

La superestructura de vía sin balasto: perspectivas de su aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad (*)

Por JOAN-MANUEL ESTRADE PANADES

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se analiza el futuro de la superestructura de vía sin balasto o vía en placa, partiendo de las últimas aportaciones e investigaciones desarrolladas, y se estudia la conveniencia de su posible aplicación en las futuras líneas a construir en nuestro país.

1. INTRODUCCION

Desde la concepción de la superestructura del ferrocarril de hace más de siglo y medio, se evidenció una estrecha semejanza con la de la carretera. Cabe recordar que la carretera de piedra se desarrolló por Mac Adam en torno al año 1820. Los procedimientos de rehabilitación y renovación eran en esencia los mismos que en la construcción de carreteras. Lógicamente las diferencias resultaban del tráfico ligado al carril.

La aplicación en el marco de la carretera de los firmes flexibles modificó ese paralelismo, al desarrollarse una nueva tecnología que no se aplicó al ámbito ferroviario.

Sin embargo, la introducción posterior de los firmes rígidos, utilizando el hormigón como sustituto de los productos bituminosos derivados del petróleo, hizo plantear la introducción de esta tecnología al ferrocarril. Este hecho fué paralelo a la puesta en explotación de la línea del Tokaido (Japón) en 1964, en la que se puso de manifiesto que la degradación de la calidad geométrica de la vía para una velocidad máxima de 210 Km/h, apenas podía ser neutralizada por las operaciones mecanizadas de mantenimiento nocturno.

Además, la dificultad de poder mantener la calidad de la vía con balasto en los túneles, provocada por los problemas de flujos de agua y que impedía mantener unos niveles de confort de marcha mínimamente óptimos, apoyó la idea de aplicar una tecnología nueva que necesitara menos mantenimiento.

Ya en 1924, en el Japón fue tendido un sistema rígido por primera vez en un túnel. Sustituyendo al balasto, se colocaron bloques de

madera con dimensiones de 600x250x150 mm y se monolitizaron con hormigón hidráulico, formando un basamento bajo cada hilo de carril. A pesar de que posteriormente fueron sustituidos los bloques de madera por unos de hormigón, la experiencia de explotación reveló insuficiencias (exfoliación de los bloques respecto a la cimentación de hormigón, su vibración y desplazamientos bajo la carga de los trenes).

A finales de los sesenta, se planteó el estudio del límite superior de velocidad que presentaba el sistema ruedacarril sobre superestructuras de balasto. En aquel entonces los Ferrocarriles Japoneses (JNR) habían puesto en servicio una línea de alta velocidad con traviesas de hormigón de 2.20 m de longitud, carriles de 50 Kg/m sobre un lecho de balasto de 20 cm. Esa experiencia había llevado a la convicción de que, a causa de las mayores fuerzas dinámicas de los vehículos al circular a esas nuevas velocidades, se necesitaría una superestructura más estable que la aplicada hasta entonces (Kaess y col., 1984).

Es ese momento, las distintas Redes proyectaron y desarrollaron numerosos sistemas que, sobre la idea de la sustitución o complementación del lecho de balasto, de por sí el elemento de la superestructura más débil (Estradé, 1989; López Pita y Estradé, 1990), presentaran al menos el mismo comportamiento dinámico y una reducción drástica de los costes de mantenimiento.

Sin embargo, el posterior empleo a partir de 1969 del carril UIC 60 y traviesas de hormigón de 2.60 m de longitud con sujeción elástica, demostró que también a velocidades de 200 Km/h podía aplicarse la superestructura de balasto.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de noviembre de 1991.

Asimismo, la capacidad de la maquinaria de conservación de vía de altas prestaciones para corregir defectos de la geometría de la vía con balasto a bajo coste, se fue mejorando con nuevas tecnologías para medir la calidad de la vía para alta velocidad y al analizar los datos de forma electrónica (programación asistida por ordenador) (Sari, 1981; Riessberger, 1989).

Es de destacar que para obtener todas las ventajas de estos avances para la superestructura de balasto, la vía debe de tenderse inicialmente con gran cuidado; sólo así es posible lograr y mantener con precisión la geometría de la vía.

Estas circunstancias hicieron que las investigaciones iniciadas para el desarrollo de un sistema rígido alternativo, perdieran parte del interés inicial, con la excepción de los Ferrocarriles Japoneses (JNR). Estas se plasmaron en la implantación de tramos experimentales de reducida longitud, que no llegaron a ampliarse a trayectos de líneas principales en explotación.

No obstante, la construcción de nuevas líneas de alta velocidad en Europa a partir de la década de los ochenta, ha hecho replantear la conveniencia de aplicar soluciones diferentes a la superestructuras de balasto.

Hasta esas fechas, las líneas ferroviarias con tráfico convencional presentaban un porcentaje de túneles relativamente bajo. Aproximadamente éste era de un 6% de la longitud total de las líneas ferroviarias japonesas o suizas, y de un 3,5% de las italianas. Sin embargo, las nuevas líneas han incrementado esos índices de 5 a 10 veces: Shinkansen (40%), Sanyo (47%), Direttissima (30%), Hannover-Würtzburg (35%), Mannheim-Stuttgart (29%), Feuske-Narvik (Noruega) (39%), proyecto Nueva Red Básica C.A.P.V. (54%). Además, la longitud máxima de los túneles ferroviarios ha pasado de ser de 10-20 Km., a 40-60 Km en la actualidad (Klinow, 1986; Glatzel, 1988a y 1988b; Gobierno Vasco, 1989).

Estos condicionantes junto con los parámetros de definición de planta y de sección transversal, impacto ambiental, etc., de las nuevas líneas de alta velocidad, han relanzado las investigaciones que estaban desarrollando las distintas Administraciones Ferroviarias e Institutos de Investigación internacionales sobre las superestructuras sin balasto.

El objetivo del presente artículo es el de hacer

una revisión del estado en que se encuentran los estudios realizados hasta el momento sobre este tipo de superestructura, analizar sus perspectivas de futuro y su posible aplicación a las nuevas líneas de alta velocidad en España.

2. FUNCIONES Y CARACTERISTICAS DE UNA SUPERESTRUCTURA ALTERNATIVA A LA DEL BALASTO.

Como hemos indicado anteriormente, el sistema clásico ha demostrado su validez a altas velocidades.

Además, el sistema de superestructura de balasto presenta una serie de ventajas que conviene resaltar:

- Costes de construcción menores que en las soluciones constructivas desarrolladas hasta el momento sin balasto.

- Posibilidad de modificar la situación de la vía sin causar problemas a la explotación (adaptación de peraltes en curvas y rampas de transición).

- Regulación simple en altura en el caso de asientos (asentamiento de terraplenes).

- Buena amortiguación acústica, tanto corpórea como aérea (emite unos 4 db(A) menos en el aire que una vía sin balasto) (Holzl y col., 1988).

- Capacidad de adaptación para uniones de vía (escapes y desvíos).

- Procedimientos de conservación acreditados y avalados por la experiencia, con exigencia de corte de vía menos prolongado que el que requiere la vía sin balasto.

Por tanto, cualquier nueva solución de vía sin balasto debía de presentar una serie de ventajas que neutralizaran las de una vía con balasto. Los pliegos de condiciones que se definieron para ello, fueron muy exigentes con las nuevas alternativas a diseñar.

Con carácter general las exigencias establecidas para una nueva superestructura sin balasto fueron las siguientes:

- Mantenimiento del confort.

- Asiento invariable, necesitando un menor mantenimiento.

— Fidelidad de la forma y un bajo nivel de fuerzas y tensiones en el sistema vehículo-vía.

— Eliminación de los movimientos por impacto del balasto para altas velocidades.

— Aplicación del freno por corrientes de Foucault sin poner en peligro la estabilidad del asiento de la vía.

— Aumento de la estabilidad lateral de la vía, especialmente en curva.

— Igual elasticidad a la vía con balasto.

— Propiedades constantes y perdurables en función de la temperatura y humedad.

— Disminución de la emisión de ruido y de la transmisión de vibraciones al subsuelo.

— Amplia mecanización en su colocación y asiento.

— Tecnología económica en cuanto a su reparación y renovación.

— Posibilidad de modificar el diseño de la sección transversal de la vía y de los elementos del trazado de la línea (modificaciones plano-altimétricas de su geometría).

— Reducción drástica de los costes de mantenimiento de la vía.

— Buen comportamiento y reparación en caso de descarrilamiento.

Además de esos criterios básicos de definición de una superestructura alternativa a la de balasto, cada Administración Ferroviaria fijó unos estrictos criterios de diseño particulares, adaptados a sus necesidades concretas.

