

LA SUPERESTRUCTURA DE VÍA EN PLACA EN LAS NUEVAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD DE NUESTRO PAÍS

Joan Manuel Estradé Panadés.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Unidad de Negocio de Mantenimiento de Infraestructura. RENFE.

RESUMEN

La superestructura de vía en placa se ha utilizado de forma generalizada en las líneas japonesas de alta velocidad. La reciente decisión alemana de instalar este tipo de vía en todas sus nuevas líneas de alta velocidad, ha puesto de actualidad sus aplicación en el resto de Europa.

En el presente artículo planteamos su instalación en las nuevas líneas españolas de alta velocidad (Madrid-Barcelona-La Jonquera, "Y" Vasca y Madrid-Valladolid).

Para ello partimos de la situación actual de los principales países europeos. Analizamos la problemática de la vía en placa y los límites que podrían condicionar su utilización generalizada, reflexionando especialmente sobre su rentabilidad. Finalmente, definimos las situaciones en las que resulta aconsejable su utilización en las nuevas líneas a construir en nuestro país.

ABSTRACT

Slab-track superstructure is standard practice in the high-speed lines of Japan. The recent decision of the German Federal Railways to instal this type of track in all their high-speed lines has aroused interest in its adoption in the other countries of Europe. This article considers its posible introduction in the Spanish high-speed lines (Madrid-Barcelona- La Junquera, the Basque Country "Y" and Madrid-Valladolid). A review is made of the present situation in the most important countries of Europe. The complexities of the slab-track system are examined and the possible limitations for its general adoption, particularly with regard to its cost-effectiveness. Finally a specification is made of the conditions in which it would be advantageous in the new lines to be constructed in Spain.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
abril de 1998.

Recibido en ROP:
marzo de 1997

Se plantea la posible aplicación de la vía en placa como solución complementaria o alternativa de la vía tradicional con balasto, en las nuevas líneas de alta velocidad a construir próximamente en nuestro país. Se analizan los factores que pueden limitar la toma de una decisión global al respecto.

1. INTRODUCCIÓN

La introducción de un nuevo concepto de superestructura de vía surgió básicamente a partir de la dificultad de poder mantener la calidad geométrica de la vía con balasto en los túneles y en las líneas de alta velocidad.

Así, ya en 1924 se sustituyeron las traviesas y el balasto en un túnel de Japón por unos bloques de madera monolitizados con hormigón hidráulico, formando un basamento bajo cada carril, para evitar los problemas del flujo de agua que impedían mantener unos niveles de confort de marcha mínimamente óptimos. A su vez, la puesta en servicio de la línea Tokaido de alta velocidad a 210 km/h en 1964, puso de manifiesto que su su-

perestructura de vía no podía garantizar el mantenimiento de su calidad geométrica, con la tecnología de conservación aplicada entonces.

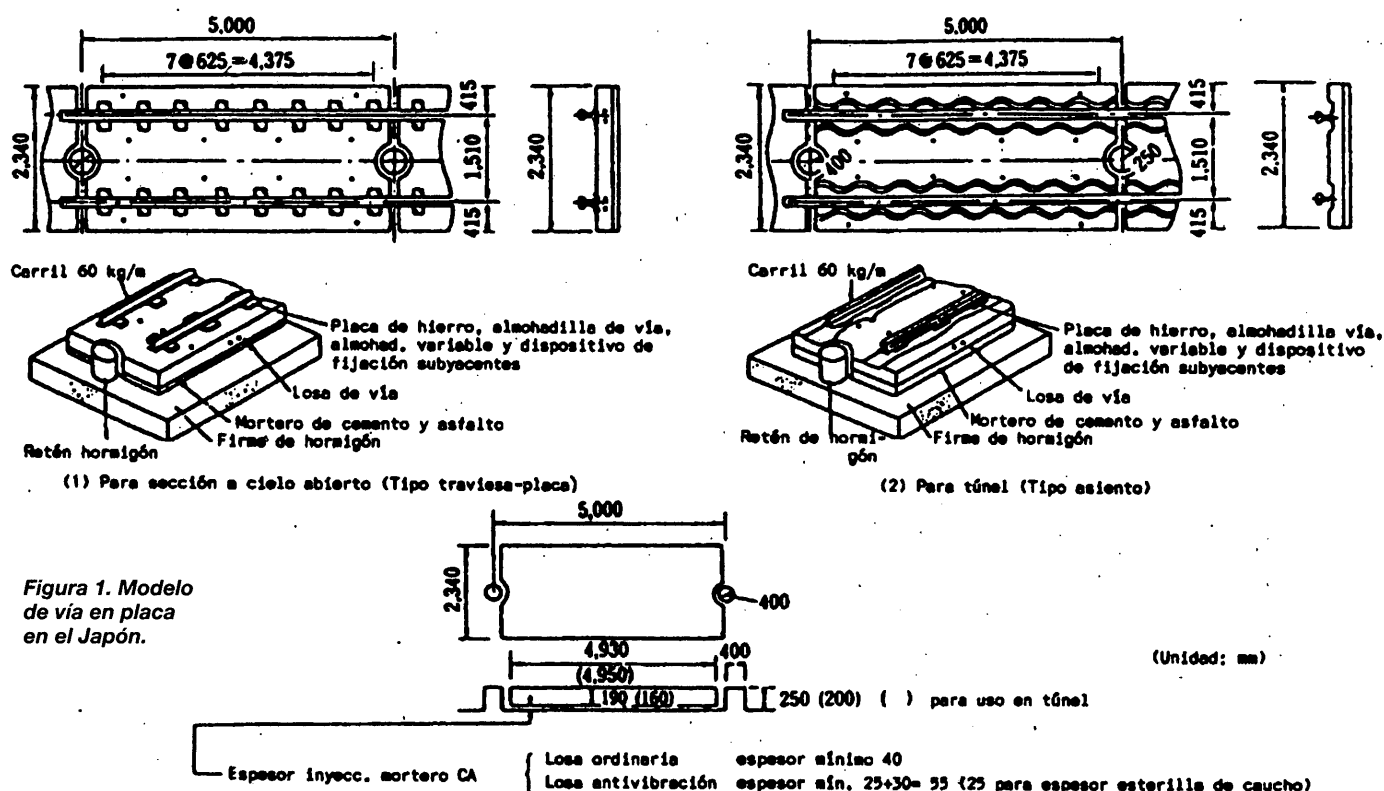
Ambas circunstancias llevaron a la convicción de que sería necesario disponer de un nuevo tipo de superestructura de vía que se pudiera aplicar con mayor éxito a esos dos casos. En consecuencia, a partir de la década de los años setenta se proyectaron y desarrollaron diferentes soluciones de vía en placa que, sobre la base de sustituir el balasto, ofrecieran al menos el mismo comportamiento dinámico y una necesidad muy inferior de mantenimiento.

No obstante, el desarrollo posterior de una vía mejorada con balasto y de la maquinaria de su mantenimiento mecanizado de altas prestaciones, anuló la justificación de instalar un sistema rígido alternativo más costoso de construcción. Por ese motivo, no se aplicó la solución de vía en placa en las líneas de alta velocidad que entraron en servicio en los años ochenta, con la sola excepción de Japón.

Cada vez es mayor el porcentaje de túneles de las nuevas líneas de alta velocidad. Asimismo, son mayores sus condiciones de definición en planta y de sección transversal, e im-

Tabla 1. Parámetros comparativos de la vía en placa con relación a la superestructura con balasto.

