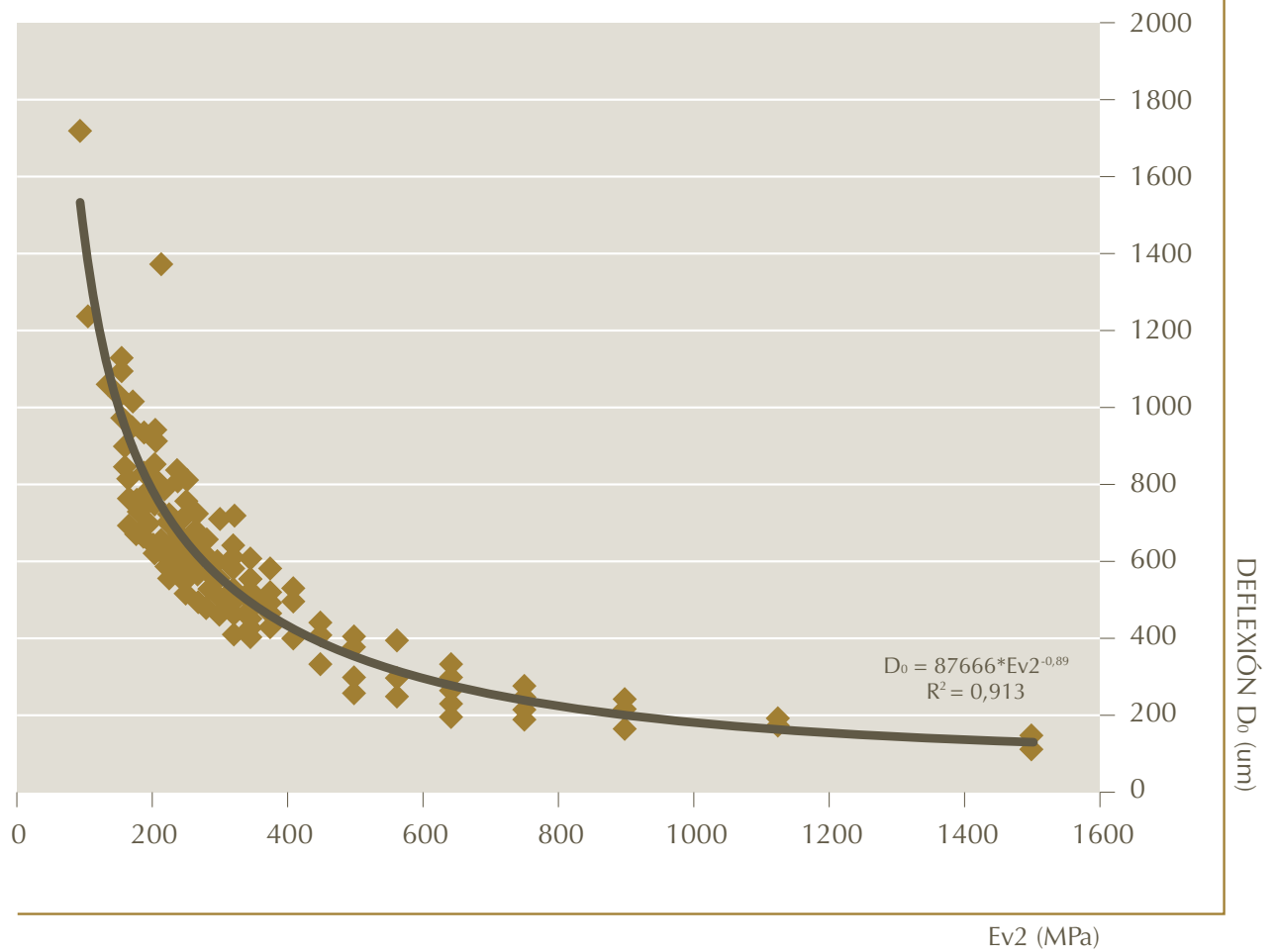
Ev2 PLACA-E₀ SUELO ESTABILIZADO◆ Ev2 PLACA-E₀

Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀ SUELO ESTABILIZADO

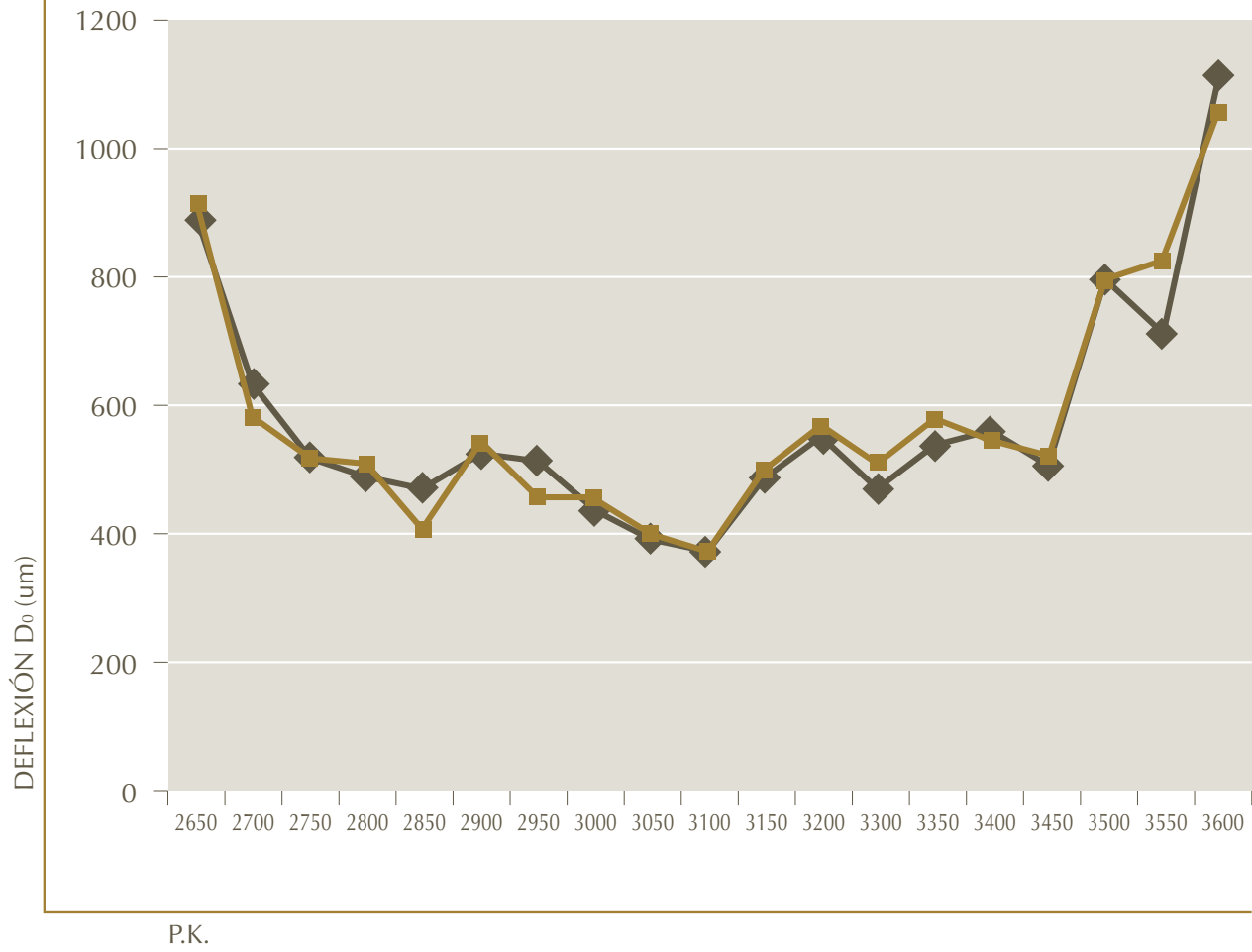
◆ Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀

Ev2 PLACA-E₀ DEFLECTÓMETRO GLOBAL

◆ Ev2 PLACA-E₀

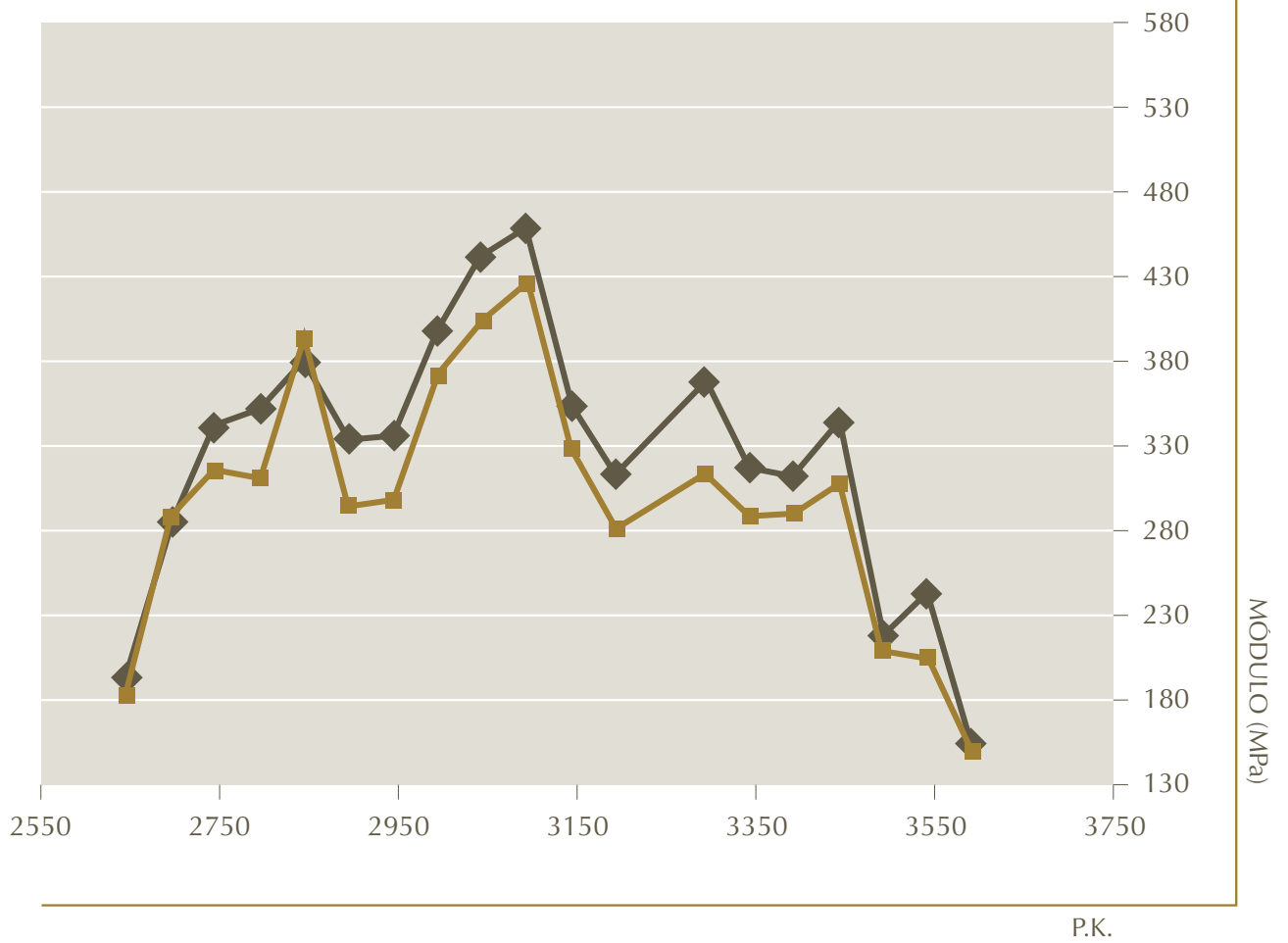
Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀ GLOBAL◆ Ev2 PLACA-DEFLEXIÓN D₀

CUENCO DEFLEXIONES D_0 KUAB-DYNATEST



-  KUAB
-  DYNATEST

COMPARACIÓN MÓDULOS KUAB-DYNATEST



◆ KUAB
■ DYNATEST

ISBN 978-84-482-5198-7



9 788448 251987