Así, los Ferrocarriles Japoneses (JNR) definieron las siguientes condiciones básicas:

— Coste de construcción no superior al doble del de la vía tradicional.

— Velocidad de construcción no inferior a 200 m/día.

Los datos básicos del proyecto previstos para la línea Sanyo fueron los siguientes:

Carga por eje = 240 KN.	Fuerza transversal = 64 KN.
Fuerza de frenado o puesta en marcha = 80 KN.	Acción térmica = 80 KN.

Los Ferrocarriles Italianos (FS), que como ya comentaremos a continuación han desarrollado

una solución basada en la japonesa, han aplicado las siguientes exigencias técnicas e hipótesis de proyecto, para su posible aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad:

— Alta estabilidad de asiento en la vía, en cuanto alineación y altura, bajo la acción de cargas estáticas de 250 KN/eje y una velocidad de marcha de 250 Km/h.

— El sistema debe ser compatible con las obras de tierras (terraplenes y trincheras) con un módulo de compresibilidad por lo menos igual a 100 N/mm².

— Las deformaciones bajo carga no deben superar los 3 mm.

— Reducido gasto de mantenimiento, limitado a los carriles y sujeción.

— Empleo de morteros de unión de fraguado rápido.

— La sujeción debe permitir modificaciones de ± 20 mm transversales y de ± 25 y -4 mm. en altura.

— Utilización de un hormigón poco poroso para aumentar su durabilidad frente a acciones mecánicas y la agresión de agentes extraños (sales, ácidos, humos, ciclos de hielo-deshielo).

— Un desgaste lento del sistema que se traduzca en una vida útil de 50 años.

Carga elástica por eje = 250 KN.	Fuerza transversal = 64 KN/anclaje.
Fuerza aceleración/frando = 80 KN/anclaje.	Carga térmica = 60 KN/anclaje.
Distancia entre ejes del bogie = 200 cm.	Factor incremento Dinámico = 2.5.
Número de ejes en cada placa = 3.	

Se ha aplicado en su diseño un modelo de cálculo, teniendo en cuenta las cargas verticales y acciones anelásticas (contracción del hormigón y variaciones térmicas), formado por 392 elementos finitos de igual geometría y con cuatro nudos. Los 453 nudos de borde se enlazan con la placa mediante una condición de contorno lineal. El suelo se ha esquematizado con el sistema de Winkler.

Los Ferrocarriles Alemanes (DB) además de las exigencias básicas, han puesto especial énfasis en:

— El soporte elástico debe permitir un asiento

de 1 a 1.5 mm por 2 KN de carga, independientemente de la velocidad y temperatura.

— La fijación carril-traviesa debe permitir una corrección de altura de hasta 50 mm.

— La vida útil del sistema debe ser de 40 a 60 años.

A partir de unas hipótesis básicas de definición del proyecto de vía rígida sin balasto, las diferentes Administraciones Ferroviarias fueron desarrollando diferentes prototipos.

Básicamente en todos los casos, se pretendía desarrollar una solución para la superestructura sin lecho de balasto, que permitiera realizar unos trabajos de mantenimiento menos costosos y de menor dificultad, en condiciones de infraestructura difíciles como puentes y túneles, y sin

renunciar a la propiedad básica de la elasticidad del lecho de balasto (fig. 1).

Además, los trabajos de experimentación han demostrado que las tensiones sobre los apoyos de la vía sin balasto, para un estado de conservación muy bueno, son del mismo orden de magnitud que las cargas por eje actuantes en la superficie de una carretera (una presión superficial media de 0.63 N/mm^2 , del mismo orden de magnitud que la presión de contacto actuante en la superficie de una carretera bajo un neumático de camión). Por tanto, se ha podido aplicar al ámbito ferroviario la tecnología de diseño, cálculo, construcción y mantenimiento de carreteras y autopistas, teniendo en cuenta la dinámica y el desplazamiento de los vehículos ferroviarios (carga de la rueda) en las curvas (LeyKauf, 1989) (fig. 2).

SUPERESTRUCTURA SOBRE BALASTO

SUPERESTRUCTURA SOBRE PLACAS FIJAS TIPO 'RHEDA'

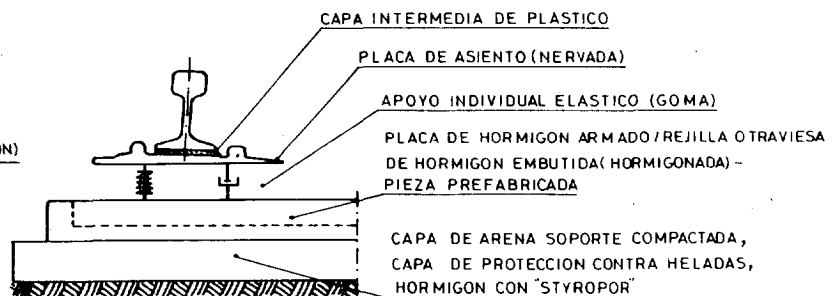
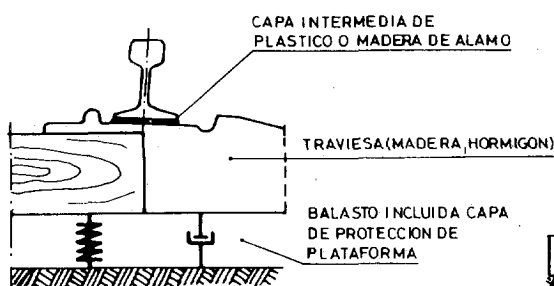
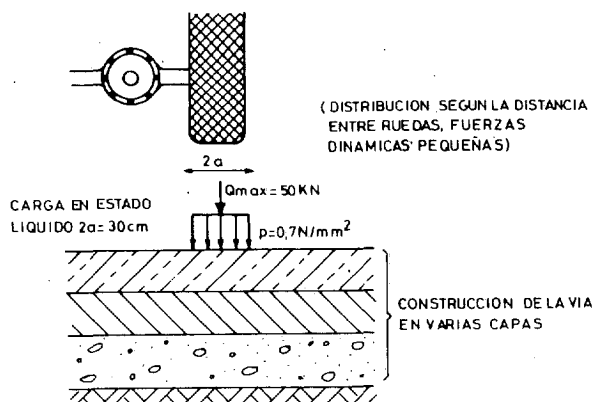


Figura 1. Respuesta elástica de las superestructuras con balasto y sobre placa tipo Rheda.

CARGA POR EJE $2Q=100 \text{ KN}$



CARGA POR EJE $2Q=200 \text{ KN}$

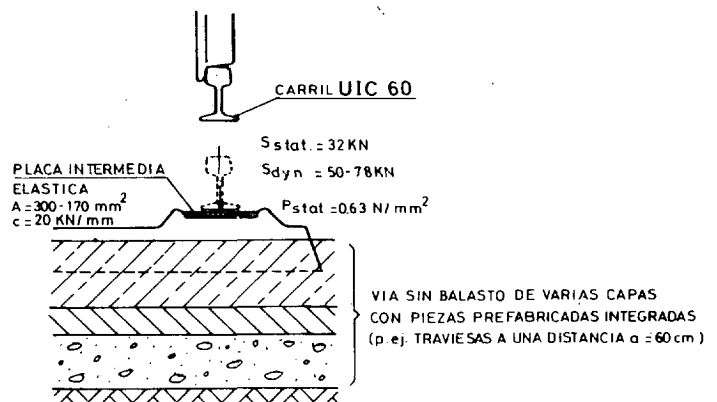


Figura 2. Cargas y presiones de contacto de cálculo para la carretera y el ferrocarril.

Si bien existen sustanciales diferencias de concepción y definición, las diferentes soluciones se han basado en unos mismos componentes básicos: carril, sujeción, traviesa o placa de hormigón, elastómero o mortero de unión, placa de base o suelo estabilizado, y explanada mejorada o plataforma.

No se va a entrar a analizar cada una de las soluciones tipológicas desarrolladas a lo largo de la década de los setenta por las diferentes Administraciones Ferroviarias. Existen publicaciones de referencia que presentan en profundidad y con todo detalle cada una de estas soluciones (Oliveros y cols., 1977; Klinov, 1986).

La presente publicación se ceñirá a aquéllas que han sido aplicadas o van a serlo en breve plazo en las líneas de alta velocidad, bien de forma generalizada o en tramos experimentales.

3. APLICACION DE SUPERESTRUCTURAS SIN BALASTO EN LAS LINEAS DE ALTA VELOCIDAD.

Básicamente, todas las soluciones desarrolladas por las diferentes Administraciones Ferroviarias se pueden enmarcar en dos grandes tipos de clasificación tipológica de la vía en placa, aplicados ambos también a las líneas de alta velocidad:

- Placas prefabricadas de hormigón pretensado, colocadas sobre un elemento constructivo rígido, intercalando un material elástico que sustituye al balasto (solución japonesa y variante italiana).

