

# Los pavimentos en las carreteras españolas del siglo XX

## Pavements of Spanish Roads at the 20<sup>th</sup> Century

**Miguel Ángel del Val Melús.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Catedrático de Caminos y Aeropuertos. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (UPM).  
miguel.delval@upm.es

**Resumen:** Este artículo describe brevemente cómo han ido evolucionando los criterios de diseño de los pavimentos de las carreteras españolas a lo largo del siglo XX. Se destacan algunos hitos fundamentales. Se pretende acercar al lector no especializado a un elemento de las infraestructuras de transporte de gran importancia técnica y económica, pero que sólo es valorado cuando su estado es deficiente. Se recuerda también a algunos de los ingenieros que hicieron posible la citada evolución.

**Palabras clave:** Firme; Pavimento; Historia, siglo XX; España

**Abstract:** This paper describes summarily the evolution of the Spanish road pavements and their design criteria at the 20<sup>th</sup> century. Some milestones are underlined. The goal is to approach non specialist readers to an important infrastructure element, both technically and economically, but only valued when his condition is poor. Some engineers having contributed to pavement evolution are also remembered.

**Keywords:** Pavement; History; 20th century; Spain

### 1. Introducción

A pesar de su título, este artículo se refiere en realidad a lo que en España denominamos habitualmente los firmes de las carreteras. En efecto, los ingenieros españoles, aunque no así los hispanoamericanos, distinguimos entre la estructura, que denominamos firme, formada por varias capas que se colocan sobre la obra de tierra, y la parte superior de dicha estructura, que denominamos pavimento. Sin embargo, ya Francisco Javier Barra, que fuera Director de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos y Canales en su segunda época (la correspondiente al Trienio liberal 1821-1823), deja claro en su tratado de 1826 que no es una distinción sustancial, pues en el propio título se refiere a la "construcción del pavimento o firme de los caminos", y en el primer párrafo de su texto escribe lo siguiente: "resta ahora decir cómo se debe construir el pavimento, o el firme, como decimos en España".

La importancia técnica y económica de los pavimentos es indudable en el contexto del desarrollo

viario, pero con frecuencia sólo son percibidos por los que circulan por las carreteras cuando su estado es deficiente; en España, ciertamente, esto ha sido lo más habitual al menos durante tres cuartas partes del siglo pasado. Por tanto, los españoles solemos tener una percepción de los pavimentos sobre todo en términos negativos. Ante esta certeza, lo que se presenta en este artículo está en buena medida condicionado por un cierto pesimismo, dado que no se vislumbra que los españoles lleguen a considerar los pavimentos de otra manera que no sea la indicada.

Es preciso aclarar que no se pretende presentar una historia de los pavimentos españoles en sentido estricto: porque sería un empeño difícil, quizás fuera del alcance de quien esto escribe, y probablemente inútil. Simplemente se dan algunas pinceladas, más finas cuando se refieren al último tercio del siglo XX, y mucho más gruesas al tratar las etapas anteriores. Sólo se quiere, en definitiva, destacar algunos hitos, sobre todo los que pueden explicar la situación en la que nos encontramos en los comienzos del siglo XXI. Aunque visto con la perspectiva que dan los años el

proceso seguido en el siglo XX en los pavimentos españoles es un proceso indudablemente de progreso, no se deben olvidar los fracasos, algunos de ellos llamativos; de esos fracasos hemos aprendido los ingenieros españoles, mientras que de los éxitos no hemos obtenido probablemente tantas enseñanzas.

Los contenidos de este artículo son deudores, en primer lugar, de una bibliografía extensa: ésta va desde los documentos estrictamente técnicos, a menudo con informaciones mal contextualizadas y poco utilizables por tanto en un artículo pretendidamente histórico, hasta otros, que han proliferado en los últimos veinte años, en los que, ahondándose en la evolución histórica de los caminos, rara vez se recogen referencias precisas, rigurosas y originales sobre los pavimentos. De todos los autores de estos últimos, la principal excepción es Teresa Sánchez Lázaro, quizás la historiadora que ha hecho un mayor esfuerzo por analizar con gran detalle la evolución de los pavimentos de las carreteras españolas en el siglo XX. Por otro lado, la deuda es aún mayor con los maestros que han transmitido al autor de este artículo la memoria oral de los pavimentos en la segunda mitad del siglo XX.

## 2. Los antecedentes

Remontándonos algo en el tiempo, hay que empezar recordando que desde los albores del siglo XIX las carreteras españolas se dotan progresivamente de un firme de piedra machacada, del que hasta entonces carecen, siguiendo los principios de diseño y de construcción dictados por el ingeniero escocés John McAdam. Las razones de esa evolución son claras, aunque todavía siglo y medio después, el Ejército español se ve en la obligación de recordárselo a sus oficiales del Arma de Ingenieros (1953):

*"Las pistas sin afirmar son deficientes; en las temporadas de invierno, las lluvias, nieves y temporales las dejan poco menos que intransitables, y sólo a costa de grandes esfuerzos y desgastes del material se consigue conservar la circulación. Los carruajes de tracción animal las deterioran en poco tiempo, los tiros deben aumentarse, los atascos y retrasos son frecuentes y el material transportado sufre pérdidas y desperfectos. Las pérdidas de tiempo prolongan la duración de los*

*viajes y disminuyen el número de kilómetros que un mismo vehículo puede hacer en un día; además, esto es muy importante, los vehículos sólo pueden aceptar una carga menor y el rendimiento de los transportes baja rápidamente".*

Esos primeros firmes a los que hemos aludido son los que se denominan de macadam o macadán, en honor de quien los idea, y en España marcan no sólo el siglo XIX, sino también buena parte del XX, pues en las carreteras del Estado la última superficie de macadam desaparece en 1978, perviviendo incluso algunos años más en las redes dependientes de las diputaciones provinciales. El empleo de la piedra machacada supone en su momento un avance extraordinario, que hoy difícilmente podemos valorar en toda su trascendencia, pero con el tiempo se manifiestan también sus limitaciones: primero, el desgaste que producen las llantas metálicas de las diligencias y de los carros, desgaste que se traduce en baches y en polvo; luego, ya con neumáticos y vehículos capaces de desarrollar velocidades apreciables, más polvo y más baches por arrancamiento, que hacen penosos casi todos los trayectos en cualquier época del año.

En definitiva, la historia de los pavimentos en el siglo XX en España, como en otros países, es en buena medida la historia de los sucesivos avances en pos de la sustitución paulatina del macadam por otras superficies más cómodas y más seguras. Aunque en las carreteras que se mejoran se produce en ocasiones una eliminación en sentido estricto del macadam, las más de las veces sólo se cubre con otras capas; de esta manera la piedra partida va quedando progresivamente en el olvido, hasta que ya prácticamente en el siglo XXI la aplicación de las técnicas de reciclado *in situ* hace que a menudo volvamos a sacar a la luz esas capas ocultas para darles una nueva vida, eso sí, profundamente transformadas.

Más adelante volveremos a los reciclados, tanto los del propio firme como los de materiales diversos de desecho que se incorporan en su construcción, como técnicas que surgen con fuerza en la última década del siglo XX. Sin embargo, es de justicia dejar constancia que ya durante el reinado de Fernando VI Tomás Manuel Fernández de Mesa refiere cómo reciclar diversos residuos para la construcción de los firmes de los caminos:

*"Esto me recuerda otro modo de hacer un terreno fuerte, que para las eras dice Fray Miguel Agustín en su Agricultura conviene usar, y no es despreciable para los caminos, es a saber que la tierra desmenuzada, y hecha polvo, se amase con alpechín de aceite, y después en estando en disposición apisonarla, o allanarla con cilindro, volviéndola últimamente a rociar con el alpechín; y otros, dice, hacen lo mismo con sangre de buey y aceite. No menos podemos contar por otra materia industrial, la de las ruinas de los edificios, cuyos fragmentos todavía conservan el fuego de la cal, y del aceite elemental o natural betún de los otros cuerpos de que se compone, con que fácilmente se sólida. Otro material artefacto es el de los ladrillos, o tejas nuevas quebradas, que mucho más contienen el ardor que recibieron en su cocimiento".*

Es decir, ya en 1755 el tratadista expresa su preocupación por estabilizar materiales que aparecen en la Naturaleza y que no tienen una características idóneas para la construcción de los caminos, sobre todo en lo que se refiere a su resistencia al agua, el elemento que más daño causa a los firmes, sobre todo, paradójicamente, en un país esencialmente seco como el nuestro. Dos siglos después, en la segunda mitad del siglo XX, muchos de los nuevos desarrollos técnicos de los firmes girarán precisamente en torno a las técnicas de estabilización; más tarde aún, a finales de ese siglo, se aborda decididamente el aprovechamiento de desechos al que ya alude Fernández de Mesa.

Durante muchas décadas, hasta que las técnicas de estabilización se generalizan, el deterioro de los pavimentos está provocado, entre otras razones, por la utilización de material arcilloso en el recebo de las capas de piedra partida, práctica absolutamente extendida y sancionada por los tratadistas del siglo XIX. El ya aludido Francisco Javier Barra (*op. cit.*) escribe: *"Después de esto se echará sobre la piedra machacada una capa ligera de arcilla menuda tendida con rastrillos de madera, de modo que después de la que hubiese embebido la piedra quede como una pulgada"*.

No es que se desconozca el efecto pernicioso del agua sobre los materiales arcillosos, sino que con la práctica indicada se prima el que las superficies no resulten excesivamente polvorizadas en época seca.

Prueba de que se tiene en cuenta cuáles pueden ser los efectos del agua o de otros factores ambientales, el mismo Barra indica (*op. cit.*): *"El granito, como llaman vulgarmente la piedra berroqueña, es muy buena para hacer el firme de los caminos, pero nunca tanto como las piedras calizas y silíceas; porque como la piedra berroqueña no es una piedra homogénea como estas, sino formada por la agregación de materias de diferente naturaleza, es más atacable que las otras por los rigores de la intemperie"*.

Junto al polvo y los baches, unos de los grandes problemas de los firmes de las carreteras durante el siglo XIX y hasta bien entrado el XX es el de la deformación producida por el paso de los vehículos más cargados. Aunque las teorías de Proctor sobre el particular no quedan completamente formuladas hasta 1932, era sabido de antiguo que uno de los aspectos clave para el buen comportamiento de las capas de los firmes es el de su compactación, y buena prueba de ello es lo que Francisco Javier Barra escribe en 1826 (*op. cit.*): *"Inmediatamente a esto se golpeará con mazas de hierro toda esta superficie, no con el objeto de romper las piedras, sino con el de encajarlas unas en otras"*.