PARÁMETROS	VÍA EN PLACA	VÍA CON BALASTO
Supresión de cargas.	Buena absorción de esfuerzos sobre el carril.	Limitada estabilidad transversal.
Parámetros del trazado.	Permite radios de curvatura menores. Mejor adaptación al terreno.	Posibilita modificaciones en la geometría de la vía (reparación de asientos).
Altura del plano de la vía.	Sección menor de los túneles (-10 m2).	Ocupa mayor espesor de sección transversal.
Comportamiento de marcha de los vehículos.	Comportamiento garantizado para $v < 300 \text{ km/h}$.	Escasa incidencia por las variaciones de la rigidez de la plataforma.
Freno por corrientes de Foucault.	Esfuerzos acotados por el incremento de la temperatura del carril.	Problema de absorción de los esfuerzos originados.
Emisiones sonoras.	Requiere la colocación de material absorbente.	Buena amortiguación acústica, corpórea y aérea.
Proyecciones de balasto.	Quedan descartadas.	Se pueden producir especialmente a alta velocidad.
Mantenimiento periódico.	Poco mantenimiento y largo periodo de vida útil.	Procedimientos acreditados de mantenimiento.
Disponibilidad.	Muy alta.	Intervalos de bloqueo poco prolongados para su renovación - conservación.
Rentabilidad.	Costes de instalación importantes si no se mejora la mecanización de su montaje.	Costes de instalación inferiores a los de la vía en placa (la mitad).



pacto ambiental. Estas circunstancias, junto con la experiencia positiva obtenida en las líneas japonesas de alta velocidad, han hecho que se retomara con gran interés la posibilidad de aplicar la tecnología de vía en placa, en las nuevas líneas que se van a construir en Europa.

En el presente artículo trataremos de justificar técnica y económicamente ese cambio de actitud. Para ello y a modo de resumen, se presenta en la tabla 1 un resumen de las ventajas e inconvenientes de cada tipo de superestructura.

Tabla 2. Extensión de la vía en placa y sobre balasto en las líneas de alta velocidad en Japón.

SUPERESTRUCTURA	TOKAIDO	SANYO	TOHOKU	JOETSU	NUEVAS LÍNEAS (+)
LONGITUD (KM)	518	560	492	269	1.440
TRAMOS EN TÚNEL (%)	13	50	23	39	56
PUENTES Y VIADUCTOS	34	38	71	60	32
TRINCHERA/TERRAPLÉN	53	12	5	1	12
TRAMOS CON BALASTO	100	50	10	5	0
VÍA EN PLACA	0	50	82	91	100
VÍA DANCHOKU (*)	0	0	8	4	0

(+) Nuevos tramos del Tohoku, Hokkaido, Hokuriku y Kyushu.

(*) Vía con traviesa elástica en artesa de hormigón.

2. SITUACIÓN ACTUAL EN LOS PAÍSES DEL "CLUB" DE LA ALTA VELOCIDAD

Vamos a centrar la exposición en las soluciones diseñadas o aplicadas hasta el momento en las líneas de alta velocidad de Japón, Italia, Alemania, Francia y España. Si bien existen otras diferentes soluciones experimentadas ya en tramos convencionales, éstas van a ser simplemente nombradas sin entrar al detalle, por no estar garantizada su aplicación inmediata en las fu-

turas líneas de alta velocidad a construir próximamente.

JAPÓN

Han transcurrido veinticinco años desde que se instaló la primera vía en placa en una línea de alta velocidad. Actualmente se encuentra tendida en más de 2.400 km, incluido el túnel de Seikan bajo el mar y los puentes Honshu-Shikoku sobre el mar. En la tabla

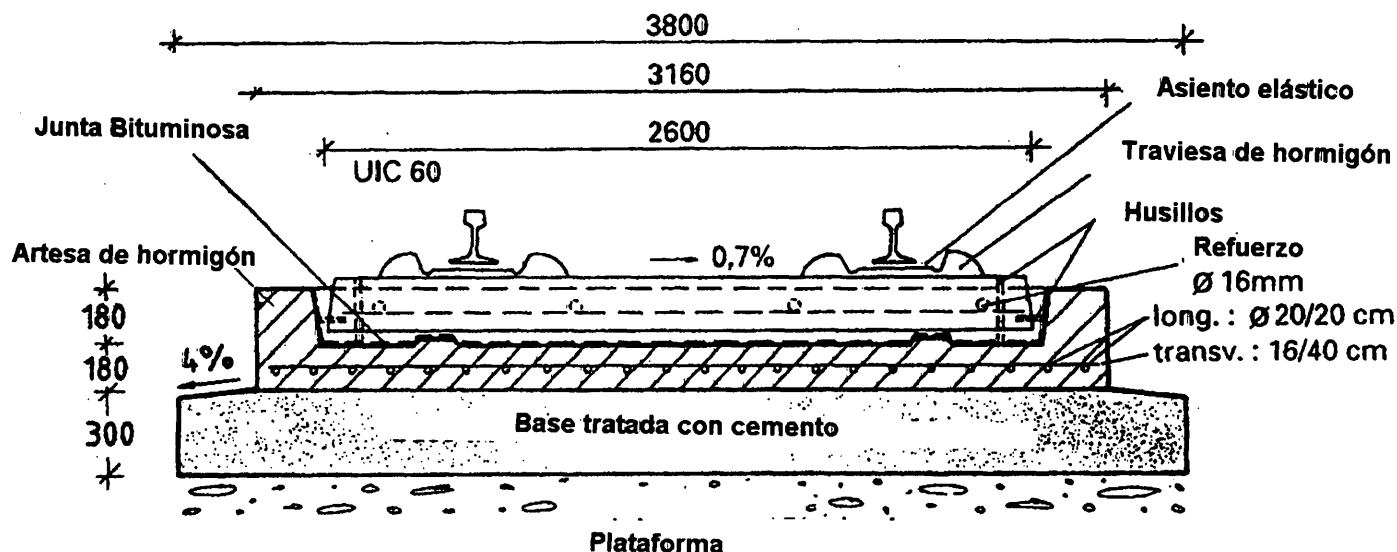


Figura 2. Vía en placa sistema Rheda directamente sobre la explanación.

2 se presenta un resumen de la extensión de la vía en placa en el Shinkansen.

Básicamente la vía en placa consiste en losas de hormigón prefabricadas colocadas sobre una capa de mortero de cemento y asfalto. En la losa de hormigón de cimentación se le ha colocado un retén de hormigón cilíndrico para impedir desplazamientos tanto longitudinales como transversales de la vía en placa. El dispositivo de sujeción es de doble elasticidad, como el que utilizan para las traviesas de hormigón pretensado en vía sobre balasto [1] (figura 1).

Como puede apreciarse, la aplicación de la solución de vía en placa se ha ido generalizando, llegando a ser del 100% en sus nuevos proyectos de líneas de alta velocidad. Asimismo, de la tabla 2 se desprende que el número de obras de fábrica (túneles, puentes y viaductos) en las líneas Shinkansen ha ido creciendo, en la misma medida que la aplicación de esta solución de superestructura de vía.