- Placa de hormigón fabricada in situ o utilizando traviesas normales de hormigón pretensado (solución alemana).

a) Solución japonesa.

Se diseñó una estructura de vía sin balasto, cuyo elemento fundamental fue la placa de hormigón armado. Se experimentaron placas de dos tipos, con diferente apoyo sobre el basamento:

- Tipo "M".— Formada por una placa de 2.3 m de largo por 2.4 m de ancho, que se apoya sobre unos topes de goma en cuatro puntos asegurando su elasticidad. El enderezamiento de la vía en los planos vertical y horizontal se realiza con juntas de goma reguladoras.

- Tipo "A".— La losa tiene unas dimensiones superiores, 4.95 m de largo y 2.34 m de

ancho. Se apoya en el basamento en toda su superficie, mediante la aplicación de una capa niveladora bajo la placa, a base de un mortero frío de betún asfáltico y cemento de 40 a 100 mm de espesor (resistencia a compresión de 0.4 a 1.0 MPA).

Se eligió la del tipo "A" para el tendido de las obras artificiales de las líneas de alta velocidad del Shinkansen (fig. 3).

Para prevenir los desplazamientos longitudinales y transversales de las placas sobre el basamento, se colocaron unos salientes o entradores (de 400 mm de diámetro) que se introducen en las muescas de las placas, con una precisión de ± 10 mm para su colocación (Klinov, 1986).

No obstante, esta estructura de vía en placa tenía sus inconvenientes:

- El mortero de betún asfáltico y cemento resultó de resistencia insuficiente.

- Para su solidificación se necesitaban 7 h (tiempo de evaporización del agua). Su reducción hasta 4 h se podía alcanzar mediante adiciones sintéticas de altos precios.

- Durante el tiempo frío surgían considerables dificultades para el suministro del calentamiento, necesario para su proceso de solidificación.

En base a la gran experiencia obtenida en la explotación de las líneas del Shinkansen (Komatsu y cols., 1989) con superestructura de vía sin balasto en los túneles, se aplicaron modificaciones constructivas en la línea Tohoku en 1982, basadas fundamentalmente en (Tanaka y col., 1981):

- Refuerzo del espesor de las placas, pasando de 16 a 19 cm.

- Aplicación del pretensado a las losas.

- Introducción de elementos aislantes en el mortero de cemento y betún asfáltico, para asegurar la resistencia a las heladas.

- Mejora del desagüe en los tramos de vía en túnel, mediante un desagüe central adicional.

Un mortero de características mejoradas (para un rango de temperaturas en invierno de $+5^{\circ}\text{C}$ hasta -30°C) se utiliza en la actualidad ampliamente en las líneas de Tohoku y Dzietzu. Sin embargo, se constata la necesidad de encontrar morteros más baratos y de mejor tecnología.

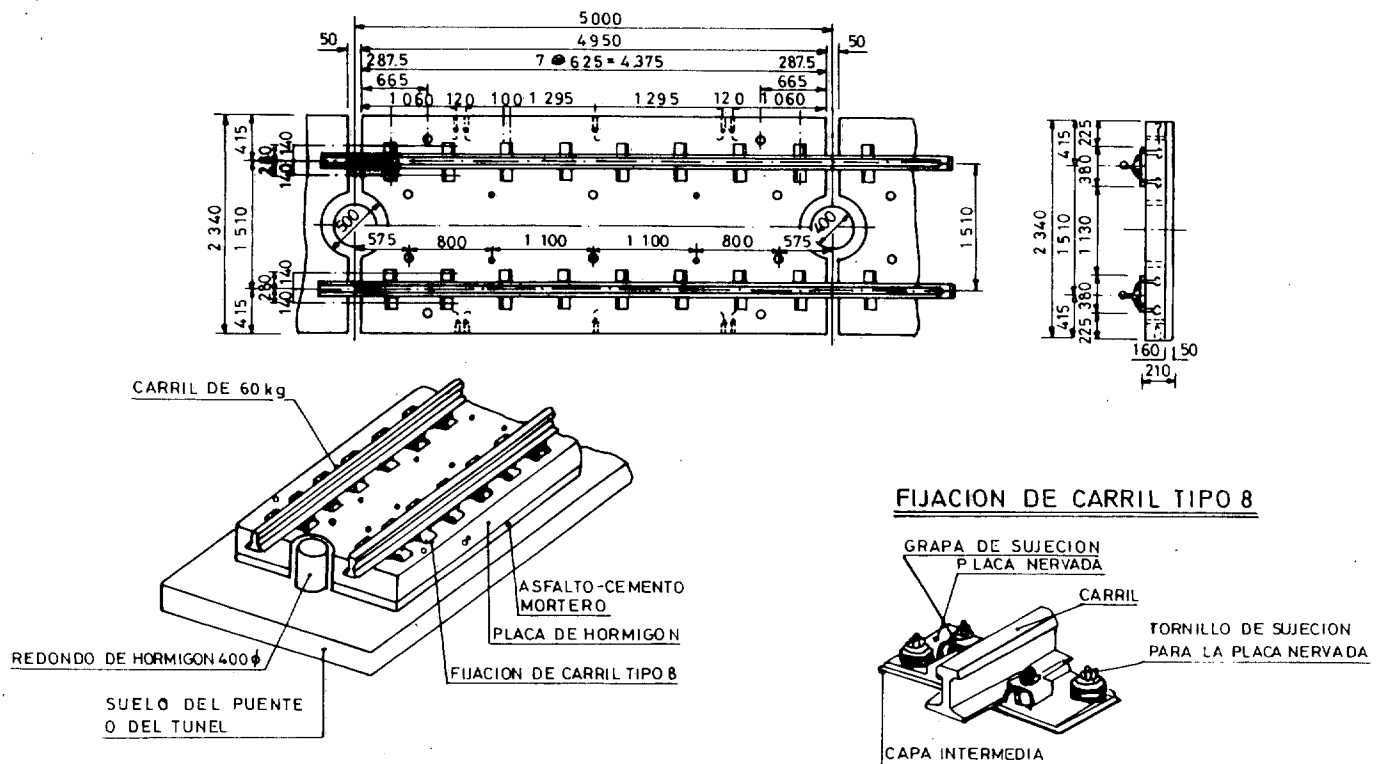


Figura 3. Superestructura de vía en placa de la solución japonesa.

A pesar de las dificultades que entrañaba la aplicación de un nuevo sistema de superestructura de vía, los Ferrocarriles Japoneses (JNR) apostaron por el sistema de la vía en placa para todas sus líneas de alta velocidad. Basándose fundamentalmente en dos razones básicas, economía en los gastos de mantenimiento y menores interrupciones del tráfico para su conservación (mayor capacidad de la línea) sin llegar a duplicar los costes de construcción de una superestructura de vía tradicional, extendieron esta solución a las nuevas líneas en construcción.

Así, hoy presentan una experiencia de más de 20 años y unos 1.000 km de líneas de doble vía con superestructura sobre placas en explotación a alta velocidad. Completando su desarrollo, Japón llegará a tener 3.275 Km de líneas de alta velocidad en un futuro próximo (tabla 1) (Glatzel, 1988b). Como se puede apreciar de esta tabla, en las líneas actuales se ha pasado de aplicar la solución de vía en placa sólo en los túneles de la línea Sanyo, al 95% de la longitud total de la línea Joetsu y en el 100% de las líneas de nueva construcción proyectadas. Bien es verdad, que el porcentaje de longitud de los trayectos en túnel, puentes y viaductos pasó, en ese tiempo, del 6% en la línea Tokaido al 92% de la línea Hokkaido.

Como comparación, la longitud total de esas obras artificiales en Francia, es del 1.3% en la línea del TGV París-Sureste y del 8% en la del París-Atlántico (tabla 2) (Glatzel, 1988a).

b) Variante italiana.

De entre las diversas soluciones de las que se podía disponer con una experimentación importante, los Ferrocarriles Italianos (FS) se han orientado hacia la solución japonesa. Sin embargo, debido a que esta solución tenía algunas características que se adaptaban mal a la realidad de la explotación ferroviaria italiana, se volvió a proyectar el sistema, renovándolo completamente y consiguiendo un producto casi de segunda generación (Carollo y cols, 1988; Lanni y col., 1989; Focacci, 1990).

El sistema de vía en placa de la variante italiana está formado por una plataforma de placas de hormigón, pretensadas longitudinal y transversalmente, de 475 x 250 x 15 cm (fig. 4).