### 3. El período 1901-1931

Ya en el siglo XX, la imperiosa necesidad de evitar las deformaciones debidas a una insuficiente compactación de las capas del firme conduce a dictar especificaciones precisas al respecto. Así, y a propuesta de la Dirección General de Obras Públicas, del entonces denominado Ministerio de Agricultura, Industria, Comercio y Obras Públicas, se aprueba por Real Decreto de 30 de marzo de 1903 el modelo del Pliego de Condiciones Facultativas que han de regir en las obras de carreteras y para cuyo artículo 33 se indica lo siguiente:

*"En este artículo se designará el medio de consolidación del firme, especificando, en caso de usarse el cilindro, si se ha de pasar sobre cada capa de piedra separadamente, o sólo sobre la superior después de extendidas todas. También se indicará cuántas veces deberá pasar el cilindro sobre el recebo y cada una de las capas, así como la carga constante o variable que ha de tener. [...]."*

Los equipos utilizados para estos fines, llamados entonces cilindros, surgen a finales del siglo XIX y con ellos empieza realmente la mecanización en la construcción de los firmes. Efectivamente, según José Ignacio Uriol Salcedo (1997): "a finales del siglo XIX aparecen los rodillos de vapor; en 1899 había, al parecer, sólo una docena de estas máquinas en toda España, de ellas cuatro del Ayuntamiento de Madrid, que pesaban 15 y 20 t y desarrollaban unos 6 km/h".

Como inmejorable resumen de lo que ocurre en esos años del cambio de siglo, así como en los del primer cuarto del siglo XX, nos permitimos reproducir los siguientes párrafos del mismo Uriol Salcedo (1997):

*"Un firme singular de finales del siglo XIX es el macadam con carriles de hierro que se ejecuta en el camino de Valencia al Grao. Por dicho camino pasaban diariamente de 3.000 a 4.000 carros, que hacían muy costosa la conservación del firme preexistente sólo en macadam. Para resolver este problema, se colocaron dos carriles en un sentido y otros dos en el otro, para la ida y vuelta de los carros de Valencia al puerto y desde el puerto a Valencia. La solución adoptada era, pues, realmente un tranvía para carros. [...]*

*En 1914 se estimaba que había unos 4 000 km con un tráfico tan intenso de carros que debía pensarse en adoptar, en esos tramos, la solución de carriles metálicos que se colocaron entre Valencia y el Grao [...].*

*La solución mejor para los tramos de carretera con gran tráfico de carros era el adoquinado, que resultaba muy cara, y el hormigón blindado, en el que sólo se labraba la cara vista y que se experimentó por primera vez en la provincia de Albacete, extendiéndose después con cierta profusión a las provincias con problemas análogos.[...]*

*En 1924 y 1925 se intensifican en España los ensayos de nuevos firmes: hormigones hidráulicos, alquitranados, asfaltados, tarmacadam, empedrados, etc. Al fin, la Administración toma dos decisiones trascendentes: encargar una inspección general extraordinaria sobre el estado de los firmes (1) y enviar al extranjero unas comisiones de*

*ingenieros para que conozcan de primera mano los resultados que se están obteniendo con los nuevos firmes, que empezarían a llamarse firmes especiales, en contraposición con el firme ordinario de macadam. [...]*

*El Circuito de Firmes Especiales, creado por real Decreto-Ley de 9 de febrero de 1926, fue la respuesta administrativa (2) a la inquietud existente sobre el desajuste entre las carreteras de esos años y los automóviles que por ellas circulaban. [...]*

*Tras las modificaciones introducidas posteriormente, las carreteras del Circuito contaban con unos 7.000 km [...].*

*Las obras se concretaron en nuevos firmes: macadam con riegos bituminosos, superficiales y profundos, casi el 75 %; adoquinados y hormigones blindados, más de un 10 %; y hormigones asfálticos, hormigones hidráulicos, etc., en menores proporciones [...]"*

El empleo de los ligantes hidrocarbonados en pavimentación se remonta en Europa a 1830, momento en el que se empieza a aprovechar el alquitrán por sus propiedades aglomerantes: se fijan mediante riego con alquitrán las partículas sueltas y se consiguen así superficies de las que desaparece el problema del polvo. A partir de ese momento la técnica se desarrolla en paralelo con la iluminación con gas ciudad, en cuya fabricación se obtiene el alquitrán como subproducto. Los primeros aglomerados o mezclas de áridos con alquitrán, realizados en el mismo lugar de aplicación, se emplean en algunas carreteras y vías urbanas del Reino Unido: diversas calles de Londres se pavimentan así hacia 1850.

En torno a 1870 se empiezan a elaborar en Estados Unidos mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales, si bien estos materiales ya han sido empleados experimentalmente en 1810 en algunas pavimentaciones en Burdeos y en Lyon. También hacia 1870, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comienzan a emplear los betunes de destilación, subproductos obtenidos en dicha industria. En la última década del siglo XIX el norteamericano C. Richardson sienta

(1) De unos 56 000 km de los que constaba la red, casi la mitad se encontraban en muy mal estado (Ignacio González Tascón, 2005).

(2) Siendo Ministro de Fomento D. Rafael Benjumea Burín, Conde de Guadalhorce.

las bases de la tecnología de las mezclas bituminosas para pavimentación.

En España el empleo de las mezclas asfálticas tiene también un precedente antiguo: la pavimentación con alquitrán de las zonas peatonales de la Puerta del Sol de Madrid, entre 1847 y 1854. Sin embargo, sólo se ejecutan de manera significativa a partir de 1926, año en el que se programó la pavimentación con mezclas bituminosas de 223 km de carreteras dentro del Circuito Nacional de Firmes Especiales; de todas formas, en esa época las mezclas siguen aún formando parte de firmes ciertamente especiales, pues los ordinarios son los de macadam, recubierto o no por un riego bituminoso con gravilla (3).

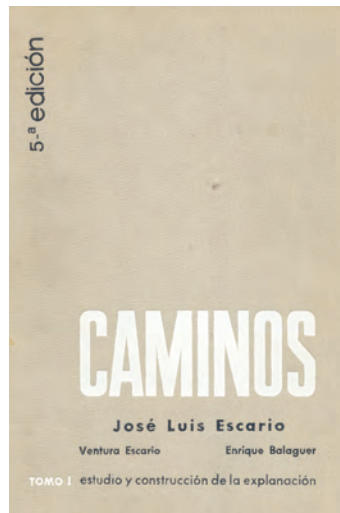


Fig. 1. El libro de texto de la Escuela Especial en las décadas de 1950 y 1960.

#### 4. El período 1931-1978

En los treinta años siguientes no hay apenas progresos reseñables; incluso, en lo que al estado de los firmes se refiere, hay un apreciable retroceso, como consecuencia tanto del desastre de la Guerra Civil como de los posteriores largos años de penuria. Como ejemplo de ello, Mercedes López y Jorge Bernabeu (2005) nos recuerdan que en la década de 1950, "un pavimento frecuente en terrenos llanos de la costa mediterránea, en zonas de abundantes huertas, era el llamado firme de hormigón-mosaico, el pavimento adoquinado de la época de Primo de Rivera, donde se habían formado enormes baches debido al tráfico de carros de llanta metálica, que no se arreglaban pues se creía de duración eterna".

La situación empieza a mejorar algo a raíz del Tratado hispano-norteamericano; como señala Uriol Salcedo (op. cit.) "la construcción de las bases conjuntas hispano-norteamericanas, de acuerdo con el tratado con Estados Unidos, de 1953, en la que se utilizaron las soluciones técnicas más modernas, tuvo destacada influencia en la puesta al día de los técnicos españoles en estas materias, sobre todo en cuanto a los nuevos firmes. Como consecuencia del tratado, varios ingenieros españoles de la Dirección General de Carreteras fueron a aquel país para conocer de cerca la organización americana". Sin em-

bargo, y a pesar de todo, parece que a finales de la década de 1950 "en España el porcentaje de firmes con pavimento de aglomerado asfáltico de diversos tipos no llega al 0,6 % de la red de carreteras del Estado" (cita de Mercedes López y Jorge Bernabeu tomada de la Revista de Obras Públicas, 1959); pero a principios de 1962, los aglomerados asfálticos cubrían el 2,5 %.

De los ingenieros que van a Estados Unidos en esa época para el estudio de los firmes destacamos a Jorge Fanlo Nicolás y a los recientemente fallecidos Ángel Lacleta Muñoz y Gonzalo Navacerrada Farías. Este último se incorpora a su regreso al Laboratorio del Transporte, institución que desde su fundación en noviembre de 1944 en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y bajo la dirección del

profesor de Caminos de la Escuela José Luis Escario Núñez del Pino promueve la tecnificación en el diseño y en la construcción de los firmes. A principios de la década de 1950 el Laboratorio, que más adelante pasa a denominarse del Transporte y Mecánica del Suelo, consta de dos secciones: Mecánica del Suelo y Pavimentos, así como de un Laboratorio Químico. A la Sección de Pavimentos se incorporan ingenieros de cuya labor es profundamente deudora la tecnología española de firmes, entre los que destacan el citado Gonzalo Navacerrada Farías y Antonio Lleó de la Viña y, algunos años después, Carlos Kraemer Heilperno y Enrique Balaguer Camp-huis; por su parte, el Laboratorio Químico, que luego se integra en la Sección de Pavimentos, es el origen de la actividad de químicos cuya influencia es notable en la pavimentación asfáltica hasta bien entrada la década de 1980: Luis Valero Alonso, Antonio Ubach Calvo, José María Muñoz Cebrián y José Olivares Trigo.