De cara a poder reducir los costes de construcción de la vía en placa, se ha proyectado un nuevo diseño en forma de marco para la futura línea del Hokuriku (594 km) [2]. El objetivo de los Ferrocarriles Japoneses es disponer de una superestructura de vía tecnológicamente económica y estable, capaz de ofrecer una circulación a velocidad comercial de 400 km/h por rampas del 1% y máxima de 450 km/h, a principios del siglo XXI [3].

ITALIA

Los Ferrocarriles Italianos adoptaron una solución de vía en placa redimensionada a partir de la vía en placa japonesa. Partiendo de esa base diseñaron un sistema adaptado a la realidad de la explotación ferroviaria de ese país.

En 1989 construyeron un tramo de vía doble de 7 km entre las estaciones Gemona del Friuli-Carnia, línea Udine-Tarvisio de

230 km/h, con gran cantidad de obras de fábrica. Si bien esta línea no es de alta velocidad, es la primera experiencia europea de vía en placa directamente sobre la explanación en una línea de velocidad superior a 200 km/h. El comportamiento de la vía en placa ha sido satisfactorio hasta la fecha, gracias a la magnífica respuesta del subsuelo o basamento [4].

ALEMANIA

Éste es el país que más ha apostado por la investigación de la superestructura de vía en placa (desde que se instaló en 1972 en la estación de Rheda). En estos momentos se encuentran en fase de homologación unos veinticinco modelos constructivos diferentes [5]. De todos esos prototipos, han sido sólo dos los que se han instalado en tramos de alta velocidad:

Modelo Rheda

Una vez construida la cimentación en forma de artesas mediante un sistema de encofrado deslizante, se introducen en ella las parejas de carriles con sus traviesas y sujeciones. El posicionado vertical se realiza mediante husillos y el transversal, mediante los tornillos situados en los extremos de las traviesas que apoyan contra los rebordes laterales de la artesa.

Este modelo se instaló en los túneles de Einmalberg y Mühlberg, con un total de 9,4 km, de la línea de alta velocidad Würzburg-Fulda y en el túnel de Sengeberg con una longitud de 5,6 km entre Fulda-Kassel. Por esta línea circuló la rama experimental del ICE a 406 km/h, sin sufrir daños y ofreciendo un funcionamiento normal. A mediados de 1994 se colocó en un tramo de vía doble de 8,3 km, en el trayecto Breddin-Glößen de la

Figura 3. Prototipo de la solución francesa de la vía en placa para alta velocidad.

línea Berlín-Hamburgo acondicionada a 200 km/h, para su posible generalización en sus futuras líneas de alta velocidad [6] (figura 2).

Modelo Züblin

El principio constructivo es similar al anterior. Sin embargo, en éste el hormigón no se introduce entre las traviesas del entramado de vía perfectamente tendido, sino que las traviesas se empotran en el hormigón fresco de una losa construida "in situ". Éstas se introducen a presión, y vibrando el hormigón fresco se pueden ajustar en altura. Entre traviesas se coloca un elemento que absorba el ruido.

Se ha instalado un tramo piloto de 5,5 km en el túnel de Markstein de la línea de alta velocidad Mannheim-Stuttgart. En 1994 se colocó un tramo de doble vía de 6 km de longitud en el trayecto Wittenberge-Dergenthin de la línea Berlín-Hamburgo.

Otros modelos

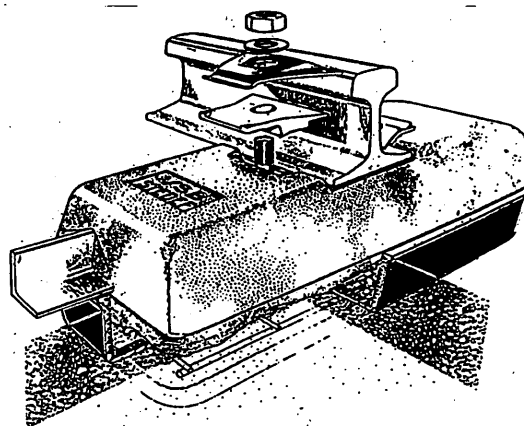
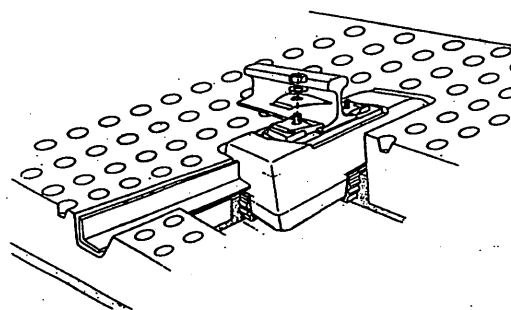
El resto de los prototipos no ha sido instalado todavía en una línea de alta velocidad, con la excepción de dos que se han colocado en tramos acondicionados a 200 km/h [7]:

- El modelo BTD consiste en la instalación de un entramado de vía (carril, sujeción y traviesa) directamente sobre una losa de hormigón armado. Una brida elástica en el centro de la traviesa se une a un patín de fijación que encaja en la losa de cimentación. La ventaja de este sistema radica en la facilidad de su reparación. Se ha instalado una sección de 1 km en el trayecto colateral al Glöwen-Breddin de la línea Berlín-Hamburgo.
- El modelo FFYS de traviesas de acero en forma de "Y" sobre una capa de asfalto, se instaló en 1990 en Lagenfeld de la línea Colonia-Düsseldorf de 200 km/h, sobre 1,6 km. Dado su éxito, en 1995 se han instalado 15 km de vía doble en el tramo Bitterfeld-Hohenthurm, línea Berlín-Halle.

Recientemente, se ha tomado la decisión de emplear la vía en placa en todas las nuevas líneas de alta velocidad de los Ferrocarriles alemanes (DB AG). Así, la nueva línea Colonia-Frankfurt de 130 km se construirá en su totalidad con vía en placa.

FRANCIA

Ante la perspectiva de un mayor número de obras de fábrica en sus futuras líneas, los Ferrocarriles Franceses (SCNF) iniciaron en 1994 un estudio para adaptar su técnica de vía en placa tradicional a las especificaciones de las líneas TGV. Sin embargo, se ha dado por buena su solución tradicional para líneas de velocidad menor a 230 km/h.



Su vía en placa es un sistema que permite, mediante dos elasticidades apropiadas y una masa intermedia, limitar las sollicitaciones sobre el soporte (losa de cimentación). Está constituida por traviesas bloque de hormigón armado sobre una almohadilla elástica. Su parte inferior y su almohadilla están envueltas por una camisa de caucho.

La nueva solución se basa en la mejora de la elasticidad del sistema carril-sujeción, mediante su colocación indirecta sobre la traviesa bloque. Para ello se instala una placa especial, que se apoya sobre salientes laterales inclinados respecto al eje del carril. En su intradós se coloca una almohadilla de poliamida [8] (figura 3).

Se ha realizado una serie de ensayos de laboratorio sobre el nuevo sistema de sujeción, conforme a las recomendaciones del comité D 170 del ERRI. Se ha instalado un tramo experimental en el túnel de Villecresnes para validarla a 350 km/h.

ESPAÑA

Nuestra experiencia sobre la aplicación de la tecnología de vía en placa se centra en la red convencional. Así, en 1974 se instaló un tramo experimental de 4,1 km del modelo denominado PACT (Paved Concrete Track) de los Ferrocarriles Británicos, en el trayecto Ricla-Calatorao de la línea Madrid-Barcelona.

na. No obstante, por problemas surgidos en su mantenimiento fue levantado en 1992.