La plataforma posee en sus extremos dos topos mediocilíndricos de 60 cm de diámetro y 20 cm de altura, que se insertan en alojamientos previstos en la cimentación. Estos anclan la placa prefabricada a la placa de asiento de hormigón

	Líneas actuales				Líneas de nueva construcción en proyecto				
Superestructura	Tokaido	Sanyo	Tohoku	Joetsu	Tohoku	Hokkaido	Hokuriku	Kyushu(1)	Kyushu(2)
Longitud línea	515 Km	554 Km	496 Km	270 Km	175 Km	282 Km	594 Km	249 Km	140 Km
Forma de explotación	trenes puros viajeros con automotores				trenes puros de viajeros con automotores				
Velocidad de proyecto	210 Km/h	260 Km/h.			260 Km/h.				
Radio mínimo	2500 m.	4000 m.	4000 m.		260 Km/h.				
Valor excepcional	---	3500 m.	---		---				
Peralte máximo	200 mm.	180 mm.							
Valor excepcional	---	200 mm.	---		---				
Tramos en balasto	54 %	12 %	5 %	1 %	0 %				
Tramos en vía-placa	0 %	50 %	90 %	95 %	100 %				
Carriles	60 Kg/m.				60 Kg/m.				
Traviesas o vía-placa	Hormig. monobloque		Vía en placa		Vía en placa				
Tramos en túnel	13 %	50 %	23 %	39 %	67 %	65 %	53 %	51 %	47 %
Tramos en puentes	11 %	9 %	14 %	11 %	3 %	4 %	6 %	4 %	9 %
Tramos en viaductos	22 %	29 %	57 %	49 %	16 %	24 %	26 %	30 %	38 %
Tramos en balasto	54 %	12 %	5 %	1 %	0 %				
Tramos en vía-placa	0 %	50 %	90 %	95 %	100 %				

Tabla 1.- Características y magnitudes comparativas de las líneas japonesas de alta velocidad.

	Alemania (I.C.E.)		Francia (T.G.V.)		Italia	España
Superestructura	Mannheim-Stuttgart	Hannover-Würzburg	París-Sud Est	París-Atlantique	Direttissima	N.A.F.A.
Longitud línea	99 Km.	327 Km.	388 Km.	278 Km.	236 Km.	342 Km.
Forma de explotación	Explotación mixta		Exclusiva de viajeros		Explot. mixta	Expl. mixta
Velocidad de proyecto	250 Km/h.		270 Km/h.	300 Km/h.	250 Km/h.	250 Km/h.
Radio mínimo	7000 m.		4000 m.	6000 m.	3000 m.	4000 m.
Valor excepcional	5100 m.		3200 m.	4000 m.	---	2300-3200 m.
Peralte máximo	150 m.		180 mm.	180 mm.	125 mm.	152 mm.
Valor excepcional	---		200 mm.	---	---	---
Tipo de vía	Con balasto, en dos túneles vía-placa		Con balasto		Con balasto	Con balasto
Carriles	UIC 60		UIC 60		UIC 60	UIC 60
Traviesas	Hormigón monobloque		< - y trav. mixta	Traviesa mixta	Horm. monobl.	Horm. monobl.
Espesor del balasto	30 cm.		35 cm.	Mínimo 30 cm.	35 cm.	30 cm.
Tramos en túnel	30 %	37 %	0 %	6 %	32.5 %	4.4 %
Tramos en puentes y viaductos	5 %	9 %	1.3 %	2 %	11.7 %	1.6 %

Tabla 2.- Características y magnitudes comparativas de las líneas de alta velocidad europeas.

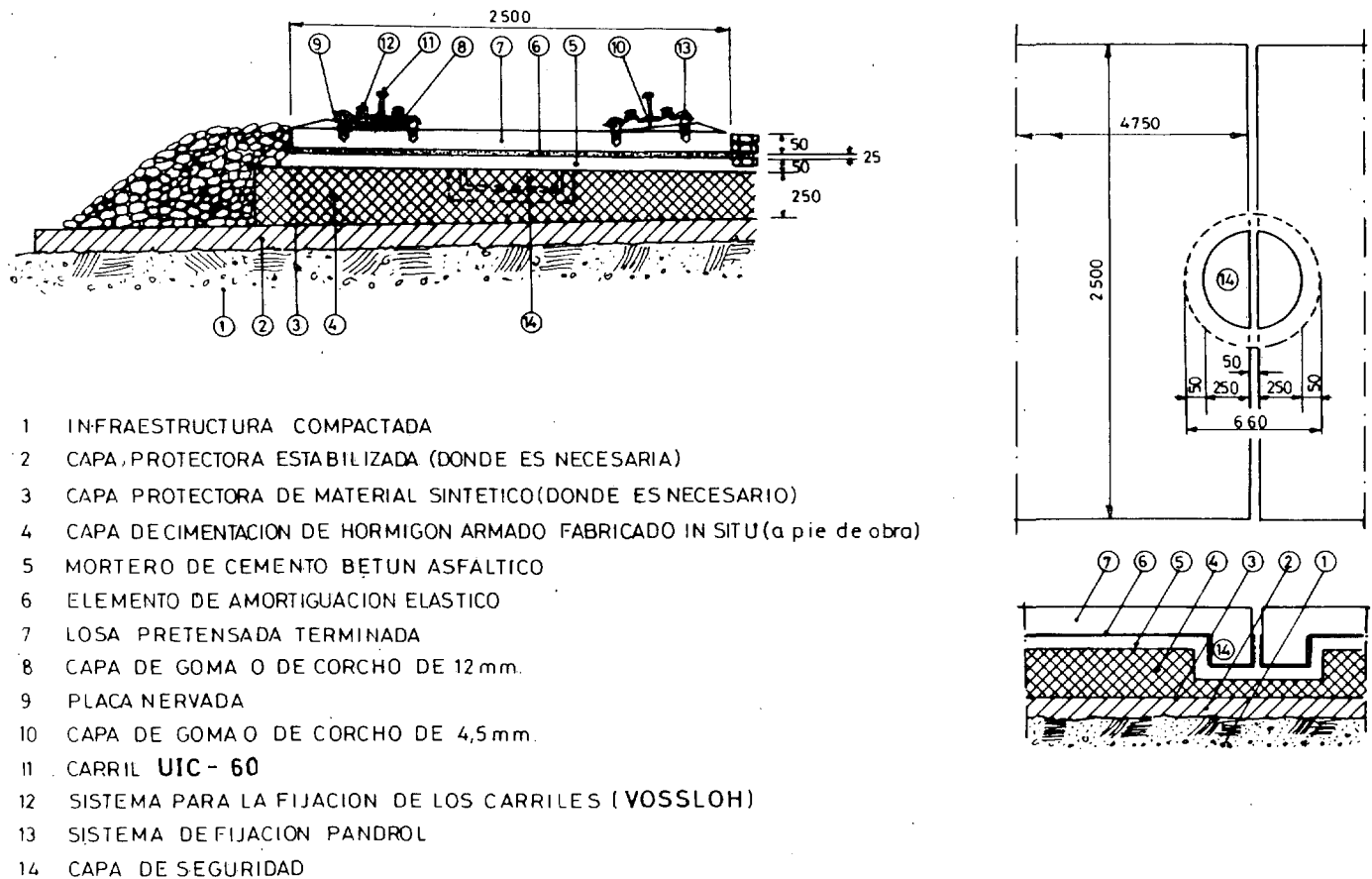


Figura 4. Superestructura de vía en placa de la variante italiana.

in situ. En la solución japonesa, están alojados sólo en la plataforma y no en la cimentación.

Estos semicilindros absorben las fuerzas que transmite la vía (fuerzas laterales, de aceleración y frenado de las circulaciones) y las del sistema no elástico resultante de la diferencia de temperatura entre las dos capas de hormigón y del calentamiento de la vía. En los puentes y túneles, que no se necesita base de apoyo, se deben de preparar unos rebajes para el soporte de los semicilindros.

El espesor de la placa es de 15 cm (en la solución japonesa es de 16-19 cm hasta 22 cm según los casos). Permite reducir el peso de la plataforma (de 53 KN/m a 16.5 KN/m de toda la superestructura). El reducido espesor, disminuye la altura de la vía a 428 mm, con una economía de espesor de 300 mm con relación a la solución japonesa.

Cada 60 cm se colocan unos soportes donde se monta la sujeción de doble sistema elástico en

serie, ofreciendo una elasticidad similar a la tradicional del sistema de superestructura de balasto. La sujeción permite la realización de una variación de peralte en una transición parabólica.