En paralelo con los progresos en las mezclas asfálticas, se producen también avances en otras capas del firme de distinta naturaleza, propiciados tanto por la creciente disponibilidad de maquinaria de elevado rendimiento para la época como por la necesidad de hacer frente al creciente transporte por carretera, que a partir de entonces empieza a arrinconar definitiva e irreversiblemente, tanto en viajeros como en mercancías, al ferrocarril. En 1960 se construye la variante de Boceguillas (Segovia) en la carretera N-1: es

(3) En 1935 hay en España unos 22 000 km de carretera con algún tipo de revestimiento asfáltico.



el primer firme en España con capa de base de granulometría continua, lo que denominamos una zahorra artificial. Nace así una alternativa al macadam, cuyo uso queda a partir de ese momento relegado a carreteras de segundo orden, hasta el punto de que algunas décadas después es una técnica que sólo se aplica de manera marginal en algunas regiones como Galicia y Andalucía Oriental.

En 1964, entre los puntos kilométricos 18 (Las Rozas de Madrid) y 40 (Villalba de Guadarrama) de la autopista A-6 se construye, así mismo por primera vez en España, una capa de base de gravacemiento, disponiéndose de esta manera un firme, de los que más adelante se denominan semirrígidos, especialmente adaptado a los tráficos pesados de elevada intensidad. También fue la primera vez que se hizo una verdadera estabilización *in situ* con cemento, con un tren Howard. Con el tramo Las Rozas-Villalba nace la modernidad en la tecnología de los firmes de carreteras en España, modernidad que empieza con buen pie, pues la rehabilitación de este firme no necesita ser acometida hasta que teóricamente le corresponde, transcurridos ya veinte años, con un proyecto de 1986 en el que interviene el autor de esta líneas. Sin embargo, con la técnica de los firmes semirrígidos surge la preocupación por las grietas de retracción que inevitablemente acaban apareciendo en la superficie del pavimento; esta preocupación se convierte casi en una obsesión entre los ingenieros españoles de carreteras en las décadas de 1980 y de 1990.

Pero al estudiarse el firme para la rehabilitación del tramo Las Rozas-Villalba se certifica lo que ya es más que sabido en ese momento: que el éxito de los firmes con una capa de base de gravacemiento requiere unos procesos constructivos cuidadosos y una rigurosa dirección de las obras, que en el caso de Las Rozas-Villalba asume Frutos Santiago Luelmo, un ingeniero que también había permanecido un tiempo en Estados Unidos y que deja una profunda huella en esa época en todas las obras que le son asignadas y marca quizás el punto más alto en la preocupación por los materiales de construcción de los firmes, sus procedimientos de puesta en obra y su control. Durante las dos décadas siguientes otros ingenieros continúan esa preocupación por las características de los materiales en las denominadas Divisiones de Materiales de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales: Francisco Achútegui

Viada en Zaragoza, Jesús Páez Martínez en Valladolid, Ramón Molezún Rebellón en La Coruña, Valentín Broc Virto en Barcelona, etc.

Poco antes de la construcción del tramo Las Rozas-Villalba, a principios de esa misma década de 1960, el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, en colaboración con la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales del Ministerio de Obras Públicas, planea y desarrolla el tramo de ensayo de la carretera N-II. Históricamente, es el principal intento, casi el único, de estudiar sistemáticamente bajo tráfico real los firmes de carretera en España. El ejemplo del ensayo AASHO americano (1958-1960) es muy reciente y, aunque con una metodología de trabajo algo distinta, el prurito de emulación es inevitable. Desgraciadamente, los improbables esfuerzos llevados a cabo por los ingenieros involucrados en el tramo de ensayo carecen luego de la necesaria continuidad.

En una conferencia pronunciada el 1 de diciembre de 1964, con ocasión de un simposio sobre tramos de ensayo, José Luis Escario, Director del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, explica la razón de ser, los objetivos y las circunstancias del tramo de ensayo, diciendo entre otras cosas las siguientes:

*"Adoptar a ciegas soluciones extrañas, de países de condiciones distintas, especialmente de condiciones económicas diferentes, puede ser un grave error técnico y económico. [...]*

*[...] los dos fracasos más grandes que hemos tenido en el tramo de ensayo español han sido por guiarnos un poco a ciegas del resultado obtenido por las técnicas hermanas. [...]*

*[...] nos proponíamos ensayar comparativamente todos los pavimentos de alta calidad empleados hoy día en la técnica mundial. Para ello, buscamos un tramo que cumpliera las condiciones siguientes: en primer lugar, que estuviese cerca del Laboratorio, para que la atención que éste pudiera prestarle fuera en la práctica la suficiente y obtuviéramos de él todos los datos que nosotros podíamos precisar. En segundo término, que fuese un tramo de gran intensidad de circulación, porque solamente así, aunque tuviéramos que molestar algo al tráfico, podíamos obtener resultados que fueran válidos desde el punto de vista práctico; y, por último, que la inversión que se hiciera, que for-*

zosamente tenía que ser fuerte, fuera útil, es decir, se realizara en un tramo que hubiera que pavimentar; los ensayos americanos, con tramos y tráfico especiales, costaron sumas ingentes. Por ello, escogimos en la carretera R-II (sic), que va de Madrid a Barcelona, un tramo que tiene su origen en el kilómetro 11 y en total una longitud de 7 km. [...]

[...] el tráfico intensísimo que tenía que soportar, una media de 13 000 vehículos diarios, con un 25 al 30 por 100 de vehículos pesados. [...]

El proyecto formulado después de haber visitado, el que os dirige estas palabras rápidamente y con todo cuidado los ingenieros señores Navacerrada y Kraemer, los principales tramos de este tipo existentes en Suiza, Alemania, Francia e Inglaterra, se redactó el proyecto con las siguientes características técnicas: intentamos eliminar la variable suelo [...]

[...] se han construido 53 tipos de firmes flexibles distintos. Las características de estos firmes han cambiado en los tipos de bases, de binder y de capas superiores de rodadura. Se han empleado como bases macadam, bases de granulometría continua, bases asfálticas con espesores diferentes, y capas de binder abierta o semicerrada, con espesores de 4 a 5 cm. En las capas de rodadura han variado los espesores; se han empleado, como antes indiqué, el firme de alquitrán, y en otra el caucho betún y, por último, se han hecho, de acuerdo con la técnica inglesa, unos ensayos en los cuales se ha añadido al firme gravilla preenvuelta; en total, como os decía, 53 tipos de firmes distintos.

En el hormigón hidráulico, se han construido tramos formados por losas de espesor y longitud diferentes, separadas por juntas de contracción de distintos tipos. Las juntas de dilatación solamente se han dispuesto entre los tramos de diferente espesor, es decir, a distancias de 432 m. Se ha incluido una losa experimental armada de 125 m de longitud, sin juntas. Todos estos pavimentos van dotados de junta longitudinal. Los espesores construidos han variado entre 20 y 25 cm. Las losas van asentadas sobre una base granular, con un espesor total de 50 cm. [...]



Fig. 2. El estudio de tráfico pesado en el puerto de Barázar.

Por último, hemos ensayado un tramo de hormigón pretensado. Tiene en su totalidad una longitud de 2.400 m, y en él se han ensayado los distintos sistemas de pretensado que hoy día están en uso en el mundo: pretensado interno con alambres, pretensado externo fijo y pretensado externo con juntas elásticas. [...]

[...] como siempre, hemos tenido que vencer en esta etapa dificultades, y soportar muchos sinsabores. En la tarea tuve en todo momento la ayuda entusiasta del personal del Laboratorio y, muy especialmente, de nuestros compañeros señores Balaguer, Navacerrada y Kraemer [...].

También en esos años, que como vemos fueron de una notable efervescencia en España en el campo de los firmes de carreteras, nace la empresa Probisa, de la mano del ingeniero Juan Antonio Fernández del Campo Cuevas, que va a contribuir a desarrollar notablemente en esa década y en las dos siguientes lo que se llama la tecnología en frío, es decir, la basada en el empleo de las emulsiones bituminosas. Por primera vez, gracias a Probisa, desarrollos españoles en el marco de esta tecnología se acabarán implantando en países como Francia, Marruecos, México y Estados Unidos. Años después, en 1977, dentro del grupo de empresas creado por el contratista de obras salmantino Elpidio Sánchez Marcos, cuyo origen se remonta a 1924, nace la empresa Elsamex, que llevará también la tecnología española de las emulsiones bituminosas fuera de nuestro país, incluso al Lejano Oriente.

Las primeras patentes europeas sobre las emulsiones bituminosas se registran en 1922. A principios de la década de 1930 la empresa Pavimentos Asfálticos posee sendas fábricas en Madrid y en Sevilla, y Elpidio Sánchez Marcos crea una tercera en Salamanca en 1935. Aunque en esos años ya se colocan en España algunas mezclas en frío y se empiezan a utilizar las emulsiones en los riegos, el mayor impulso se produce a partir de la introducción en Europa en 1953 de las emulsiones bituminosas catiónicas, con las que las posibilidades de aplicación de las técnicas en frío aumentan espectacularmente; precisamente, el mismo Elpidio Sánchez Marcos crea un año antes la empresa Composán, que en las cuatro décadas si-

guientes liderará, junto a Probisa, el desarrollo de productos ligados al empleo de las emulsiones, así como, posteriormente, de otros a los que más adelante aludiremos. Las labores de desarrollo tecnológico que en Composán realizan los químicos Jaime Gordillo Gracia y Ramón Tomás Raz deben ser sin duda reseñadas.

Las emulsiones sustituyen paulatinamente a los betunes asfálticos en los tratamientos por penetración y en los riegos con gravilla, que son las técnicas de pavimentación asfáltica predominantes en España hasta los años sesenta. La crisis del petróleo de 1973 dispara el consumo relativo de las emulsiones en riegos de adherencia y de curado y en riegos con gravilla, desplazando casi totalmente a los betunes fluidificados, que sólo se seguirán empleando en riegos de imprimación hasta su práctica desaparición a finales de los ochenta. En paralelo, las mezclas abiertas en frío se imponen en las carreteras secundarias, a la vez que crece de manera espectacular la aplicación de lechadas bituminosas en todo tipo de vías. En 1983, Fernández del Campo escribe lo siguiente a propósito de las emulsiones:

*"En España, la producción de emulsiones en 1981 ha sido de 400.000 t. De ellas, la gran mayoría catiónicas. Los dos tipos de emulsiones más usados lo han sido para tratamientos superficiales con riego y para mezclas bituminosas abiertas. Hay que destacar que, respecto al consumo total de betunes asfálticos, el betún convertido en emulsión representa un porcentaje aproximado del 37 %. También aquí la posición relativa de la emulsión ha mejorado después de la crisis energética".*

Aunque en el párrafo anterior las lechadas no son citadas, es preciso destacar que en la década de 1970 y 1980 alcanzan en España un gran auge, sobre todo en el quinquenio 1975-1980, que es precisamente el de menor actividad en pavimentación viaria en España en el último tercio del siglo XX. Pero lo más reseñable es que el desarrollo tecnológico que se alcanza en esos años sitúa a España en la vanguardia de esta técnica junto a Estados Unidos.