No obstante, cabe destacar que fueron precisamente investigadores españoles los primeros que aplicaron el cálculo numérico basado en el método de elementos finitos para la optimización, desde el punto de vista resistente, de la vía en placa [9]. Sin embargo, sus investigaciones no tuvieron continuidad, hasta el diseño de vía en placa por los investigadores italianos en 1988 [4].

RENFE ha instalado otros tramos con la solución francesa en diversos túneles, trayectos de cercanías y estaciones, así como una solución de carril embebido en estaciones. Las otras empresas ferroviarias también las han aplicado con éxito en túneles, estaciones y puentes.

La única línea de alta velocidad construida, de 471 km de longitud entre Madrid-Sevilla, no dispone de ningún tramo de vía en placa. Si bien es cierto que dicha línea presenta 17 túneles con una longitud total de 16 km, con el denominado "Piedra de la Sal" en Sierra Morena de 2,6 km, se tomó la decisión de no incluir ningún tramo, básicamente por dos motivos: por una parte, el reducido plazo de tiempo transcurrido entre su planificación y su construcción y por otra, el que en aquel momento no existía en Europa ningún prototipo que ofreciera suficientes garantías.

3. SITUACIONES LÍMITE DE LA SOLUCIÓN DE VÍA EN PLACA

Tras más de treinta años de investigaciones y trabajos para su desarrollo, se ha conseguido un elevado grado de conocimiento y alto nivel de experiencia en todo lo que se relaciona con la vía en placa. Así, se han obtenido diferentes modelos optimizados, con una logística unificada y racional para el montaje, una tecnología precisa en cuanto a su reparación y con soluciones coherentes sobre los repuestos de sus elementos constituyentes. Sin embargo, a continuación haremos un repaso de las situaciones más conflictivas que se pueden dar en la vía en placa:

INSTALACIÓN

Cuando la vía sobre balasto no ha quedado en su posición correcta o bien, cuando por efecto de las cargas y empujes laterales del tráfico se ha asentado o desplazado, puede ser objeto de un rectificado en planta y alzado. La actual maquinaria pesada actúa sobre la vía bateándola, alineándola y compactándola con facilidad y bajo coste.

Sin embargo, la vía en placa no se puede posicionar inicialmente de forma aproximada, para después proceder a un afinado con ayuda de maquinaria adecuada. La vía en placa debe tenderse con precisión milimétrica. Este hecho exige un alto

grado de exactitud, no sólo en la técnica de tendido de vía, sino también en la de replanteo.

Sus elementos tienen que tenderse y fijarse exactamente de forma inamovible frente a los puntos de referencia del replanteo. Al final de este proceso debe garantizarse un margen de exactitud entre puntos de referencia colaterales. Para ello, los métodos topográficos clásicos deben complementarse con sistemas de medición, ideados específicamente para poder alcanzar el alto grado de precisión que exige la alta velocidad. Resulta imprescindible la utilización de aparatos con tecnología láser [10].

A pesar de todas esas dificultades, podemos afirmar que en la actualidad existe una tecnología topográfica suficientemente desarrollada para poder garantizar la precisión requerida en la colocación de la vía en placa.

COLOCACIÓN DIRECTA SOBRE LA EXPLANACIÓN

La vía en placa tiene como elemento característico una placa portante de gran rigidez a la flexión y elevada resistencia transversal. Es una estructura sensible a los asentos. Por tanto, los requisitos de la infraestructura están determinados por la posibilidad escasa de regulación de la geometría de la vía posterior al montaje.

En contraposición a la superestructura con balasto, la vía en placa exige unas medidas especiales para su drenaje. Así, en los trayectos de doble vía es necesario un drenaje central. A su vez, éste debe ser superficial en vez del profundo de la superestructura con balasto. El agua no debe penetrar directamente en la capa de saneamiento anticongelante del borde de la vía.

En todos los casos es necesaria una cuidada y detallada realización previa de auscultaciones de la infraestructura. En determinadas condiciones geotécnicas (zonas de alto riesgo de deformación o en asentos no compensables) es aconsejable evitar la solución de vía en placa colocada directamente sobre la explanación.

Según el estado actual de conocimientos geotécnicos, puede afirmarse que las exigencias para trayectos de alta velocidad con superestructura de balasto, también son adecuadas para recibir vía en placa [11].

PUENTES Y VIADUCTOS. ZONAS DE TRANSICIÓN

La instalación de una vía en placa en un puente requiere su descomposición en placas individuales separadas. Puede ser prefabricada o mediante una losa realizada "in situ". Las placas libremente apoyadas se ven sometidas a momentos positivos y negativos bajo las cargas del tráfico, a causa de las variaciones de temperatura entre sus partes superior e inferior: tienden a abombarse. Asimismo, ya que las placas están separadas de su infraestructura por una junta, se ha de colocar entre la placa y la solera del puente un dispositivo de anclaje.

Los elementos de la vía en placa sobre los puentes deben dimensionarse para todos los esfuerzos de una vía sobre balasto, teniendo en cuenta sus posibles gradientes de temperatura en la losa y su posición sobre placas de apoyo elásticas. Además, deben tenerse en cuenta la deformación del puente con el tiempo, la resultante de corrimientos, dilataciones y contracciones. Estos condicionantes determinan que el diseño de la vía en placa debe concretarse para cada caso concreto [12]. No obstante, las deformaciones de los puentes, en los que influye decisivamente la luz entre apoyos, no plantean problemas en la vía en placa para pequeñas luces.

Otro aspecto de extraordinaria importancia es la transición entre un puente o túnel y la vía en placa sobre el suelo, o entre una vía en placa y una vía sobre balasto. Hay que tender hacia una suficiente longitud de la zona de transición con un terreno suelto, o a un basamento que tenga escasa deformación. Por lo que respecta a pasos inferiores, es necesaria la instalación de capas intermedias entre el hormigón de la obra de fábrica y la losa soporte de la vía.

La solución óptima combina varias opciones: prolongar la solera del puente como losa de cimentación en la zona de transición sobre el suelo, o su sustitución por una cuña de gravacemento o geotextiles, y calidades adicionales al relleno y compactado de las tierras del trasdós de los estribos en una determinada longitud. Cuando se enlaza la vía en placa con vía sobre balasto, se colocan contracarriles interiores y exteriores en la superestructura de vía sobre balasto y se emplean traviesas de mayor superficie para incrementar su rigidez.