La cimentación está constituida por una losa de hormigón armado de 25 cm de espesor con doble armadura simétrica, y juntas cada 30 m.

La plataforma descansa sobre la cimentación por medio de una capa de 5 cm de mortero bituminoso (cemento, agua, aditivos fluidificantes y arena) de 3 N/mm² de resistencia característica. Su misión básica es la de absorber las oscilaciones, vibraciones y el ruido (frecuencias típicamente ferroviarias de 55 y 80 Hz.) Para garantizar una elasticidad global del sistema lo más próxima posible a la del balasto, los Ferrocarriles Italianos (FS) han dotado al mismo (vía en placa) de tres niveles de elasticidad:

1) Fijaciones elásticas de los carriles y suplementos de goma bajo el patín del carril.

2) Fijación elástica de la placa de asiento y su base de goma.

3) Mezcla de cemento, betún, asfáltico y los diferentes suplementos entre la placa prefabricada de hormigón pretensado y su superficie de apoyo.

Los dos primeros proporcionan reacción elástica y absorción de energía y el tercero, apoyo continuo y duradero a la placa impidiendo la ampliación de oscilaciones.

En la actualidad se están realizando ensayos de la unión del mortero de cemento y betún asfáltico con otros materiales sintéticos (resinas de poliuretano), para componer una mezcla más eficaz como barrera contra el ruido, y que presente un tiempo de fraguado menor (el mortero de cemento y betún asfáltico exige un fraguado de 72 h incompatible con la explotación).

Finalmente, se rellena con balasto la sección transversal de la vía en placa reconstituyendo las dos banquetas. La sección en túnel se completa con elementos prefabricados en la entreevía y a cada lado, para obtener un plano de rodadura adecuado al tráfico de vehículos con neumáticos. Asimismo, se han previsto unos cruces transversales cada 250-300 m, constituidos por dos tubos de 125 mm de diámetro embebidos en la cimentación.

En base a este prototipo, en agosto de 1984 los Ferrocarriles Italianos (FS) construyeron un tramo de ensayo de 45 m, como modelo de tamaño natural y laboratorio para desarrollar una técnica de montaje. Recientemente, han construido un tramo de ensayo, en doble vía de 7 Km entre las estaciones de Gemona del Friuli y Carnia de la línea Udine-Tarvisio, con numerosos túneles, viaductos y obras de fábrica, con radios de curvatura que permiten circular a 230 Km/h. Si bien ésta no es propiamente una línea de alta velocidad, es un paso muy importante para su posterior aplicación a las nuevas líneas en construcción (Pujia, 1989).

c) Solución alemana.

Los Ferrocarriles Alemanes (DB) son los que han desarrollado un mayor número de prototipos, diversificando las posibles soluciones al sistema de vía de superestructura sin balasto (vía en placa). Desde hace casi veinticinco años han ido construyendo diferentes tramos experimentales con soluciones diferentes: líneas de pruebas

en Hirschaid (1967), Rheda y Oelde (1972), tramos de Dachau-Karlsfeld (1977) y Munich-Nordring (1979). De tal forma que a finales de 1979 los Ferrocarriles Alemanes (DB) disponían de 7.4 Km de vía en placa (Jansch y col., 1986).

Como consecuencia de las experiencias obtenidas de la circulación por esos tramos experimentales, en 1985 se eligieron los nuevos tipos de construcción a ensayar definitivamente para vía en placa (Bandow, 1988; Jansen y col., 1989):

- Tipo de construcción Sato.
- Tipo de construcción SBV.
- Tipo de construcción FTR.
- Tipo de construcción Rheda.

Vamos a comentar brevemente los tres primeros tipos de construcción de vía en placa, ya que éstos se encuentran en tramos de ensayo de líneas convencionales, para centrar más el tema en el tipo de construcción Rheda que se ha aplicado a varios tramos de una línea de alta velocidad.

1) Tipo de construcción Sato.

Básicamente es una superestructura de vía en placa con traviesas de acero en forma de Y sobre una capa de apoyo de betún asfáltico. Su tipología es la siguiente: explanada mejorada, fieltro anticontaminante, capa protectora contra las heladas, capa de betún asfáltico para soporte (1 o 2 capas), capa adherente especial, anclaje, traviesa de acero en Y, relleno de balasto en los espacios entre traviesas, sujeción del carril y carril UIC-60 (Fasterding y cols., 1986).

2) Tipo de construcción SBV.

Superestructura formada por: traviesa de hormigón pretensado con relleno bituminoso (SBV) sobre una capa de apoyo de betún asfáltico (ATS) (versión sobre explanación) o placa de apoyo de hormigón (BTS) (versión para túneles y puentes).

3) Tipo de construcción FTR.

Sobre una capa de betún asfáltico (ATS) semi-rígida, sin armadura, se colocan unos armazones prefabricados (FTR) con un relleno posterior bituminoso (SBV).

Estos tres prototipos se han desarrollado en base a las experiencias relativas a la construcción de carreteras con mezclas bituminosas (combinación de áridos y un ligante bituminoso), y para

poder obtener un prototipo mejorado y más económico del modelo Rheda. El betún asfáltico al ser un material flexible, duradero y elástico, no necesita juntas y con un bitumen modificado con polímero es insensible a las temperaturas ambientales. Es un buen elemento, alternativo o complementario del hormigón.

4) Tipo de construcción Rheda.

De todos los prototipos ensayados en la década de los setenta, la solución técnicamente más madura resultó ser el emparrillado de traviesas de hormigón asentado en hormigón, denominado modelo Rheda. En 1972 se construyó un tramo de 640 m en la estación de Rheda-Westfalia, de la línea Hannover-Hamm. Asimismo, entre 1972 y 1978, se instalaron unos 2.800 m de este modelo de superestructura en varios túneles de la Red alemana.

Básicamente, la superestructura de la vía en placa del modelo Rheda está formada por (fig. 5) (Hilliges y col, 1989, Eisenmann y cols. 1991):

- Drenaje profundo longitudinal de la vía.
- Plataforma mejorada con suelo-cemento en una cuantía de 1.5 N/mm².
- Capa protectora contra las heladas de 20 cm de espesor.

— Placa niveladora de hormigón armado de 14 cm de espesor, con armadura longitudinal y transversal.

— Traviesas monobloque pretensadas separadas 60 cm y monolitizadas con hormigón. Para la alineación de la vía antes del hormigonado, se colocan tornillos verticales de regulación y, a través de orificios horizontales especiales, vástagos longitudinales que se monolitizan junto con las traviesas.

— Inicialmente las placas elásticas intermedias fueron de poliuretano, pero debido a su deterioro por reacciones químicas (hidrólisis), se sustituyeron por otras de poliéster-polialcohol de 7 mm de espesor, cubiertas con una placa de base de acero de 300 mm de anchura y 170 mm de longitud (Leykauf, 1989).

— La fijación del carril que inicialmente fue del tipo loarv 180, fue sustituida por la del tipo loarv 207. En la actualidad, los Ferrocarriles Alemanes (DB) han desarrollado para la vía sin balasto la fijación de carril loarv 300 (Pichlmaier, 1983).

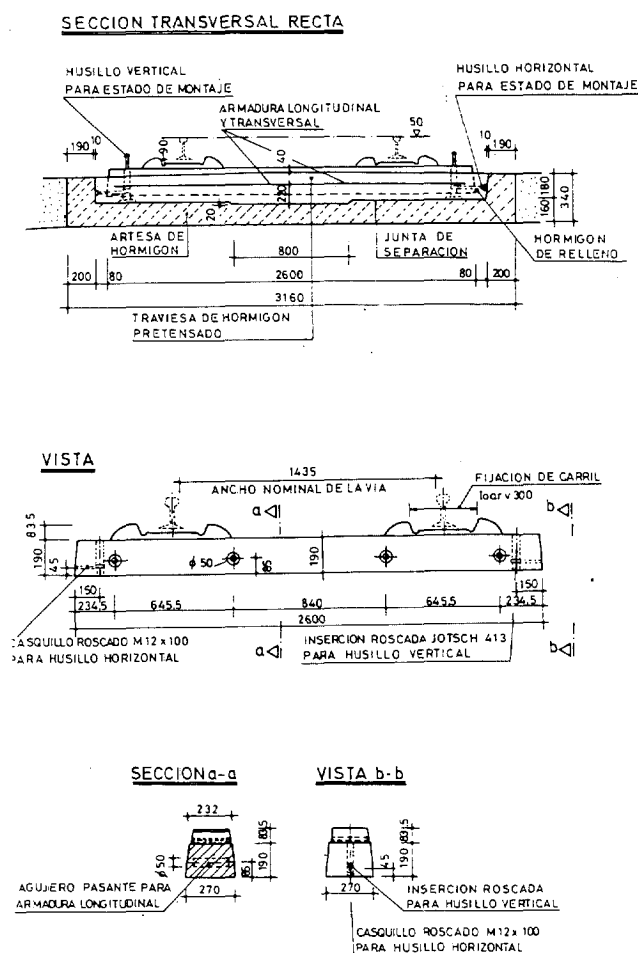


Figura 5. Superestructura de vía en placa de la solución alemana tipo Rheda. Versión en túnel y traviesa de hormigón pretensado B 301.