En cambio, la técnica de los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla queda en alguna medida anclada en el pasado, no progresando tanto como otras. Y ello a pesar de que en la segunda mitad de los setenta la Dirección General de Carre-

teras encarga a las empresas Probisa y Elsan una serie de tramos experimentales siguiendo la tecnología francesa: áridos seleccionados y de gran calidad, emulsiones bituminosas viscosas (incluso modificadas), maquinaria de última generación y procedimientos de puesta en obra cuidadosos y sometidos a estrictos controles de calidad, tanto *in situ* como en el laboratorio. Cabe citar los tramos que se ejecutan en Guadalajara (carretera N-II) y en Asturias (carretera N-634): los resultados, sometidos a un riguroso análisis, son plenamente satisfactorios, pero no se continúa con la experiencia de emplear riegos con gravilla en vías con altas intensidades de tráfico.

Volviendo a las mezclas bituminosas en caliente, su empleo empieza a generalizarse con las actuaciones que se desarrollan en el marco del denominado Programa Redia (Red de Itinerarios Asfálticos), que es una extensión del Plan de Carreteras de 1961 y que arranca el 24 de enero 1967; aunque inicialmente estaba diseñado como plan cuatrienal, termina en 1975. Se aplica a 4.928 km, el 6,3 % de la red estatal. Sánchez Lázaro y otros (1995) escriben al respecto:

*"Se trata de un programa de gran simplicidad pero ambicioso. Consiste en extender una capa de aglomerado asfáltico de 12 cm de espesor, completar la anchura de las calzadas que aún no la tienen a 7 m y dotarlas de dos arcenes laterales afirmados, de 2,5 m cada uno. En resumen, ampliar el total de la plataforma a 12 m. Y, como complemento, en las vías de mayor tráfico, construir carriles adicionales de circulación lenta para vehículos pesados, en los tramos con rampas fuertes y prolongadas [...]".*

Estando ya muy avanzado el Programa Redia, se plantea un objetivo igualmente ambicioso: conseguir que en los más de los 70 000 km de la red estatal de carreteras no quede un solo metro sin un revestimiento asfáltico, aunque éste se reduzca a un riego con gravilla monocapa. El Plan de transformación de los firmes de macadam supuso un gran esfuerzo, revisitiéndose en cinco años, entre 1973 y 1978, 21.500 km de las viejas carreteras de piedra partida y recebo. Se logra así el sueño que nace con el Circuito de Firmes Especiales, cincuenta años antes. No es fácil, ya entrados en el siglo XXI, hacerse una verdadera idea de la magnitud de ese logro en un país cuyo atraso en materia de infraestructuras viarias era proverbial.



Experiencias de gran interés tecnológico que tienen lugar en los años sesenta y que son reseñadas por distintos autores son las consistentes en tratamientos superficiales con mezclas bituminosas de muy pequeño espesor, por ejemplo en las carreteras de Chamartín a Alcobendas (Madrid), de Girona a San Feliú de Guíxols, y en la N-II en el tramo entre Torija y el límite de la provincia de Guadalajara con la de Soria. A finales de la década de 1960 Sandro Rocci Boccaleri dirigió en la N-I unos experimentos con mezclas bituminosas en caliente de granulometría discontinua, pero resultaron muy susceptibles a las roderas.

En definitiva, en torno a 1970 se puede considerar que la técnica de las mezclas bituminosas en caliente en España es por fin una técnica madura. Poco a poco, los firmes ordinarios dejan de ser los de macadam, revestidos o no con riegos con gravilla, para pasara a ser los formados por mezclas bituminosas sobre bases granulares de granulometría continua o, donde los tráficos pesados son más intensos, sobre bases de gravacemento, alternativa que se ve favorecida también por la ya aludida crisis del petróleo de 1973. Sin embargo, en esos pavimentos con mezcla bituminosa se empieza a manifestar con preocupante frecuencia un grave problema que no se había previsto: las roderas. A partir de su constatación, todos los esfuerzos, tanto en la Dirección General de Carreteras como en el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, se concentran en intentar resolver un problema que llega a afectar a una longitud importante de la red nacional.

Un ejemplo de esos esfuerzos lo constituyen las pruebas de corrección de roderas mediante una maquinaria especial para cortarlas y rellenarlas. Los trabajos mejor referenciados son los que, bajo la dirección del ingeniero Roberto Alberola García, se llevaron a cabo en octubre de 1973 en un tramo de la carretera N-I próximo a Venturada (Madrid). Con la misma máquina, comprada por la empresa constructora Abraham de las Heras, se corrigieron también otros tramos en la misma N-I, en la N-II (entre Madrid y el aeropuerto de Barajas), en la N-301 (en Quintanar de la Orden) y en la N-623 (en el Páramo de Masa). También la empresa Elsan se hizo con otra máquina análoga, con la que se trabajó en la N-IV



Fig. 3. Las correcciones de las roderas.

entre Sevilla y Carmona. En este último caso se levantó una capa de mezcla asfáltica de 5 cm de espesor que se sustituyó por un hormigón bituminoso de alquitrán vinilo.

Hay que tener en cuenta que lo que se implanta en España a raíz de las misiones técnicas de ingenieros españoles a Estados Unidos en la década de 1950 es la tecnología del *Asphalt Institute*. Sin embargo, las condiciones españolas presentan unas peculiaridades que hacen que deba revisarse la mera traslación tecnológica que se ha llevado a cabo: rampas con inclinaciones fuertes y longitudes importantes, altas temperaturas en verano, vehículos con grandes cargas por eje (4), mayores presiones de inflado en los neumáticos que las admitidas en otros países, crecimientos espectaculares del tráfico pesado (5), en ocasiones también bases tratadas con cemento que

provocan un efecto yunque, etc. El estudio sistemático de las mezclas bituminosas y de sus parámetros de formulación es llevado a cabo en paralelo, bajo el impulso primero de Enrique Balaguer Camphuis y luego de Carlos Kraemer Heilperno, en el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo y en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. El problema queda totalmente resuelto con la modificación en 1975 de las especificaciones de las mezclas: granulometrías del árido menos sensibles a las variaciones de los parámetros involucrados, contenidos de ligante más estrictos, betunes asfálticos más duros, proporciones relativas de filler más elevadas, mayores exigencias de los áridos para aumentar el rozamiento interno, etc.; en la misma dirección contribuye también la aplicación de las conclusiones del estudio sobre las deformaciones plásticas de las

(4) En la década de los sesenta, pretendiendo mejorar la eficiencia en el transporte y, también en alguna medida, paliar el problema de las generalizadas sobrecargas, se termina por elevar la carga máxima legal de 10 t a 13 t por eje simple. El Decreto 1216/1967 sobre pesos y dimensiones de los vehículos sustituye al anteriormente vigente Decreto 490/1962 (en este año último se ha bajado a 10 t la carga máxima por eje establecida en 1948 en 12 t). A la vista de los resultados, parece que el remedio es peor que la enfermedad.

(5) Durante los años sesenta, el crecimiento registrado del tráfico pesado supera casi todos los años la tasa del 10 % en el conjunto de la red, y la del tráfico total supera durante bastantes de esos años el 20 %. Ciertamente, en muchos itinerarios de la red nacional los crecimientos estuvieron muy por encima incluso de esos valores.

mezclas, que es la Tesis Doctoral del ingeniero Justo Borrajo Sebastián (1977).

Sin embargo, la resolución del problema de las roderas conlleva unos efectos secundarios que se arrastran hasta los años del cambio de siglo: las mezclas resistentes a las roderas resultan demasiado rígidas, tienen una menor resistencia a la fatiga y, sobre todo, envejecen con relativa rapidez. La durabilidad de nuestras mezclas resulta inferior que la de las mezclas de otros países. En los treinta años transcurridos desde entonces los pavimentos asfálticos españoles se distinguen a simple vista de los de esos otros países no sólo por la mayor profusión de grietas, sino principalmente por presentar un color mucho más pálido, que a la postre está determinado más por el color de los áridos empleados en la capa de superficie que por la presencia del betún asfáltico, cuyos contenidos son más bajos que allende nuestras fronteras.

En 1963, dentro de la nueva Instrucción de Carreteras que entonces elabora la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales, aparece una normativa de firmes que se basa en el antiguo método del CBR. Dado que ya se habían publicado las conclusiones del ensayo AASHO, la norma nace obsoleta y nunca es utilizada. Doce años después, en 1975, se pone en valor la experiencia acumulada en los años anteriores, que ha sido mucha, y se publica una nueva normativa de firmes: las normas 6.1 IC de firmes flexibles y 6.2 IC de firmes rígidos. A estas normas se les da la forma de catálogo de secciones estructurales, a la manera de lo que han hecho los franceses dos años antes. Entre esas secciones hay algunas que se han empleado con profusión a finales de los sesenta y principios de los setenta en las autopistas de peaje: secciones de firme en las que la base de gravacemento se apoya directamente sobre una capa granular de zahorra natural. Se piensa que esas secciones están abocadas a un comportamiento estructural deficiente a medio plazo, pero prima el interés por dar carta de naturaleza a lo que han hecho los concesionarios de las autopistas de peaje. Carlos Kraemer y Antonio Martínez de Aragón demuestran en un estudio teórico de 1977 esas deficiencias estructurales y la aparición de graves problemas en los firmes de algunas de esas autopistas les da la razón. Pero hay que esperar, sin embargo, al 12 de noviembre de 1984 para que una circular del Director General de Carrete-

ras prohíba definitivamente las secciones de firme en cuestión.

Las normas de firmes del año 1975 introducen una nueva manera de diseñar los firmes, mucho mejor sistematizada y con grandes ventajas prácticas que no es éste el lugar para ponderar. Sin embargo, lleva aparejada también una excesiva simplificación en la labor de diseño, que a la larga va a suponer algunos inconvenientes.