DESVÍOS

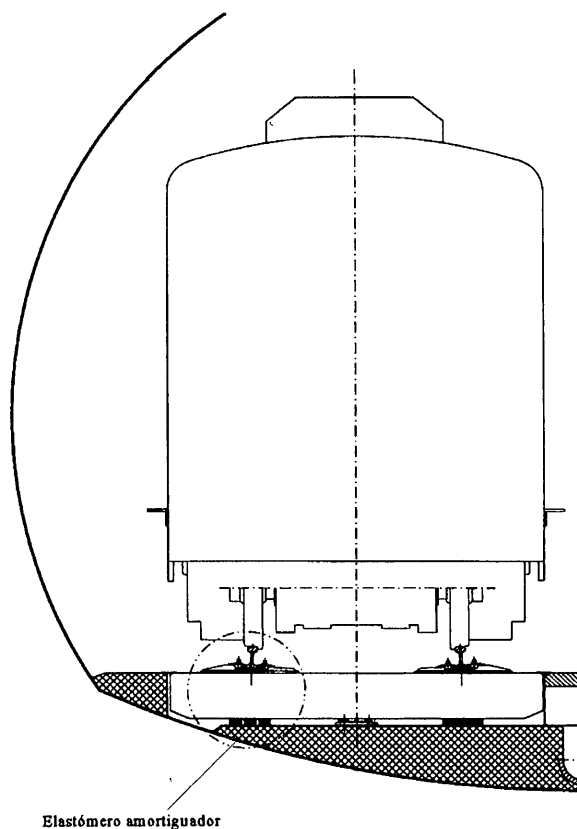
En los últimos años se han desarrollado en Europa soluciones satisfactorias de desvíos en vía en placa. Los problemas se centraron fundamentalmente en adecuar la sujeción elástica de los carriles y los modelos de traviesas a esa tipología de vía.

Las funciones de la sujeción en un desvío exigen la introducción de placas nervadas y, en consecuencia, los elementos elásticos de la sujeción se disponen entre la placa nervada y la traviesa. Es necesaria una sujeción indirecta y que el elemento elástico no esté entre el carril y la traviesa, sino entre la placa y la traviesa.

El modelo de traviesas de hormigón empleado en los desvíos presenta los siguientes elementos: nervios en su cara inferior para evitar desplazamientos, dispositivos para ajustar su cota, traviesas largas divididas en partes y placas nervadas con asiento de gran elasticidad.

Con esta tecnología, la alineación del cambio mediante alineadora se puede realizar antes de la soldadura, y el cambio puede ser soldado por completo antes de su puesta en obra [13]. Existen soluciones optimizadas para los desvíos sobre vía en placa, tanto sobre capa soporte de hormigón como de asfal-

Figura 4. Vía en placa flotante para reducir las emisiones sonoras hacia las edificaciones próximas.



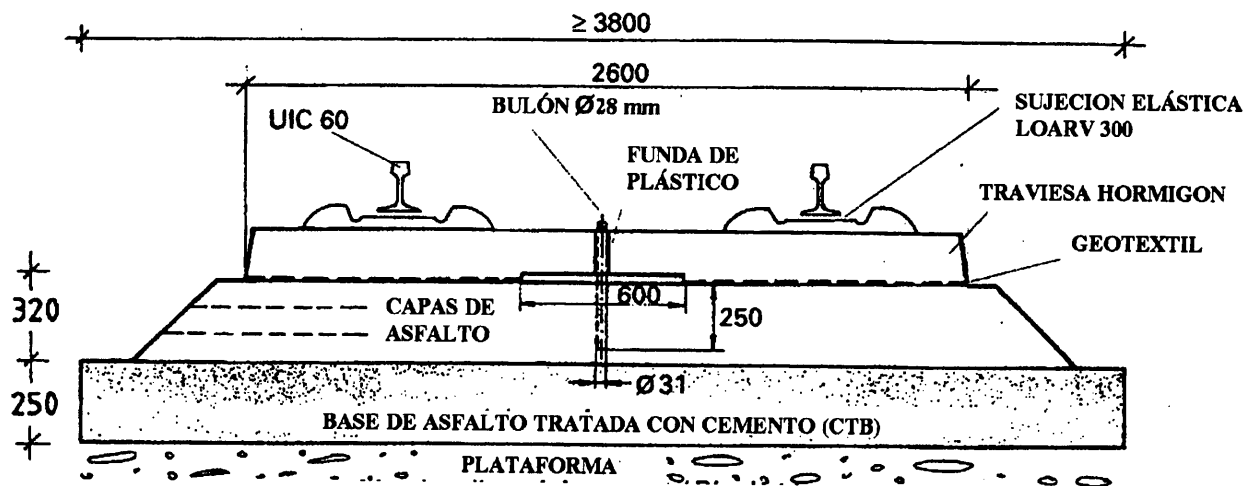
to. Sobre placa soporte de asfalto, ésta se tiende en dos capas sucesivas.

RUIDO Y VIBRACIONES

Los primeros ensayos en el Sanyo Shinkansen probaron que el nivel de ruido de la vía en placa era de unos 5 dB(A) más alto que en la vía sobre balasto. En consecuencia, desde 1970 se analizaron en Japón diferentes tipos de vía en placa que mejoraran la respuesta frente al ruido. Para ello se aumentó la elasticidad del material soporte de la placa de hormigón. Se han experimentado varios sistemas de superestructura de vía antiruido, como el concepto Danchoku (vía con traviesas flexibles sobre plataforma rígida de hormigón), vía sobre balasto con traviesas flexibles, y vía en placa antivibraciones de hormigón pretensado.

Se han analizado diez tipos de materiales de amortiguamiento acústico. De ellos se han elegido tres: material inorgánico, cerámica y hormigón poroso. También se ha considerado la aspersión de balasto. Éste presenta excelentes cualidades de amortiguamiento acústico para una amplia gama de frecuencias.

La reducción del nivel de ruido ha llegado a ser de 8 dB(A) en la vía en placa de la sección Kitakami del Tohoku, en comparación con la inicial del Sanyo. Teniendo en cuenta que la li-



VARIANTES DE LAS CAPAS SOPORTE

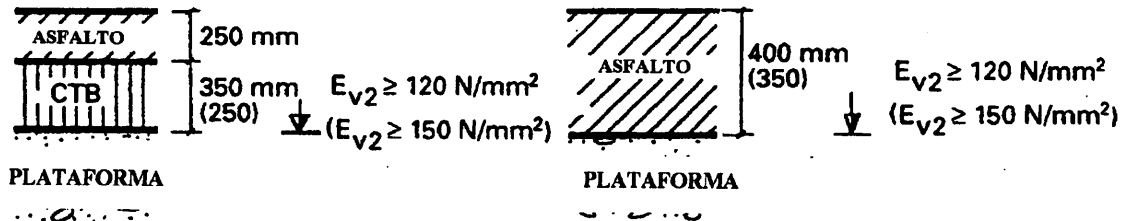


Figura 5. Vía en placa apoyada directamente por medio de un material elastoplástico sobre una placa soporte de hormigón o asfalto encima de la explanación.

mitación del ruido ambiental es de 70 dB(A) a 300 km/h, la mejora conseguida no es nada despreciable [3 y 14].

Ensayos realizados en Alemania con la vía tipo Rheda, comprobaron la elevación del nivel de ruido sobre el emitido por una vía tradicional. Ésta era del orden de 4 dB(A) para velocidades entre 120 y 280 km/h. En los años setenta, se investigaron unas variantes de recubrimientos absorbentes (tapiz de recortes de caucho de neumáticos viejos y placas pétreas de toba de lava) que ya obtuvieron una reducción de 4 dB(A) a 2 dB(A). Sin embargo, los trabajos de optimización no se iniciaron hasta 1993 con el estudio de nueve variantes. De éstas se eligieron dos para su instalación experimental en un tramo de la línea Hamburgo-Berlín, obteniéndose una reducción en el nivel de ruido de 6 dB(A): recubrimiento de granulado de neumático viejo unido con materia plástica y colocado sobre gravilla fina, y recubrimiento de hormigón celular.