Dada la amplia experiencia que se había obtenido de este modelo, basada en el conocimiento de su comportamiento a largo plazo y su menor coste con relación a los de armazones o placas prefabricadas, en 1985 los Ferrocarriles Alemanes (DB) adoptaron la decisión de equipar los túneles de Einmalberg y Mühlberg de la nueva línea de alta velocidad Hannover-Würzburg, y una longitud de 9.386 m, con la superestructura de vía en placa del modelo Rheda. Desde su construcción, este tramo experimental del trayecto Fulda-Würzburg ha sido sometido al recorrido de prueba con el ICE a 406 Km/h, sin sufrir daños y ofreciendo un funcionamiento normal.

En el año 1989, han equipado de nuevo dos túneles de sus líneas de nueva construcción con vía sin balasto tipo Rheda. Uno de ellos, el túnel de Sengeberg al sur de Kassel, presenta una lon-

gitud de 5.554 m de vía en placa, con una solución más avanzada en comparación con la del túnel de Mühlberg. Se ha empleado la sujeción Loarv 300 ensayada por primera vez en 1988 en el tramo experimental Kutzenhausen (línea Augsburg-Ulm). En este túnel, se ha pretendido aplicar una concepción de vía en placa, que permita la futura mecanización de todo el proceso de su construcción (Hilliges y col., 1989).

4. ASPECTOS PROBLEMATICOS DE SU CONSTRUCCION Y EXPLOTACION

La construcción de una superestructura de vía sin balasto, exige unas tolerancias sensiblemente más restrictivas que las de la vía tradicional. La disposición geométrica de la vía en placa y su ajuste, resulta difícil en algunos casos. Las pendientes longitudinales (de hasta 1.5%) y transversales en las secciones de peralte de una línea de alta velocidad, provocan fuerzas perturbadoras en los carriles que dificultan su montaje. La exacta definición de la alineación y del ancho de vía son fundamentales en la recepción del asiento de la vía en placa ya que, de no conseguirse de entrada, requieren costosos trabajos de reparación, con gran pérdida de tiempo en el asiento de la vía. Después de que se realiza el relleno de mortero de cemento-betún asfáltico u hormigón, según la solución adoptada, la plataforma es prácticamente inamovible.

Además, la condición previa para que una vía sin balasto presente posteriormente pocos problemas de mantenimiento es la construcción de varias capas de protección contra las heladas y la dotación de un desagüe impecable.

En relación a la problemática del mantenimiento de una vía sin balasto, son los Ferrocarriles japoneses quienes disponen de la mayor experiencia. Después de las modificaciones constructivas realizadas en la superestructura de vía en placa de la línea Tohoku (1982), que ya se han comentado en el apartado anterior, se puede reconocer que este tipo de superestructura precisa muy poco mantenimiento, para un soporte sin asientos. En este sentido, la mayoría de los problemas observados han aparecido por el aflojamiento de la fijación de los carriles (Sugihara y col., 1982).

La experiencia obtenida en el tipo de superestructura Rheda por los Ferrocarriles Alemanes (DB) apoya este planteamiento. Las operaciones

de mantenimiento se han limitado también, fundamentalmente, a la sujeción.

Operaciones de mantenimiento como la eliminación de defectos del carril y de la superficie de rodadura por amolado son también necesarias para la vía en placa. Es previsible además, que se desarrollen en ella en un tiempo considerablemente mayor, los defectos locales de abolladuras en las soldaduras o en las juntas aislantes del carril.

La aparición de asientos, en tramos cortos al pasar de infraestructura de terraplén a viaducto o túnel, o en zonas de más longitud como consecuencia de asientos regulares del subsuelo, es otro de los condicionantes que afectan en mayor medida a la vía en placa. En la reparación de estos asientos se pueden aplicar las soluciones de elevación de la placa de apoyo o de las piezas prefabricadas desarrolladas en el marco de las carreteras y autopistas. Los Ferrocarriles Japoneses (JNR) han empleado esas metodologías, obteniendo rendimientos de elevación de 3 placas en un intervalo nocturno de 4 h 30 mn (Sugihara y col., 1982).

Si son uniformes, la vía en placa permite circular a 250 Km/h sin necesidad de corrección de cota, ya que la placa de hormigón no sufre ningún daño. Sólo con una curvatura más pequeña (asiento 25 veces más grande) de lo que permite la dinámica del movimiento de los vehículos, se produce la rotura de la placa de apoyo (Esenmann y col., 1988).

Por último, hay que mencionar especialmente la problemática del comportamiento y la reparación de las mezclas bituminosas que se emplean en los morteros de unión de los diferentes elementos que constituyen el entramado de la vía sin balasto. En la reconstitución excepcional de la capa de mortero en zonas localizadas, se emplean mezclas de mortero diferentes a las empleadas en su construcción, que fraguan en un tiempo menor a las dos horas. Aunque sean mucho más caras, como las cantidades aplicadas son limitadas, estas intervenciones son económicamente aceptables.

Uno de los aspectos más delicados del sistema de vía en placa, en cuanto que está intrínsecamente relacionado con su fiabilidad, es su comportamiento y reparación en caso de descarrilamiento. En principio, este sistema presenta una menor probabilidad de que se produzca con relación a la vía tradicional. Por una parte, presenta

una defensa activa al reducir la formación de defectos en el nivel transversal (es uno de los factores que junto con la disposición del vehículo constituye la causa de descarrilamiento más frecuente) (Miyai y cols., 1983) y por otra, ofrece una defensa pasiva por su menor vulnerabilidad estructural por efecto de su mayor robustez.

No existen muchas experiencias sobre la comprobación de las posibles consecuencias de un descarrilamiento en este tipo de superestructura. Sólo se conocen descarrilamientos en vía tipo STEDEF (traviesas mixtas de acero y hormigón con calces de goma y colchón elastomérico embutidos en la placa de hormigón) (fig. 6) en Neuilly-sur-Marne (Francia) (Cervi, 1980) y en el túnel de Boetzberg (Suiza) (Hofmann y col., 1980). En ambos casos, sólo hubo que sustituir las traviesas y las cazoletas de caucho.

Los Ferrocarriles Italianos (FS) han realizado ensayos experimentales en taller mediante la caída de un eje cargado con 250 KN y la rodadura sucesiva sobre la plataforma. Asimismo, los Ferrocarriles Alemanes (DB) han obtenido experiencias prácticas, al hacer descarrilar un vagón de mercancías de dos ejes, con una carga de 255 KN a una velocidad de 46 Km/h, sobre una vía en placa del tipo Sato. Fundamentalmente los daños fueron insignificantes en ambos casos, afectando a la fijación de los carriles y provocando ligeros desprendimientos en la placa de hormigón, en el caso de la solución italiana. Una buena medida para reducir los efectos negativos de su descarrilamiento consiste en rellenar de balasto la entrevía y la banqueta (Carollo y cols., 1988; Leykauf, 1989).

La duración de una vía sin balasto, desde su construcción hasta su renovación, sólo puede

valorarse a priori de forma aproximada. En el ámbito de la carretera la duración útil con betún asfáltico es de unos dos decenios, y con hormigón de unos tres. Si bien el efecto de la carga móvil en la superficie de una vía sin balasto es del mismo orden de magnitud que en una carretera, el empleo de elementos prefabricados pretensados puede alargar su duración a cinco décadas.

Para la renovación de la superestructura de vía en placa, de hormigón o betún asfáltico, puede aplicarse la moderna tecnología que se aplica a las autopistas. Pueden esperarse rendimientos de 100 m de vía en un intervalo de 8 a 10 horas para la vía con placa de apoyo de betún asfáltico (Beecken, 1987), y de 480 m/día de corte circulando por la otra vía, para la vía con placa de apoyo de hormigón (Hilliges, 1987; Hilliges y col., 1989).

5. ANALISIS DE LOS COSTES DE CONSTRUCCION Y CONSERVACION DE LA SUPERESTRUCTURA SIN BALASTO

Previamente al análisis de costes, conviene estudiar la influencia que tienen una serie de factores en la evaluación de los mismos.