#### 4. El período 1978-2000

En 1979, financiados por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, se emprenden en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander los estudios para la formulación de unas nuevas mezclas bituminosas para las capas de rodadura, y que van a tener no sólo un profundo impacto en nuestro país, sino también una inusitada trascendencia fuera de nuestras fronteras: Carlos Kraemer Heilperno y Félix Edmundo Pérez Jiménez ponen a punto las mezclas bituminosas porosas o drenantes. Sus trabajos tienen un hito en la Tesis Doctoral de Miguel Ángel Calzada Pérez (1984) y unos de sus frutos más llamativos es el denominado ensayo cántabro, incorporado a los procedimientos de diseño de estas mezclas en distintos países europeos además de en el nuestro.

Tras las primeras pruebas en varias carreteras de Cantabria, a partir de 1985 se empiezan a realizar obras no experimentales en distintas carreteras convencionales de todo el país, incluso en Canarias (Avenida Marítima de Las Palmas, bajo la dirección del ingeniero Julio Luengo), y en el año 1986 en autopistas (autopista Bilbao-Behovia). A finales del año 1990 existen ya unos diez millones de metros cuadrados de pavimentos drenantes, y en 1999 se superan los setenta millones de metros cuadrados, destacando provincias como las de Zamora y Jaén, con múltiples obras dirigidas, respectivamente, por los ingenieros Diego Morillo Rocha y Francisco Ruiz Hidalgo. Estas cifras superan extraordinariamente las de otros países europeos donde esta técnica alcanza también una gran difusión: Austria, Bélgica, Francia y Países Bajos, principalmente. Sin embargo, el clima poco lluvioso de la mayor parte de España hace que a finales de los noventa se empiece a considerar que

los inconvenientes de los pavimentos drenantes (rápida colmatación, dificultad de limpieza) son mayores que sus ventajas, y la técnica entra, de cara al siglo XXI, en una etapa de retroceso.

Una de las mayores aportaciones que surgen del desarrollo de las mezclas bituminosas porosas es el empleo creciente en los firmes de carreteras de los betunes modificados con polímeros: aunque inicialmente las mezclas porosas se fabrican con betunes asfálticos convencionales, pronto se comprueba que la única forma de conseguir una mayor porosidad y, por tanto, una mayor relevancia de sus características es recurriendo a esos nuevos ligantes. En la década de 1990 prácticamente todas las mezclas porosas se fabrican ya con betunes modificados y, lo más notable, se utilizan de manera creciente en otras capas de rodadura de naturaleza asfáltica, con dos objetivos principales: disminuir el envejecimiento y lograr un mejor comportamiento en servicio en condiciones de cambios importantes de temperatura.

Aunque los primeros trabajos dirigidos al aprovechamiento de desechos y subproductos en la construcción de firmes de carretera en España datan de la década de los setenta, es en los ochenta cuando estos temas empiezan a despertar un cierto interés, para despegar definitivamente en la última década del siglo. Dejando a un lado trabajos experimentales, como los enfocados a la utilización de los plásticos obtenidos en las basuras domésticas (Miguel Ángel del Val Melús, 1985), las aplicaciones más consistentes son las basadas en el empleo de escorias siderúrgicas, en unos casos como áridos (escorias de acería y escorias cristalizadas de horno alto) y en otros como conglomerantes alternativos al cemento en capas de base (escorias vitrificadas de horno alto). Se suceden durante esas dos décadas los tramos en los que se emplean escorias tanto en Vizcaya como en Asturias, hasta llegar en esta última región a finales de los ochenta a la ejecución de capas de base constituidas por escoria-escoria. Sin embargo, básicamente por las dificultades que surgen en la comercialización de estos productos, la técnica no progresa todo lo que de ella se espera en un momento dado.

En la década de los ochenta se producen tres acontecimientos que influyen en mayor o menor medida en la evolución tecnológica de los firmes de carreteras en España hasta el final del siglo. El primero es de índole política: la transferencia a las comunidades autónomas de todas las carreteras estata-

les que no se consideran de interés general (6), de manera que la red del Estado se reduce de más de 70.000 km a poco más de 20.000 km. El segundo acontecimiento es de naturaleza estrictamente técnica: la construcción en 1984 de una pista de ensayo a gran escala en el nuevo Centro de Estudios de Carreteras, situado en El Goloso, a las afueras de Madrid (su antecesor, el antiguo Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, situado en el parque de El Retiro, se había pasado a llamar ya en la década anterior Laboratorio de Carreteras y Geotecnia José Luis Escario). El tercer acontecimiento, que afecta a los ámbitos político, económico y técnico, es el lanzamiento en 1985 del Programa de Autovías del Plan General de Carreteras 1984-1991.

Las transferencias a las comunidades autónomas suponen que a partir de ese momento los firmes que han constituido la red nacional evolucionan de manera distinta, dependiendo sobre todo de las disponibilidades presupuestarias de los nuevos titulares, que en ocasiones aplican también criterios técnicos propios y diferenciados. En este sentido, un primer hito es la publicación de las normas BAT de la Diputación Foral de Vizcaya (1986); luego llegarán otros en la siguiente década.

La pista de ensayo de El Goloso tiene su antecedente en un primer diseño de pista circular que idean Fernández del Campo, Ferraz y Pérez Jiménez (1973) para construir en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, en la línea de lo que empiezan a hacer en esos años diversas instituciones de vanguardia de países desarrollados. Cuando por fin se construye la del Centro de Estudios de Carreteras, con dos tramos rectos y sendos tramos curvos que unen aquéllos, se convierte en la principal infraestructura de este tipo en el mundo, con una sofisticación técnica absolutamente extraordinaria que hacen de ella un verdadero hito de la tecnología española de los firmes. Sin embargo, las expectativas creadas no se cumplen, y la pista de ensayo apenas tiene influencia en el diseño de los firmes en España en los últimos años del siglo. Avanzada ya la primera década del nuevo siglo XXI, la pista se ha convertido en una infraestructura poco relevante en la práctica.

(6) Como consecuencia de ello, el Estado deja de ser titular de carreteras en Baleares y en Canarias y, salvo las autopistas de peaje explotadas en régimen de concesión, también en el País Vasco y en Navarra.

Más decisivo es el papel que desempeña en la evolución de los firmes en España el Plan General de Carreteras 1984-1991 y, más específicamente, su Programa de Autovías. Cómo se quiere que sean los nuevos firmes y, en buena medida, cómo van a ser en los próximos años queda reflejado en un documento sobre secciones de firme autovías que publica la Dirección General de Carreteras en julio de 1986. Se inicia así una etapa extraordinariamente dinámica en el desarrollo de los firmes, aunque con una cierta dispersión normativa.

Las principales novedades son:

- Los espesores de los firmes aumentan notablemente. Se pretende hacer frente a un importante crecimiento de los tráficos pesados, y además se aprovecha la circunstancia de una política presupuestaria expansiva, que facilita mayores inversiones.
- Se agudiza la simplificación en el diseño de los firmes que, como se ha comentado más arriba, ha introducido la normativa de 1975. Sobre todo, se produce una trivialización en el análisis del tráfico pesado, aunque es cierto que se obviaron complicaciones en ese análisis que eran innecesarias.
- Se contemplan los firmes con pavimento de hormigón en pie de igualdad con los que tienen pavimento asfáltico, lo que va a facilitar un empleo de aquéllos mucho más abundante que en épocas anteriores.
- Frente a las secciones de firme semirrígido con base de gravacemento y subbase de suelocemento, se normaliza una alternativa en la que sobre el suelocemento se disponen sólo capas de mezcla bituminosa (7). Esta alternativa se acaba convirtiendo a comienzos del siglo XXI en el tipo de firme más utilizado para hacer frente a tráficos pesados intensos.
- Aparece un nuevo material para capa de base: el que inicialmente se denomina hormigón seco compactado con rodillo y, más adelante, hormigón compactado simplemente.

El hormigón compactado es un material realmente antiguo, pero que experimenta una cierta

(7) El tramo Mérida-Badajoz de la autovía de Extremadura se convierte a finales de los ochenta en una obra emblemática en la que se emplea una sección de mezclas bituminosas sobre suelocemento. Fue dirigida por el ingeniero Rafael Abenza López.

popularización desde 1970 en trabajos de pavimentación en urbanizaciones de la provincia de Barcelona y de las comarcas del Pirineo catalán. El objetivo es poder construir un firme de gran capacidad estructural con los medios tradicionales de construcción de firmes de los que disponen los contratistas locales. A menudo se deja sin recubrimiento alguno, o simplemente con un riego con gravilla. En este último caso es sólo en el fondo una manera distinta de concebir los firmes denominados mixtos, los más habituales en las vías urbanas de ciudades como Madrid y Barcelona desde la década de 1960, aunque en éstas lo que se coloca es un hormigón preparado, de baja resistencia, que se recubre después con una o dos capas de mezcla bituminosa. Otra variante es la de la base de *lean concrete*, según la tecnología inglesa, que se utiliza en los setenta en la avenida del Cardenal Herrera Oria de Madrid (la popular carretera de la Playa) y en la autopista Bilbao-Behovia.

Tras su paso por la tecnología francesa, se utiliza el hormigón compactado en los primeros años ochenta en dos obras viarias importantes: en un tramo de la N-III en la provincia de Madrid y en el túnel del Cadí (1984), que se convierte en la nueva salida de Barcelona hacia las comarcas pirenaicas. Considerando el aparente éxito conseguido en ambos casos y los bajos costes de la solución (sobre el hormigón compactado se coloca sólo una capa de mezcla bituminosa), se plantea su utilización masiva en las calzadas duplicadas con las que se crean las nuevas autovías. Aunque, como se ha señalado, es una de las soluciones recogidas en el documento de 1986 sobre secciones de firme en autovías, pronto surgen serias dudas sobre el correcto comportamiento de este material, hasta el punto de que el Director General de Carreteras dicta el 18 de febrero de 1987 una Orden Comunicada sobre su empleo en autovías, en la que se señala taxativamente que las secciones con base de hormigón compactado se deben considerar experimentales y que, en consecuencia, sólo se pueden proyectar y construir con la expresa aprobación de la superioridad. Paradójicamente, estas bases seguirán figurando en la norma de secciones de firme publicada en 1989, cuya vigencia llega hasta finales de 2003.