No obstante, los últimos modelos aplicados en el análisis del nivel sonoro de las cajas de grasa en la vía o del ruido de rodadura, han demostrado las ventajas de la vía en placa, respecto al nivel sonoro en el interior de los vehículos. Dada la alta rigidez de la superestructura de vía con balasto en las nuevas líneas de alta velocidad, la vía en placa ofrece indudables ventajas por la menor frecuencia de la resonancia rueda-carril. Por contrapartida, presenta claros inconvenientes en la banda de altas frecuencias [15].

La medida más eficaz para reducir la transmisión de vibraciones del suelo hacia una estructura cercana, consiste en aislar la vía utilizando una vía sobre placa flotante [16] (figura 4). Al respecto, hay ya 25 años de experiencias positivas con este sistema en las líneas subterráneas metropolitanas, lo que garantiza su aplicación en el futuro [17].

ELECTRIFICACIÓN Y SEÑALIZACIÓN

Desde la óptica de la señalización se exige una elevada resistencia del lecho existente entre los dos carriles. Esto se obtiene empleando placas intermedias aislantes bajo el carril y placas guías angulares de plástico en la sujeción. No obstante, para llevar gran parte de la corriente de retorno por el terreno, es necesario una resistencia muy baja a la propagación o una elevada derivación del carril a tierra. Estas exigencias opuestas han de ser ajustadas al máximo en el tráfico a alta velocidad y en la superestructura de vía en placa [18].

Al contrario de lo que ocurre con la vía sobre balasto, en la vía en placa tienen que dejarse los espacios libres de antemano, para la instalación de los dispositivos y equipos de señalización. Antes de iniciarse la obra, el proyecto de señalización tiene que estar completamente acabado.

MANTENIMIENTO Y RENOVACIÓN

La vía en placa empleada inicialmente en el Sanyo Shinkansen presentó una serie de problemas que se trataron de resolver en el Tohoku Shinkansen: emisión de ruido, resistencia del mortero de unión a las heladas, agrietamiento superficial de las losas, aflojado de la sujeción y daños en los retenes de hormigón de los extremos de los puentes o junto a aparatos de dilatación.

A pesar de esas mejoras en las líneas del Tohoku y del Joetsu Shinkansen, han seguido apareciendo diferentes problemas de mantenimiento [2]: daños en el mortero de cemento y asfalto de los retenes de hormigón próximos a las juntas de dilatación, grietas en la superficie de la losa, alabeo de su sección transversal y defectos de nivelación longitudinal por abombamiento de la placa en los túneles.

En Alemania la experiencia con este sistema de vía sobre placas prefabricadas corrobora los datos anteriores. Se ha conseguido mejorar la fluidez y la estabilidad del mortero de relleno. Debido a su elevado coste, sólo se plantea su utilización en casos especiales, como puentes de gran longitud. Puntos conflictivos son la durabilidad y la fuerza adhesiva entre la placa prefabricada y la subbase en la que descansa el mortero de relleno [19], y su nivelación [20].

El modelo Rheda ha presentado problemas de calidad de ancho de vía. Puede repararse y renovarse, mediante la disposición de juntas simuladas, con un coste razonable de tiempo. El modelo Züblin ha presentado problemas en la evolución de la alineación y nivelación longitudinal, debido básicamente a su especial sistema de tendido. También, se han formado grietas en la placa.

Existen otros modelos de vía apoyada directamente por medio de una delgada capa de material elastoplástico sobre una placa soporte de hormigón o asfalto [21] (figura 5). Éstos ofrecen poca experiencia debido a su reciente diseño y colocación. Su gran ventaja radica en su facilidad de montaje, reparación y renovación. Puntos críticos son el sistema de fijación de las traviesas a la capa soporte, la posible rotura del bulón de anclaje, la formación de grietas en la placa, y su deformación plástica si es de asfalto [7]. Asimismo, debido a las irregularidades inevitables en la superficie de la placa soporte, son necesarias correcciones de nivelación en determinados puntos durante el montaje, actuando sobre la sujeción del carril. Esta circunstancia no se presenta en los modelos monolíticos anteriores [19].

Una de las ventajas de la utilización de material bituminoso es su fácil reparación y reconstrucción en caso de descarrilamiento, ya que el asfalto puede reelaborarse rápidamente con el tipo usual de maquinaria empleada en carreteras. No obstante, el asfalto para vía en placa debe cumplir unos requisitos más exigentes que el empleado en carreteras, ya que su vida útil debe ser de 60 años. Ello se consigue con una mezcla bien compacta, rica en aglomerante [22].

No se dispone de experiencia con la solución de traviesas sobre cazoletas de caucho, en líneas de alta velocidad. Ésta ha sido empleada por varios países europeos en líneas convencionales, especialmente en túneles e infraestructuras metropolitanas subterráneas. Ha sido la solución escogida para el túnel del Canal. Cuando se ha instalado directamente sobre la explanación, ha presentado problemas a causa de la penetración del agua en el interior de las cazoletas, y su congelación en situaciones de intenso frío [20].

4. ANALISIS ECONÓMICO DE RENTABILIDAD DE LA VÍA EN PLACA

En el análisis económico comparativo entre la vía en placa y la vía sobre balasto son decisivos los costes de instalación. Éstos son superiores para cualquier solución de vía en placa que se aplique. Con carácter orientativo, podemos tomar un valor de coste medio entre un 30 y 40%

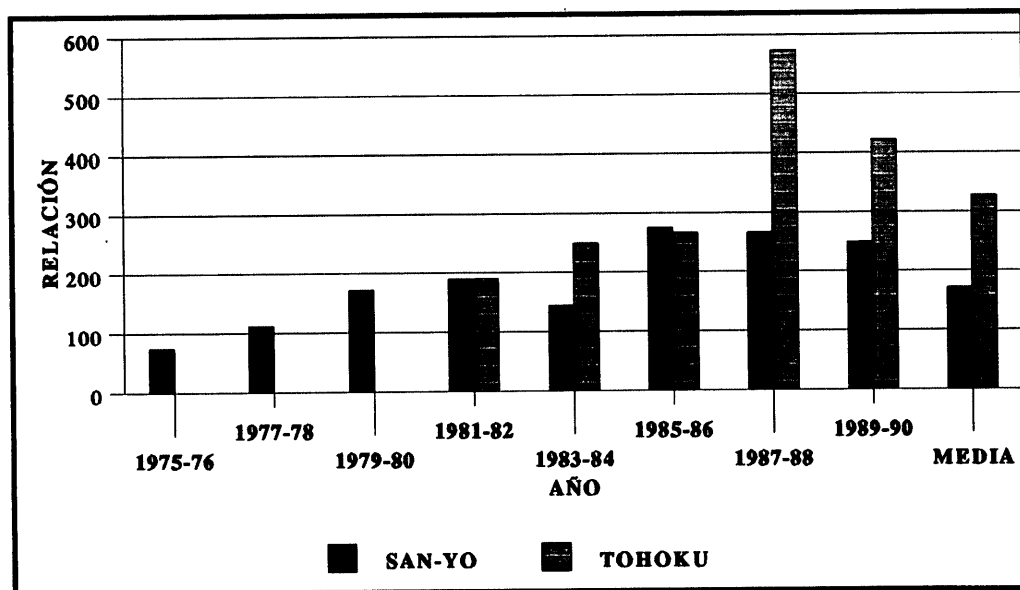


Figura 6. Relación de los costes de mantenimiento de la vía en placa y la vía sobre balasto en las líneas Shinkansen.