La superestructura de vía en placa aplicada desde 1972 en la línea Shinkansen, se llevó a cabo en su mayor parte en puentes, viaductos y túneles, y sólo en unos pocos kilómetros sobre terraplén. Son en aquellos tipos de infraestructura donde se obtienen ahorros más importantes en los costes de construcción, en relación con la vía de balasto tradicional.

Al formar parte la solera de los túneles y la placa superior del tablero de los puentes y viaductos de la superestructura de vía en placa, este sistema permite reducir el volumen de excavación en los túneles y la sobrecarga permanente en los puentes y viaductos.

Así, la cota de la vía sin balasto (incluyendo la capa de hormigón inferior y el carril) se rebaja en 250 mm en el tipo Rheda, en comparación con la superestructura de balasto. En la variante italiana esa reducción es de hasta 350 mm, estimándose en este caso una disminución de hasta un 17% de la sobrecarga permanente en los puentes y viaductos, lo que permite soluciones estructurales más aligeradas.

Además, la superestructura de vía en placa

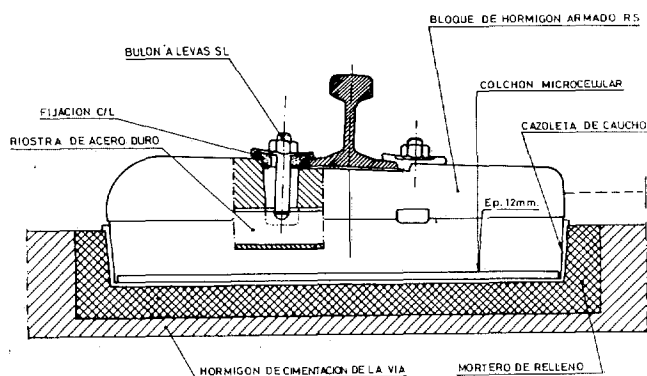


Figura 6. Superestructura sin balasto del tipo RS/STEDEF.

presenta una mayor resistencia transversal. Según investigaciones desarrolladas por los Ferrocarriles Italianos (FS), la vía en placa reduce las componentes de aceleración transversal entre un 60 y un 65%, y las verticales entre un 8 y un 10%, con relación a la vía con balasto (Lanni y col., 1989). Posibilita un mayor peralte en las curvas (en un funcionamiento mixto a altas velocidades de 180 a 200 mm) y por lo tanto, una reducción del radio mínimo de 5.000 m a 2.500 m para velocidades de 250 Km/h (Eisenmann y col., 1988). Permite, en consecuencia, una mejor adaptación del trazado al terreno, provocando un impacto ambiental menor que la solución tradicional.

El aumento de la velocidad de circulación, por vías en buen estado de conservación, produce un pequeño aumento de la fuerza dinámica vertical (confirmado por los Ferrocarriles Alemanes (DB) a través de ensayos realizados con locomotoras, coches de viajeros a 280 Km/h, ICE a 317 Km/h y modernos vagones de 225 KN/eje circulando a 100 Km/h). Mientras no se rebasen los 170 KN, como valor máximo de la fuerza dinámica de la rueda, la respuesta de la vía tradicional es buena. Sin embargo, las repercusiones del tráfico mixto (viajeros y mercancías) en el asiento del balasto son más importantes que las repercusiones de un tráfico homogéneo (viajeros o mercancías) (Naue, 1988 y 1989).

El comportamiento del balasto, como elemento más débil de la superestructura, frente a mayores asientos con tráfico mixto a alta velocidad es todavía una incógnita (variación rápida de granulometría y abrasión acelerada del mismo) (Estradé, 1989).

La experiencia demostrada por más de veinticinco años de explotación de líneas con superestructura sin balasto, permite afirmar que este tipo de vía apenas exige mantenimiento. Este hecho incide directamente en el cumplimiento del programa de explotación de la línea. Un mantenimiento menos intenso exige menores intervalos (nocturnos) de corte (tiempos de bloqueo) de la circulación.

En consecuencia, la superestructura de vía sin balasto origina una mayor capacidad de la línea debido al menor número de interrupciones del tráfico, permite aumentar las velocidades comerciales debido a la práctica eliminación de las limitaciones de velocidad, y posibilita una mejor utilización del material móvil, del personal de

trenes y maquinistas, como consecuencia de los menores tiempos de recorrido. Estudios realizados por los Ferrocarriles Alemanes (DB) en la planificación del programa de explotación de los trenes de alta velocidad ICE (250 Km/h), prevén pérdidas de tiempo de hasta 4.5 mn al circular por la vía libre, al cortar el tráfico de la otra por trabajos de mantenimiento y tener que hacer dos cambios de vía a 100 Km/h (Jansch y col., 1986).

Como resumen, se presentan en la tabla 3 unos parámetros generales de comparación entre ambos tipos de superestructura de vía.

Diferentes autores han publicado estudios de coste y rentabilidad de las diferentes soluciones (japonesa, Watanabe y cols., 1984; italiana, Lanni y col., 1989, Focacci, 1990; alemana, Jansch y col., 1986, Pintag, 1989).

Básicamente la superestructura sin balasto se caracteriza por unos costes de construcción más elevados que permiten efectuar, posteriormente, ahorros en el mantenimiento sistemático de la vía y en la sustitución de sus componentes.

Así, los costes de su construcción son del orden de 2.25 veces los de la vía con balasto en la solución italiana, y de 1.5 veces en la solución japonesa. Si se comparan los costes de construcción del tipo de superestructura en túnel, en vez de la de terraplén, entonces las diferencias se reducen. En el caso de la solución alemana tipo Rheda, sus costes de construcción en túnel son del orden del 80% de los de ese tipo de superestructuras de vía en terraplén, incluyendo en ambos casos la protección integrada contra el ruido.

Teniendo en cuenta además, que los costes de construcción de la superestructura de balasto representan, aproximadamente, entre un 4 y un 4.5% del total de los costes de construcción de los trayectos de nueva construcción, cálculos económicos adicionales realizados para la nueva línea Hannover-Würtzburg han demostrado que, si se hubiera empleado la superestructura de losas del tipo Rheda (que permite rebajar el radio mínimo en planta de las curvas de 5.300 m a 3.000 m) el nivel de la inversión se hubiera podido reducir en un 55%.

En cuanto a sus gastos de conservación, se pueden situar entre un 3 y un 14% de los de la vía con balasto en la solución italiana, y en un 25% en la solución japonesa, por la mayor com-

LA SUPERESTRUCTURA DE VIA SIN BALASTO

PARAMETROS	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Supresión de cargas.	Buena absorción fuerzas de cizalladora y longitudinales de los carriles. Pueden excluirse hundimientos de la vía y deformaciones laterales.	Sólo pueden corregirse de forma sencilla asientos del orden de mm.
Parámetros del trazado	Permite diámetros de curvatura mínimos menores. Mejor adaptación al terreno.	Resulta menos sencillo realizar cambios en la geometría y en el esquema de vías.
Altura del plano de la vía.	Se puede reducir la sección de los túneles por presentar una cota 20 cm inferior.	
Comportamiento de marcha de los vehículos.	No se han constatado diferencias en el comportamiento de marcha para $v < 250$ km/h.	Se debe procurar introducir el menor número de saltos en el tipo de rigidez plataforma.
Utilización del freno por corrientes de Foucault.	El aumento de temperatura del carril no plantea problemas. No es necesario introducir entalladuras de seguridad que dificultan el mantenimiento.	
Emisiones sonoras.		Debe de estar provista de material absorbente adecuado para no incrementarlas.
Proyecciones de balasto.	Quedan descartadas.	
Mantenimiento periódico.	Pequeñas medidas de mantenimiento a escala muy limitada. Largo período de vida útil.	No existen métodos mecanizados para su renovación con tiempos mínimos de bloqueo.
Disponibilidad.	Disponibilidad del servicio extremadamente alta para la producción de tráfico.	Peligro de interceptación desproporcionada durante su renovación.
Rentabilidad.	Posibilidad de reducir su coste de fabricación si se mecaniza el proceso de montaje.	Costes de fabricación superiores a los de la superestructura de balasto.

Tabla 3.— Parámetros comparativos de la vía en placa con relación a la superestructura con balasto.

plejidad de su fijación y por la presencia de reguladores de nivel muy delicados. En la solución alemana, y para el tipo de superestructura Rheda, se pueden estimar en un 9% de los de una superestructura de vía con balasto.

Estudios económicos realizados con la solución italiana de la vía en placa, que han tenido en

cuenta de forma conjunta los costes de construcción y de mantenimiento, y bajo la hipótesis de precios de mercado constantes en los próximos 40 años o considerando intereses anuales del 10%, han obtenido unos costes anuales inferiores en un 17% a los correspondientes a una superestructura de balasto, para ambos casos.