En la segunda mitad de los años ochenta, a pesar de las prevenciones apuntadas, se utiliza el hor-

migón compactado en algunos nuevos tramos de autovías, como es el caso de los tramos Villaverde-Seseña y Valdepeñas-Almuradiel de la autovía de Andalucía y en muchos tramos de la nueva autovía autonómica A-92 que construye la Junta de Andalucía (más de 100 km con hormigón compactado entre Sevilla y Granada). Ambas experiencias se saldan con sendos fracasos, o al menos así los valoran los responsables tanto de la administración estatal como de la andaluza. Lo cierto es que el empleo del hormigón compactado en las obras viarias decae, aunque años después reaparece reconvertido en urbanizaciones, en las que lo que realmente se construye se parece más al antiguo *lean concrete* inglés más arriba aludido.

En otro orden de cosas, los trabajos del Programa de Autovías del Plan General de Carreteras 1984-1991 propician un aumento espectacular del parque de maquinaria, que coloca a las empresas españolas, por primera vez, a la cabeza de Europa: cisternas para los riegos de adherencia, imprimación y curado, centrales de fabricación de mezclas asfálticas (el primer impulso se dirige a las de tambor secador-mezclador (8), aunque luego se abandona esta línea para centrarse en las tradicionales de funcionamiento discontinuo), extendedoras con alto grado de precompactación por la acción de un doble pisón, pavimentadoras de encofrados deslizantes para la colocación de pavimentos de hormigón, etc. Entre otras, cabe destacar a la empresa zaragozana Lebrero que durante esos años se distingue especialmente por su producción de compactadores. Un comentario especial requiere también la profusión, lo que no es necesariamente positivo, de las plantas asfálticas: mientras que en 1980 aún hay provincias españolas en las que no existe ninguna, en 1995 se cuentan ya más de cuatrocientas distribuidas por todo el territorio nacional.

La década de 1990 trae un nuevo material sobre el que, como ha ocurrido antes con el hormigón



Fig. 4. La desaparición de los pavimentos de macadam.

compactado con rodillo, también se van a depositar grandes expectativas: las bases asfálticas de alto módulo de rigidez. A partir de la necesidad que tienen algunas refinerías de petróleo de dar salida a sus residuos de desasfaltado, surgen betunes muy duros con los que se pueden fabricar unas mezclas bituminosas que además de tener una rigidez que duplica la habitual en estos materiales presentan una apreciable resistencia a la fatiga gracias a unas elevadas dotaciones de ligante. Tras unas primeras experiencias en Murcia y su empleo en 1992 en un tramo importante (Zamora-El Cubo de la Tierra del Vino de la carretera N-630, obras que dirige el ingeniero Diego Morillo Rocha) y los estudios teóricos que se llevan a cabo en la Escuela de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Madrid (Miguel Ángel del Val Melús, 1996),

destaca la construcción de diversos tramos de autovía en 1997 en la Demarcación de Carreteras del Estado en Castilla y León Occidental, todo ellos con notable éxito: autovía de Castilla (N-620), tramo Cañizal-Salamanca; autovía de las Rías Altas (A-6), tramo La Bañeza-Astorga; autovía de las Rías Bajas (N-525), tramos Mombuey-Requejo, Fumaces-Estivadas y Benavente-Camarzana. Sin embargo, en los años siguientes la técnica sufre un cierto estancamiento como consecuencia, entre otras razones, de las dudas que se plantean en los servicios técnicos de la Dirección General de Carreteras, aunque ya en el siglo XXI se puede considerar que la técnica se ha consolidado.

En la misma época, concretamente en 1996, se lleva a cabo, bajo la dirección del ingeniero Diego Morillo Rocha, una obra en la que se aúnan dos de las técnicas de mayor impacto en estos años próximos al cambio de siglo: la que se acaba de comentar de las bases asfálticas de alto módulo de rigidez y la del reciclado de firmes. Se trata de la rehabilitación del firme de la carretera N-525 en el tramo entre el cruce de Mombuey y el límite de las provincias de Zamora y Orense, donde mediante un reciclado in situ en caliente (llevado a cabo en una central itinerante de fabricación de mezclas bituminosas) se constituye una base de alto módulo a partir de un ligante modificado con gran capacidad rejuvenecedora. La experiencia carece de continuidad y no se explota el po-

(8) La primera central de este tipo en España la fabrica la empresa española Intrame en sus instalaciones de Valladolid, por encargo de la empresa constructora Elsan. La primera obra para la que trabaja, en la primavera de 1982, es la repavimentación de la travesía de Camuñas (Toledo) en la que hoy es la carretera autonómica CM-400.



tencial que puede tener para futuras obras. Cabe destacar, eso sí, que se trata de una actuación en la que se aúnan diversos esfuerzos, pues junto a la Unidad provincial de carreteras del Estado en Zamora colaboran el adjudicatario de las obras (Aldesa Construcciones), la empresa asfaltera Proas, el Centro de Estudios de Carreteras y la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

Antes de hablar del reciclado de los firmes, hagamos referencia a lo que supone quizás el cambio más profundo en el diseño y construcción de los firmes no sólo en la década de los noventa, sino incluso en toda la segunda mitad del siglo XX: la generalización de los procesos de formación de las explanadas mediante la estabilización *in situ* de los suelos con cal o con cemento. En el pasado se han aplicado estos procesos ocasionalmente, de una manera localizada y empleando maquinaria poco adaptada, de manera que la mejora conseguida en el cimiento es escasa: ya las normas de firmes del año 1975 contemplan expresamente la posibilidad de estabilizar en espesores de 15 cm. Aunque ya entonces se tiene la certeza de que puede resultar insuficiente en muchos casos, es lo máximo que cabe prescribir dada la maquinaria (de tipo agrícola o poco más) de la que previsiblemente se puede disponer en las obras.

La primera vez que se estabiliza *in situ* una gran superficie y en una profundidad apreciable utilizando maquinaria específica de gran rendimiento es a finales de los ochenta en la construcción de los estacionamientos de la Isla de la Cartuja, en Sevilla, destinada a albergar la Exposición Universal de 1992. Se piensa que por fin se va a superar unos de los grandes retrasos que en la tecnología viaria se mantienen en España con respecto a otros países. Sin embargo, aún han de pasar algunos años más hasta que se rompe el círculo vicioso: no se estabiliza porque no se proyectan estabilizaciones, y no se proyectan estabilizaciones porque no existen las máquinas adecuadas para ello. Cuando por fin se supera esta dinámica, la estabilización de los suelos *in situ*, en espesores de 20 a 30 cm y empleando maquinaria de gran rendimiento con la que se garantizan unos resultados idóneos, se convierte en poco tiempo en el procedimiento más habitual para la formación de las explanadas.

Desde un punto de vista normativo, juega un papel esencial en la generalización de las estabilizacio-

nes de suelos el documento con recomendaciones de firmes y pavimentos que publica la Junta de Castilla y León en 1996. Su primera motivación, como en años posteriores ocurre en otras comunidades autónomas, es poder diseñar firmes adaptados a unas disponibilidades presupuestarias inferiores a las del Estado: los espesores que se recogen en el documento sobre firmes en autovías de 1986 y que son extrapolados a tráficos pesados menos intensos en la norma de secciones de firme de 1989 resultan excesivos para esas regiones.

Quien en Castilla y León pilota no sólo el trabajo normativo, sino también una extraordinaria preocupación por un diseño adecuado de los firmes a las condiciones regionales aprovechando todo el potencial que ofrece la tecnología, es el ingeniero Luis Alberto Solís Villa, primero en la provincia de Ávila y luego, al asumir mayores responsabilidades administrativas (Director General de Carreteras e Infraestructuras desde 1995), en toda la región. A él se debe un notable impulso en el empleo de las mezclas bituminosas abiertas en frío en los años ochenta y luego, en los noventa, en el de las secciones de firme con suelocemento (a veces con espesores que superan los 30 cm) y un pequeño espesor de mezcla bituminosa. Así mismo, es el gran impulsor primero de la estabilización de suelos, labor en la que destacan, por ejemplo, los trabajos llevados a cabo en la autovía autonómica A-231 entre León y Burgos, y luego de los reciclados de firme *in situ* con cemento.

Como conocen bien los ingenieros dedicados a la pavimentación viaria, el reciclado de firmes envejecidos tiene su antecedente más antiguo en el acondicionamiento de los firmes de macadam (*retread process*) mediante la incorporación de una cierta cantidad de árido y de emulsión bituminosa o de cemento. Pero las técnicas de reciclado propiamente dichas surgen en los años setenta, a raíz de la crisis del petróleo de 1973, con el objetivo de disminuir el consumo de áridos, aprovechar el potencial del ligante existente en el firme viejo y en definitiva mejorar el balance energético en las actuaciones de rehabilitación. En 1980 parece, en España como en otros países, que la técnica de reciclado más prometedora es la del reciclado *in situ* en caliente, con sus tres variantes de termorreperfilado (sin materiales de aportación), termoregeneración (con una cierta cantidad de materiales de aportación) y remezclado (con aportación de mezcla bituminosa nueva

que se mezcla con el material preexistente). Se utilizan grandes máquinas integrales que en una sola pasada realizan de manera secuencial distintas operaciones. Verlas trabajar constituye un espectáculo asombroso, que en España se puede contemplar en el período 1980-1982 en la autopista entre Barcelona y La Junquera, y a la salida de Madrid en la A-6 (¡junto al palacio de La Moncloa!).

Sin embargo, a mediados de la década, la técnica del reciclado *in situ* en caliente se abandona en buena medida en toda Europa, porque sus ventajas son inferiores a sus inconvenientes. En cambio, surge, principalmente en Francia, una versión renovada del antiguo *retread process*: el reciclado *in situ* en frío, con emulsión bituminosa o bien con cemento; la técnica se enfoca en principio al acondicionamiento de vías de baja intensidad de tráfico.

En España se empieza a emplear el reciclado de firmes *in situ* ya en los años noventa, pero en carreteras importantes: en la N-II en el tramo que discurre por la provincia de Huesca (1991-1993), con emulsión bituminosa (9); en la N-431 en Huelva (1992), con cemento; en distintos tramos de la N-630 en la provincia de Cáceres (1995), empleando en unos casos cemento y en otros emulsión bituminosa. A partir de este momento, la técnica experimenta en España una progresión continua, ratificada en 1998 por la celebración en Segovia del IV Congreso Nacional de Firmes, dedicado monográficamente al reciclado de los firmes, en el que se constata que en los años transcurridos de la década de los noventa se han reciclado en España casi cuatro millones de metros cuadrados y en ese mismo año de 1998 ya se han realizado o se van a realizar de manera inminente otros ochocientos mil metros cuadrados. También se pone de manifiesto que, al contrario de lo acontecido en otros países europeos, se ha hecho poco reciclado en central. Pero esa es una asignatura pendiente que se intenta aprobar ya entrado el siglo XXI.