Tabla 3. Estudio comparativo en la línea Colonia-Rhein/Main.

- * Vía con balasto tipo UIC60 B70 W60 (carril UIC60 de 900 N/mm², traviesas de hormigón pretensado de 2,60 m de largo, sujetos elásticos tipo W, espesor de balasto de 300 mm de espesor y distancia entre traviesas de 600 mm).
- * Vía con balasto tipo UIC60 B75a W60 (traviesas de hormigón pretensado de 2,80 m de largo) y tipo UIC60 B75a W63 (distancia entre traviesas de 630 mm).
- * Vía en placa tipo Rheda (espacio entre traviesas de 600 y 630 mm).

Costes anuales por kilómetro de vía en placa / vía con balasto tipo UIC60 B70 W60:			
1,2 en túneles	-	3,8 en puentes	-
			1,9 sobre explanación.

Costes anuales de la vía con balasto tipo UIC60 B75a W63 = UIC60 B70 W60.

superior [12]. No obstante, conviene particularizar un poco más el análisis.

Ese porcentaje varía al instalarla en un puente o túnel, por el desgaste que experimenta la capa de balasto. A alta velocidad es preciso incrementar su espesor a 40 cm y emplear un tapiz elástico como subbalasto [23]. Por este motivo, la instalación de una vía en placa en una nueva línea presenta la ventaja de emplear menores volúmenes de excavación en los túneles. Con estos condicionantes, la instalación de vía en placa en túnel, sería sólo un 10% más cara, llegando al 50-70% para su instalación en la explanación [6].

En los puentes la solución de vía en placa ocupa una menor sección transversal, lo que posibilita un tablero menos ancho. Asimismo, en determinadas soluciones como la italiana, esa reducción de sección transversal permite soluciones estructurales más aligeradas, al reducirse (un 17%) la sobrecarga permanente sobre el puente.

Al aceptar mayores peraltes e insuficiencias de peralte, la vía en placa presenta una mayor adaptabilidad al terreno. Esta circunstancia permite la realización de los nuevos trazados paralelos a una autopista existente. Por tanto, presenta un menor impacto ambiental y un ahorro de los costes de su instalación en nuevas líneas, por los menores volúmenes excavados en trincheras y vertidos en los terraplenes, y por el número inferior de túneles y viaductos que requiere la nueva traza. El coste de la inversión puede reducirse, en estos casos, en un 55% [4].

La mayor inversión que se requiere para su instalación puede compensarse, al cabo de cierto tiempo, por sus menores costes de mantenimiento frente a la vía con balasto. La exigencia de un escaso mantenimiento incide directamente en la planificación y el cumplimiento del programa de explotación de la línea. Un mantenimiento menos intenso exige menores intervalos nocturnos de interrupción de la circulación. En consecuencia, la capacidad de la línea aumenta y se posibilita una óptima utilización de las unidades de alta velocidad y de su personal.

La mayor experiencia en el coste del mantenimiento, de una línea de alta velocidad sobre vía en placa, se encuentra en el Japón. En la [2] figura 6 se muestra una comparación de los costes de ambos tipos de superestructura. Los de la vía en placa son entre un 18 y un 33% con respecto a la vía con balasto. Como comparación, los costes anuales de mantenimiento de una línea de alta velocidad sobre balasto son del orden de 2,5 Mptas/km [12]. Al respecto, la SCNF va a sustituir el balasto y los desvíos de la línea del TGV París-Lyon, entre 1996 y el año 2005, con un coste cercano a los 75.000 Mptas [24].

A pesar de poder contar con los anteriores valores de referencia, los estudios de rentabilidad de la vía en placa deben realizarse sobre tramos concretos y, por tanto, sujetos a condiciones límites particulares. A continuación se expone, por su interés y calidad, el análisis realizado para el tramo Bonn/Siegburg-Aeropuerto de Frankfurt (144,5 km), de la línea de nueva construcción Colonia-Rhein/Main de alta velocidad (DB AG) [25].

Se comparó la vía sobre balasto con la vía en placa. Para ello se eligieron varios tipos de soluciones reflejadas en la tabla 3. Los cálculos de los costes anuales de inversión y mantenimiento se realizaron separadamente para cada versión. Considerando el tema desde el punto de vista económico, la vía en placa seguía arrojando un balance desfavorable respecto a la vía con balasto. Esas diferencias se reducirían si se generalizara, la actual tendencia de incrementar los espesores de balasto y la utilización de capas aislantes blandas de coste elevado. Un incremento de las circulaciones nocturnas provocaría unos gastos adicionales en la solución con balasto, por la construcción de más estaciones para absorber un aumento en el número de cruces.

Como conclusión del estudio económico se puede recomendar la aplicación de una solución con vía reforzada sobre balasto [21], con casi los mismos costes anuales que el tipo básico, en puentes y sobre la explanación. Esta solución alargaría

su ciclo de mantenimiento de cuatro a seis años. La vía en placa es la mejor solución en los túneles.

5. SU APLICACIÓN EN LAS NUEVAS LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

La superestructura de vía en placa ha evolucionado sensiblemente desde su primera utilización en líneas subterráneas de los ferrocarriles metropolitanos, hace más de 100 años, hasta su instalación generalizada en líneas de alta velocidad de Japón y más recientemente de Alemania. A lo largo del presente artículo hemos hecho un balance de dicha evolución, y de las limitaciones que todavía presenta en la actualidad. No obstante, en estos momentos se puede ya plantear como una solución competitiva y alternativa a la superestructura de vía con balasto.

El porcentaje de obras de fábrica de las nuevas líneas en construcción ha ido creciendo en todos los países. Así en Francia, el TGV Mediterráneo tendrá 27 km de túneles, zonas cubiertas, puentes y viaductos sobre 295 km en total, o sea, casi un 10% del kilometraje de la nueva línea, todo un récord en ese país. Los porcentajes en Alemania y en Italia ya llegan al 30% y la futura línea Bolonia-Florenia tendrá obras de fábrica en un 90%, un récord europeo. En España, la nueva línea denominada "Y Vasca" que unirá las tres ciudades más importantes del País Vasco, presentará una proporción del 54% [4]. En Japón, ya hemos visto con detalle sus porcentajes, todavía más elevados que en Europa.

El incremento del número de obras de fábrica ha provocado un aumento de los costes de construcción de las nuevas líneas de alta velocidad en Europa. Es el caso de la futura línea de 177 km de Colonia a Frankfurt, con vía en placa en su totalidad. Su coste ascenderá a 4.000 Mptas/km, el doble del previsto para el TGV-Mediterráneo. Como orden de magnitud conviene resaltar que el coste de construcción de la nueva línea Berlín-Hamburgo de 184 km para el Transrapid, sin carril ni balasto, está previsto en 4.500 Mptas/km [24].

Sin embargo, es precisamente en los túneles donde la solución de vía en placa ofrece mayores ventajas técnicas y económicas. Los trabajos de mantenimiento de la vía con balasto son difíciles, por la fuerte impregnación de polvo y como consecuencia por su mala visibilidad. A su vez, son peligrosos por la continua explotación de la vía contigua en condiciones límites de galibo libre. Si bien los costes totales anuales de instalación y mantenimiento son algo más elevados, cuando el suelo es difícil de excavar la solución de vía en placa es rentable, por requerir menos volumen de extracción de material. Por estos motivos, la superestructura de vía en placa es la solución recomendada para tramos en túnel superiores a 500 m de longitud.