(9) Estas obras, que dirige el ingeniero Ángel Hernando del Cura, merecen figurar en cualquier historia de las carreteras, porque en ellas se utiliza, sin experiencia previa en España, pero con extraordinario éxito, una técnica concebida en principio para vías de baja intensidad de tráfico en una carretera nacional que en ese momento soporta más de 4 000 vehículos pesados por sentido y día.



Fig. 5. El pavimento de hormigón para la duplicación del paso de Despeñaperros.

A finales de los ochenta y durante los noventa continúa también la progresión tecnológica de las tradicionales lechadas bituminosas, pero con unas nuevas características de textura y de durabilidad que las hacen aptas incluso para vías con elevada intensidad de tráfico y alta velocidad de circulación. Son los denominados ahora microaglomerados bituminosos en frío, de los que el gran abanderado es la empresa Elsan. Pero a finales de los ochenta surge una alternativa utilizando técnicas en caliente, que luego en los noventa termina por desplazar como capa de rodadura de altas prestaciones funcionales incluso a las mezclas bituminosas porosas: son los microaglomerados en caliente de granulometría discontinua, es decir, las mezclas que se denominan, según su designación en las especificaciones, mezclas F y M. En 1987, la misma empresa Elsan pa-

vimenta con una mezcla F casi 124.000 m<sup>2</sup> en la autovía de Madrid a Toledo, en el tramo comprendido entre Yuncos y Cabañas de la Sagra. En 1994, esta empresa utiliza por primera vez una mezcla M, pavimentando en la autovía entre Madrid y Colmenar Viejo (la carretera M-607 de la Comunidad de Madrid) casi 400.000 m<sup>2</sup>.

Los microaglomerados en caliente de granulometría discontinua introducen a la tecnología española de pavimentos en el siglo XXI, pues por un lado ofrecen a los ciudadanos unas condiciones funcionales realmente insuperables, sin los inconvenientes de las mezclas porosas; por otro, propician desarrollos como los de los betunes modificados, que siguen progresando, las fibras, las extendedoras con rampa incorporada para el riego de adherencia, las emulsiones bituminosas termoadherentes para estos mismos riegos, etc.

Aunque eso ocurre ya en los primeros de este siglo XXI, la tecnología de los microaglomerados en caliente acaba confluyendo con otra que arranca en España en torno a 1994: la del aprovechamiento de los neumáticos fuera de uso en la fabricación de mezclas bituminosas. Los estudios llevados a cabo desde entonces en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (bajo la dirección del Catedrático D. Enric Vázquez) y paralelamente en la de Madrid cristalizan en esta última en

la Tesis Doctoral del ingeniero Juan Gallego Medina (1999). Las inquietudes ambientalistas, que se traducen incluso en disposiciones de la Unión Europea, convergen con poderosos intereses industriales que surgen en este fin de siglo en torno al aprovechamiento de los neumáticos, con lo que después de tramos de ensayo, como los que se realizan en las provincias de Madrid y de Sevilla, se suceden otros muchos por toda la geografía española. Se utilizan, según los casos, las tres variantes de la técnica: la vía húmeda (empleo betunes modificados con caucho procedente de los neumáticos fuera de uso), la vía seca (incorporación de polvo obtenido por la trituración de los neumáticos a la mezcla como parte de los áridos) y la fabricación in situ de un ligante de alta viscosidad con una elevada tasa de polvo de neumáticos.

## 6. Los pavimentos de hormigón

Esta breve reseña sobre la evolución de los pavimentos de las carreteras españolas en el siglo XX ha de finalizar con una referencia especial a los pavimentos de hormigón, cuya singularidad los hace acreedores de este tratamiento diferenciado.

El hormigón se emplea desde finales del siglo XIX en pavimentaciones de diversa índole. Su primera aplicación tiene lugar en algunas calles de ciudades europeas, pasando después a Estados Unidos, donde en 1909 se construye la primera carretera con firme rígido para vehículos automóviles en Wayne County (Michigan). En este país se desarrolla rápidamente la tecnología, con estudios, ensayos de laboratorio y tramos de ensayo a gran escala, al tiempo que la construcción adquiere un notable auge, como prueban los sesientos millones de metros cuadrados existentes ya en 1925. En el continente americano, Chile y Argentina acumulan igualmente durante el siglo XX una larga experiencia y muchas realizaciones. En Europa se emplea mucho en Alemania, Bélgica, Suiza, Gran Bretaña, Francia, etc. Recuérdese, por ejemplo, la construcción acelerada de autopistas en Alemania antes de la Segunda Guerra Mundial, con pavimento de hormigón en un 90 % de su longitud (más de 3.400 km).

Los primeros tramos españoles datan de 1915 y se localizan en Canarias y en la carretera de Barcelona

a Santa Cruz de Calafell. En los años veinte siguen otros tramos en la provincia de Sevilla; ya dentro del repetidamente citado Circuito Nacional de Firmes Especiales se construyeron unos 40 km, en su mayoría en la N-II, en las provincias de Lérida y Barcelona. No hay que olvidar tampoco los hormigones blindados a los que ya se ha aludido más arriba citando a Uriol Salcedo, y que tienen un magnífico comportamiento durante muchísimos años. Sandro Rocci Boccaleri recuerda que a principios de la década de 1980 dirige el refuerzo de un tramo de hormigón blindado en la N-310 (entre Villarrobledo y San Clemente), el cual, tras sesenta años en servicio, soportaba un notable tráfico pesado; el proyecto preveía su levantamiento parcial y su sustitución por un gravacemento, pero estaba tan bien que con un refuerzo de mezclas bituminosas fue suficiente.

En 1963 se construye el tramo de ensayo de la N-II, cerca de Madrid, donde, como se ha referido, se ensayan bajo tráfico pesado pavimentos de hormigón en masa, armado y pretensado de diferentes características. A este tramo siguen obras como la travesía de Manresa (1967), el acceso al Valle de los Caídos y la autopista variante de Torrejón de Ardoz (1968) en la N-II, en la que se emplearon pasadores en las juntas. Este último es el mejor ejemplo de los buenos resultados que se pueden obtener frente a tráfico pesado muy intenso con un pavimento de hormigón cuidadosamente ejecutado. El pavimento de la variante de Torrejón de Ardoz, que apenas es objeto de trabajos de conservación, es rehabilitado por primera vez en 1998, no tanto por su estado, que es bastante satisfactorio, como por aprovechar la necesidad de ampliar la plataforma. Desgraciadamente, después de haberse proyectado esa rehabilitación con un pavimento continuo de hormigón armado, se recurre a las mezclas asfálticas: mezclas de alto módulo de rigidez y sobre ellas una capa de rodadura constituida por un microaglomerado de granulometría discontinua.

A partir de 1971, con la construcción de la autopista Sevilla-Cádiz, los pavimentos de hormigón empiezan a emplearse en España con una cierta continuidad y a gran escala en carreteras. Se adopta la técnica californiana de losas cortas de hormigón vibrado en masa, ejecutadas con pavimentadoras de encofrados deslizantes. De 1973 a 1978 se realizan 216 km en la autopista del Mediterráneo. En 1975 se construye el pavimento continuo de hormigón arma-

do de la autopista Oviedo-Gijón-Avilés (43 km); después de treinta y dos años soportando un tráfico pesado muy intenso su estado estructural sigue siendo satisfactorio.

En los años ochenta se abandona la técnica californiana para los tráfico pesados, y se colocan pasadores en las juntas transversales. Varios tramos de los más de 3500 km de autovías previstos en el Plan General de Carreteras 1984-1991, aparte de otras obras menores, se construyen con pavimentadoras de encofrados deslizantes. Destacan los diversos tramos de las autovías de Aragón, de Levante y de Andalucía. Antes, en los primeros años de la década, se han ejecutado, con resultados no totalmente satisfactorios, pero de los que se obtienen grandes enseñanzas, la variante de la N-301 en Villatobas, bajo la dirección del ingeniero Sandro Rocci Boccaleri, y la segunda calzada en el paso de la N-IV por Despeñaperros, cuyo director es el ingeniero Luis Cánovas del Castillo Fraile.

A principios de la década de los noventa se vuelve a recurrir, bajo la dirección del ingeniero Ignacio García-Arango Cienfuegos-Jovellanos, a la solución de pavimento continuo de hormigón armado en la autopista entre Oviedo y Pola de Siero. Se llega así a que terminando 1995 se totalizan en España más de 1600 km de calzada de dos carriles con pavimento de hormigón.

De los muchos tramos ejecutados en esa época, algunos constituyen referencias inolvidables, como el comprendido entre La Guardia y Madrideojos (provincia de Toledo), en la autovía de Andalucía, dirigido por el citado ingeniero Sandro Rocci Boccaleri y en el cual, por primera vez, se fresa sistemáticamente la superficie acabada, a fin de satisfacer las recién implantadas prescripciones sobre la regularidad superficial de los pavimentos. Ejecutada poco tiempo después, destaca también la variante de la autovía de Extremadura en Talavera de la Reina, donde, bajo la

dirección del ingeniero José Luis Martínez Pombo, se bate el récord de la milla: más de una milla de calzada de dos carriles construida en una sola jornada.

Aparte de la labor de los ingenieros directores de las obras, destaca la que realizan, promoviendo la pavimentación con hormigón y asesorando técnicamente en las obras, los ingenieros Carlos Kraemer Heilperno, desde la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, y Rafael Fernández Sánchez y Carlos Jofré Ibáñez, desde el recién creado Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). A ellos se debe también la promoción de obras esencialmente experimentales en las que se emplean, por ejemplo, hormigones con fibras y hormigones porosos dispuestos en capas de rodadura de reducido espesor. Destaca a este respecto el tramo, dependiente entonces de la Comunidad de Madrid, que constituye el denominado Eje Culebro, en Pinto (Madrid), dirigido por el ingeniero Marino Vissiers, y que una vez cambiado el siglo se integra en la autopista de circunvalación M-50.

A partir del año 1993 la construcción de pavimentos de hormigón se reduce drásticamente en la Red de Carreteras del Estado. Este hecho se mantiene en la práctica en la primera década del siglo XXI, mientras se construyen profusamente pavimentos de hormigón en puertos y en aeropuertos, utilizando las mismas pavimentadoras de encofrados deslizantes que en las autopistas y en las autovías. Aunque algunos opinan que los resultados obtenidos con los pavimentos de hormigón en las autovías no son satisfactorios, y es cierto que en algunos casos ha habido problemas de regularidad superficial y, mucho más raramente, problemas estructurales, los resultados son en general más que aceptables; lo demuestra el hecho de que veinte años después la mayor parte de los tramos siga en servicio, en buen estado y habiendo tenido una mínima conservación, cuando no prácticamente nula. ♦

**Referencias:**

-AGUILÓ, MIGUEL (2004): *Túneles y viaductos para los caminos españoles*, ACS, Madrid.  
 -ANÓNIMO (1951): "El Laboratorio del Transporte en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos", en Publicación núm. 2 del Laboratorio del Transporte, Laboratorio del Transporte, Madrid.

-ANÓNIMO (1969): *Tramo de ensayo de la carretera N-II. Memoria técnica. Experimentación. Características de la superficie de los pavimentos*, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Madrid.  
 -ARBÁIZAR GONZÁLEZ, SUSANA; FONTANALS PÉREZ DE VILLAMIL, ALMUDENA; SÁNCHEZ LÁZARO, TERESA (1993): *El camino de Andalucía. Itinerarios históricos entre la Meseta y el valle del Gua-*

*dalquivir*, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.  
 -AZCOITI AMICHIS, JAIME (1967): "Planeamiento vial en zonas rurales", en Curso de Ingeniería de Tráfico, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Valencia.  
 -BALAGUER CAMPHUIS, ENRIQUE; FERNÁNDEZ DEL CAMPO, JUAN ANTONIO (1972): *Firmes de carreteras* (2 tomos), Servicio de Publicaciones



de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

–BARRA, FRANCISCO JAVIER (1826): *Memoria sobre la construcción del pavimento o firme de los caminos*, Imprenta Real, Madrid (edición de la Asociación Española de la Carretera, 2001, Madrid).

–CALVO SOTELO, JOAQUÍN (coordinador) (1976): *Historia de una autopista (Bilbao-Behobia, 1967-1976)*, Europistas Concesionaria Española, Madrid.

–CALZADA PÉREZ, MIGUEL ÁNGEL (1984): *Desarrollo y normalización del ensayo de pérdida por desgaste aplicado a la caracterización, dosificación y control de mezclas bituminosas de granulometría abierta*, Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander.

–DEL VAL MELÚS, MIGUEL ÁNGEL (1985): Estudio de laboratorio para la caracterización como material de firmes de carreteras de los plásticos procedentes del tratamiento de residuos sólidos urbanos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

–DEL VAL MELÚS, MIGUEL ÁNGEL (1996): “*Contribution à la mise au point d’un nouveau matériau de construction des chaussées: l’enrobé bitumineux à haut module pour couches de base*”, en Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 204, París.

–DEL VAL MELÚS, MIGUEL ÁNGEL; BARDESI ORUECHEVARRÍA, ALBERTO; JOFRÉ IBÁÑEZ, CARLOS, DÍAZ MINGUELA, JESÚS; SOLÍS VILLA, LUIS ALBERTO (1996): *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos*, Junta de Castilla y León, Valladolid.

–DIPUTACIÓN FORAL DE VIZCAYA (1986): *Normas técnicas para las carreteras de Vizcaya (BAT)*, vol. 3: Geología y Geotecnia. Afirmado, Bizkaiko Foru Aldundia, Bilbao.

–DIRECCIÓN GENERAL DE OBRAS PÚBLICAS (1926): *Formularios para la redacción de los proyectos de carreteras aprobados por Real decreto de 30 de marzo de 1903*, Imprenta Palomeque, Madrid.

–DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (1984): *Circular nº 287/84 P.I. (Criterios para la aplicación de las normas 6.1 IC y 6.3 IC)*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

–ESCARIO, JOSÉ LUIS (1951): “*El problema del transporte terrestre en España*”, en Publicación núm. 1 del Laboratorio del Transporte, Laboratorio del Transporte, Madrid.

–ESCARIO, JOSÉ LUIS (1965): “*El tramo de ensayo español. Fines perseguidos*”, en Publicación núm. 18 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

–ESCUELA DE APLICACIÓN DE INGENIEROS Y TRANSMISIONES DEL EJÉRCITO (1953): *Manual de caminos para uso del oficial de Ingenieros*, Estado Mayor Central del Ejército, Madrid.

–FERNÁNDEZ DEL CAMPO, J.A.; FERRAZ, J.; PÉREZ JIMÉNEZ, F. (1973): *Anteproyecto de pista circular de ensayo*, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

–FERNÁNDEZ DEL CAMPO, JUAN ANTONIO (1983): *Pavimentos bituminosos en frío*, Editores Técnicos Asociados, Barcelona.

–FERNÁNDEZ DE MESA, TOMAS MANUEL (1755): *Tratado legal y político de caminos públicos y posadas*, Parte I, José Tomás Lucas, Valencia (edición facsímil de Paris-Valencia, S.L., 1998, Valencia).

–GALLEGO MEDINA, JUAN (1999): *Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos. Estudio de la influencia de las características del caucho y del proceso de fabricación y puesta en obra de la mezcla*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

–GONZALEZ TASCÓN, IGNACIO (2005): *Historia del transporte en España*, Ineco-Tifsa, Madrid.

–KRAEMER, CARLOS (1965): “*Pavimentos de hormigón normal y pretensado. Experiencia española en el tramo de ensayo*”, en Publicación núm. 18 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

–KRAEMER, CARLOS (1970): *Design, Construction and Performance of the Prestressed Concrete Pavements on the National Highway II (Madrid-Barcelona)*, Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Madrid.

–KRAEMER, CARLOS; MARTÍNEZ DE ARAGÓN, ANTONIO (1977): *Análisis de tensiones y deformaciones y estudio de la fatiga de las secciones estructurales de firmes flexibles de la norma 6.1 IC (1975)*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

–KRAEMER, CARLOS; PARDILLO, JOSÉ MARIA; ROCCI, SANDRO; ROMANA, MANUEL G.; SANCHEZ BLANCO, VICTOR; DEL VAL, MIGUEL ÁNGEL (2004): *Ingeniería de carreteras*, Volumen II, McGraw-Hill, Madrid.

–LÓPEZ GARCÍA, MERCEDES; BERNABEU LARENA, JORGE (2005): *50 años construyendo el futuro. Ingeniería e infraestructura en España. 1955-2005*, Constructora Hispánica, Madrid

–MENÉNDEZ MARTÍNEZ, JOSÉ MARÍA; SÁNCHEZ LÁZARO, TERESA; MARCEÑIDO FERRÓN, LUIS (1990): *Evolución histórica de los itinerarios del Noroeste en la Comunidad de Madrid*, Consejería de Política Territorial de la Comunidad de Madrid, Madrid.

–MENÉNDEZ MARTÍNEZ, JOSÉ MARÍA; ARBÁIZAR GONZÁLEZ, SUSANA; FONTANALS PÉREZ DE VILLAMIL, ALMUDENA (sin fecha): *Evolución histórica de los itinerarios del Noreste en la Comunidad de Madrid*, Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1969): *Estudio de tráfico sobre la encuesta y pesaje de camiones en el puerto de Barázar (N-240)* Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1969): *Programa Redía. Itinerario Madrid-Irún CN-I*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1974): *Pruebas de corrección de roderas, realizadas en la CN-I (provincia de Madrid) con maquinaria especial*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1974): *Tercer Cinturón de la Red Arterial de Madrid*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1975): *Norma 6.1 IC. Firmes flexibles*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1976): *Autopista de La Paz*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1977): *Programa del Plan de terminación de transformación de firmes de macadam*, Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1978): *Tratamientos superficiales de alta calidad realizados en la CN-634 (provincia de Oviedo)*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

–MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (1978 y 1979): *Tratamientos superficiales de alta calidad realizados en la CN-II (provincia de Guadalajara)*, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.

–NÁRDIZ ORTIZ, CARLOS (1992): *El territorio y los caminos en Galicia*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

–RODRÍGUEZ LÁZARO, FRANCISCO JAVIER; MENÉNDEZ MARTÍNEZ, JOSÉ MARÍA (2001): *Los caminos de la Comunidad de Madrid. De la Antigüedad a los orígenes de la red radial*, Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes de la Comunidad de Madrid, Madrid.

–ROMERO MONTALVO, EMILIO (coordinador) (1992): *Iberpistas. 25 años. Historia de un gran encuentro*, Ibérica de Autopistas, Madrid

–RUIZ HIDALGO, FRANCISCO (1999): *Análisis de los factores que influyen en la evolución de la permeabilidad de las mezclas bituminosas porosas*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada

–SÁNCHEZ LÁZARO, TERESA; BALAGUER CAMP-HUIS, ENRIQUE; BLANCO VILA, LUIS (1995): *Las carreteras españolas y sus pavimentos en el siglo XX*, Intevia (Grupo ESM), Madrid.

–SÁNCHEZ LÁZARO, TERESA; SANZ MARTÍNEZ, ADOLFO; RODRIGO PÉREZ, MARTA (2000): *Asociación Española de la Carretera. 50 años*, Asociación Española de la Carretera, Madrid.

–URIOL SALCEDO, JOSÉ IGNACIO (1997): “*Las carreteras desde Isabel II a nuestros días*”, en Viaje por la historia de nuestros caminos, Grupo FCC, Madrid.

–VALERO, LUIS (1965): “*Las obras de tierra y los firmes flexibles del tramo de ensayo. Descripción, construcción y experimentación*”, en Publicación núm. 18 del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid.

–VARIOS AUTORES (1966): *Primer cursillo nacional de mezclas bituminosas, fabricación y puesta en obra*, Asociación Española de la Carretera, Madrid.

–VARIOS AUTORES (1971): *Coloquio nacional sobre cargas de vehículos*, Asociación Española de la Carretera, Madrid.