Asimismo, para evitar las variaciones de rigidez de la plataforma, en los tramos con gran densidad de obras de fábrica,

es recomendable la utilización de la vía en placa en toda su longitud. De esa forma se evitan las transiciones entre vía en placa y vía con balasto, que provocan una gran inestabilidad en el comportamiento de la vía, como se ha comentado con anterioridad.

A veces, los condicionantes por impacto ambiental obligan a introducir curvas de pequeño radio y fuertes rampas en las nuevas líneas de alta velocidad. Es recomendable el uso del frenado por corrientes de Foucault, en los tramos en rampa y con necesidad de reducir la velocidad por paradas obligadas en estaciones cercanas. La vía en placa es imprescindible en estos casos para evitar problemas de estabilidad en la vía.

Si circulara un tráfico mixto o no homogéneo (viajeros y mercancías) por una línea de alta velocidad, la existencia de deficiencias de peralte para compatibilizar circulaciones de diferentes velocidades incide negativamente en la estabilidad transversal de la vía. La vía en placa garantiza la calidad exigida en este caso.

Conviene hacer hincapié en que la decisión en la elección del tipo de superestructura de vía, debe tomarse en la fase de planificación del proyecto. Tras analizar todos los aspectos técnicos y económicos, debe seleccionarse la solución que más convenga a cada tramo concreto de la nueva línea a construir. Como hemos visto, dicha elección influye no sólo en el tipo de vía, sino en los propios parámetros del trazado de la línea [26].

6. CONCLUSIONES

En las líneas de alta velocidad lleva aplicándose la superestructura de vía en placa más de treinta años. La experiencia de los países del "club" de alta velocidad es plenamente satisfactoria, especialmente en Japón. La reciente decisión de Alemania de aplicar este tipo de superestructura, en todas sus nuevas líneas de alta velocidad, corrobora esa realidad.

Los puntos débiles de la vía en placa se han ido superando a lo largo de esos años, presentando en la actualidad un estado de conocimientos suficiente, para poder desarrollar óptimas soluciones en cualquier circunstancia.

Las situaciones que favorecen la implantación de esta solución en las líneas de alta velocidad, son los nuevos trayectos que presenten un gran número de obras de fábrica, especialmente túneles, y en los que se planifique tráfico no homogéneo de viajeros y mercancías. Éstas se van a dar en algunas de las nuevas líneas a construir próximamente en nuestro país.

Las ramas de alta velocidad están circulando en Europa sobre una superestructura de vía tradicional con carril UIC60 soldado en barra larga, traviesas de hormigón pretensado y sujeción elástica. La superestructura de vía en placa, sin balasto, permitirá enlazar sin discontinuidad y con el apoyo de la tecnología de los firmes de las autopistas, con la superestructura del nuevo ferrocarril del siglo XXI: el sistema ferroviario de

sustentación magnética, sin balasto ni carril. La tecnología actual está preparada para afrontar esa competencia.

7. REFERENCIAS

- [1] Sato J. La voie au Japon. *Le Rail* 1996 Mai/Juin;(11):31-4.
- [2] Ando K, Miura S, Watanabe K. Twenty Years' Experience on Slab Track. *Quarterly Report of RTRI* 1994 Feb;35(1):7-14.
- [3] Ohyama T. Speedup of Shinkansen and ATLAS Project in RTRI. *Quarterly Report of RTRI* 1995 Sept;36(3):125-9.
- [4] Estradé JM. La superestructura de vía sin balasto: perspectivas de su aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad. *Revista de Obras Públicas* 1991 Sept;9:28.
- [5] Siebecke K, Pereira LK, Jedamski V. Die Feste Fahrbahn aus Sicht der Aufsichtsbehörde Eisenbahn-Bundesamt. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 1996 Mai;45(5):283-93.
- [6] Eisenmann J. La voie sur dalle, une alternative a la voie classique sur ballast. *Rail International* 1995 Nov:19-28.
- [7] Fendrich L. DB explores the limits of ballastless track. *Railway Gazette International* 1995 Jan:45-9.
- [8] Caillau J, Vallet D, Cervi G. La voie sans ballast vers une solution pour les lignes à grande vitesse. *Revue générale des chemins de fer* 1994 Juin-Juillet:131-4.
- [9] López Pita A, Miquel J. Optimización desde el punto de vista resistente de las vías sobre placa de hormigón. *Revista A.I.T.* 1983 Sep-Oct;(54):6-11.
- [10] Völter U. Feste Fahrbahn. Notwendigkeit und Möglichkeit der Vermessung. *Der Eisenbahningenieur* 1995;46(8):564-5.
- [11] Vogel W, Grübl W. Earthwork Structures for new railway lines slab track - principles and suggestions for realization. *Railway Technical Review* 1995:29-36.
- [12] Darr E, Fiebig W. Stand der Entwicklung und des Einbaus der Festen Fahrbahn. *ZET + DET Glas Ann* 1996 April;120(4):137-49.
- [13] Dubsky W. Weichen auf Fester Fahrbahn. *Der Eisenbahningenieur* 1995;46(6):420-3.
- [14] Takai H, Uchida M, Takeshita K, Sunaga Y. Track Maintenance Technique for 300 km/h Class Shinkansen. *Quarterly Report of RTRI* 1993 May;34(2):111-8.
- [15] Hölzl G, Holm P, Müller G. Akustische Vorteile der Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau bei tiefen Frequenzen. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 1996 Jan/Feb;45(1-2):47-55.
- [16] Baxter MI. La conception de voies sans ballast. *Le Rail* 1996 Mai/Jui;(11):40-3.
- [17] Eisenmann J. Die Weiterentwicklung des Eisenbahn-Oberbaus - Auswirkung auf Langzeitverhalten und Körperschall-Emission. *ZET + DET Glas Ann* 1996 Apr;120(4):128-36.
- [18] Grosse J. Feste Fahrbahn. Elektrotechnische Anforderungen an den schotterlosen Oberbau. *Der Eisenbahningenieur* 1994;45(3):146-51.
- [19] Leykauf G, Mattner L. Prüfung von Festen Fahrbahnen im Labor. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 1995 Mär;44(3):157-62.
- [20] Oberweiler G, Osswald R. Die Forschungsprojekte zur Entwicklung der Festen Fahrbahn. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 1992 Nov;41(11):753-8.
- [21] Leyfauf G. L'optimisation de la voie ferrée. *Le Rail* 1996 Mai/Jui;(11):24-8.
- [22] Oberweiler G, Osswald R. Die Feste Fahrbahn auf Asphalttragschichten. *ETR Eisenbahntechnische Rundschau* 1995 Sep;44(9):643-7.
- [23] Repczuk A. Les tapis sous-ballast. *Le Rail* 1996 Mai/Jui;(11):18-21.
- [24] Batisse F. Les deux modèles de voies ferrées de l'an 2000. *Le Rail* 1996 Mai/Jui;(11):6-11.
- [25] Henn WD. System comparison: ballasted track - slab track. *Rail Engineering International* 1993;(2):6-9.
- [26] López Pita A, Estradé JM, Calvet P. Evolución de los criterios de proyecto de nuevas infraestructuras de ferrocarril. *Proceedings of the II International Congress of Project Engineering, Bilbao, Spain* 1995 Oct;1:2-10. ●