En la tabla 4 se presenta una comparación en términos económicos de la superestructura sobre lecho de balasto y de la solución en placa tipo Rheda.

6. PERSPECTIVAS DE LA SUPERESTRUCTURA DE VIA SIN BALASTO

En principio, y en base a la experiencia actual, no es aconsejable la instalación de la superestructura de vía sin balasto en la red convencional al realizar su renovación. Para su colocación en una vía en servicio se tendría que prever una interrupción total de la circulación, en los dos sentidos, de más de 30 días por Km de vía, lo que no es aceptable para su explotación.

Por tanto, la aplicación de esta superestructura sólo puede plantearse en el ámbito de las nuevas líneas en construcción, y especialmente en las de alta velocidad.

A nivel general, y dado el satisfactorio estado de desarrollo de este tipo de superestructura, en

relación a su funcionalidad de construcción y renovación y a su vida útil, resulta una solución competitiva en relación a la superestructura de balasto, para la construcción de nuevas líneas de las siguientes características:

a) Túneles de gran longitud, como el Seikan (Japón) a través del estrecho de Tsugaru de casi 54 Km, el túnel bajo la Mancha (Francia-Gran Bretaña) a través del Paso de Calais de casi 50 Km, el Gran Belt (Dinamarca) que unirá Fionia con la isla de Seeland de 18 Km (Johansen, 1989), son claros ejemplos en los que la solución de superestructura en placa resulta ser la óptima.

b) Líneas con gran cantidad de obras de fábrica, como túneles, puentes y viaductos.

c) Líneas con mucha densidad de tráfico, como las cercanías de las grandes ciudades que soportan además el tráfico de trenes de mercancías.

d) Líneas de alta velocidad que provocan un fuerte impacto ambiental, y que para evitarlo, la directriz de la línea debe de adaptarse lo mejor posible al terreno, reduciendo sus radios mínimos.

Tramos en túnel								
Componentes del Coste	Costes de la superestructura en tramos en túnel (miles de DM/Km de vía)							
	Balasto con capa* sin PSS*	Balasto sin capa sin PSS	Placa fija con protección contra ruido		Placa fija con protección contra ruido (menor sección de excava- ción, de túnel, 4 m ₂)			
			Máx.	Mín.				
Instalación	1110	620	1000	887	Máx.	685	Mín.	572
Capital constitutivo (i = 6%)	1431	878	1098	981	783		666	
Costes anuales: sólo pequeño mantenimiento y revisión	8.0	8.0	0.5	0.5	0.5		0.5	
Tramos al aire libre								
	Balasto con PSS	Placa fija con protección antiruido y capa protectora			Relación de costes placa fija: balasto			
Instalación	827	1144			1.38 : 1			
Capital constitutivo (i = 6%)	1061	1243			1.17 : 1			
Costes anuales: sólo pequeño mantenimiento y revisión	7.1	0.5			0.07 : 1			

Tabla 4.- Comparación de costes para la superestructura sobre lecho de balasto y sobre placa fija (situación de precios a 1985) (Jansch y col., 1986).

*) capa: capa adicional bajo el balasto.

**) PSS: capa de protección de la plataforma de la vía.

DM: marco alemán.

e) Líneas de alta velocidad, a las que se les aplican valores límites a su trazado, aproximando el peralte de las curvas al límite de explotación admisible, y que están sometidas a tráficos pesados (tráfico no homogéneo).

Centrando el análisis en las nuevas líneas de alta velocidad, son los estudios comparativos de rentabilidad, los que deben de determinar la elección de la superestructura de balasto o de vía en placa. No obstante, cuando los requisitos que se fijan para la línea implican esfuerzos transversales importantes, entonces la única solución técnicamente posible es la vía sin balasto. En este caso, los restantes parámetros de discusión como son el coste de construcción, las posibilidades de renovación, etc., no entran en juego en el proceso de selección entre ambas soluciones. Este sería el caso de la explotación de una línea de las siguientes características:

- Velocidad de 250 Km/h.
- Tráfico simultáneo de viajeros y mercancías, con cargas por eje de 225 KN.
- Aplicación de valores límites al trazado.

Si bien en las actuales líneas de alta velocidad en construcción, no se aplican esos criterios límites, ya se empiezan a detectar cambios que pueden prever en un futuro no muy lejano, una aproximación a estos criterios. Así, los Ferrocarriles Alemanes (DB) han admitido para la circulación a 200 Km/h, las locomotoras de la serie 120 con peso por eje de 215 KN. Hasta ese momento y para ese nivel de velocidad, estaba limitada a 195 KN, como en las locomotoras de la serie 103. La calidad de rodadura de las locomotoras de la serie 120 y su nivel de potencia, medidos a 120 Km/h, se corresponden con los valores de las de la serie 103. Cabe recordar en este sentido, que el proyecto de las nuevas locomotoras de la serie 252 de RENFE está basado en el de las E 120 de los Ferrocarriles Alemanes (DB).

Una situación similar se presenta para los nuevos vagones de 225 KN por eje. Puede, por tanto, preverse que las velocidades máximas admitidas y las cargas por eje autorizadas irán aumentando en el futuro (Esveld y cols., 1989).

Para que una misma vía pueda ser utilizada con un tráfico de alta velocidad y, al mismo tiempo, con un tráfico económico de vagones pesados de 225 KN por eje, es necesario disponer de bogies adecuados, una superestructura correctamente dimensionada y un buen asiento

de la vía. Es en estas circunstancias donde la vía en placa cobra ventaja frente a la superestructura de balasto.

No obstante, y a pesar de la gran experiencia desarrollada en los últimos veinticinco años para la superestructura de vía sin balasto, existen todavía algunas lagunas técnicas que se están investigando en la actualidad. Estas pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- Optimización de la fijación al carril.
- Desarrollo de materiales elásticos intermedios (morteros) de menor coste y tiempo de fraguado mucho más reducido.
- Métodos de insonorización más eficaces.
- Desarrollo de desvíos de vía sin balasto.
- Diseño de soluciones de un alto grado de mecanización para su construcción, renovación y reparación.

7. POSIBILIDADES DE SU APLICACION EN LAS NUEVAS LINEAS DE ALTA VELOCIDAD ESPAÑOLAS

La experiencia española de superestructura de vía en placa se basa fundamentalmente en el tramo experimental de 4.1 Km de longitud en el trayecto Ricla-Calatorao de la línea de Madrid-Zaragoza (p.k. 281/200 al 285/300, vía II). Este tramo se construyó con la solución de los Ferrocarriles Británicos (BR) denominada PACT (Paved Concrete Track), modificada de acuerdo con las experiencias recogidas por éstos en anteriores tramos de ensayo (Oliveros y col., 1976 y 1977).

El prototipo estaba constituido por los siguientes elementos (fig. 7):

- Placa de base de hormigón pobre de 15 cm de espesor y 4 m de ancho.
- Placa de hormigón in situ sin juntas, de 2.40 m de ancho máximo y de 29 cm de espesor debajo del carril y 24 cm en el centro (sección transversal de 6.244 cm²), y armada longitudinal y transversalmente con barras de acero corrugado de 16 mm de diámetro.
- Elastómero de 10 mm de espesor sobre el que se apoya el patín del carril.

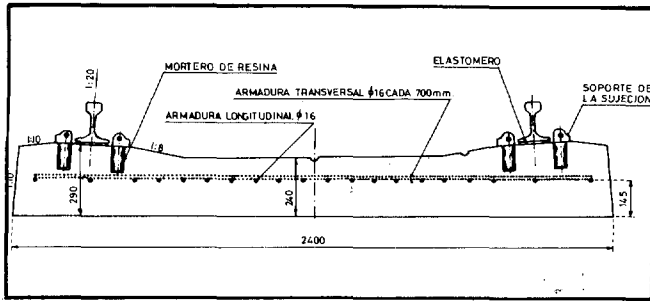


Figura 7. Sección transversal de la vía en placa del tipo PACT Ricla-Calatorao.

— Sujeción elástica Pandrol, formada por un soporte anclado en el hormigón con mortero de resinas epoxi, un clip elástico y un aislante compuesto por una placa de fundición, y una funda de nylon que envuelve la grapa elástica y queda en contacto con el patín del carril.

Drenes formados por orificios cilíndricos de 15 cm de diámetro en la parte central de la placa.

Esta solución ha presentado ciertos inconvenientes en su explotación, como:

— Dificultad de enderezamiento de la posición de los carriles en el plano y perfil después de su colocación.

— Aparición de fisuras transversales, producidas fundamentalmente por las variaciones de temperatura, las cargas dinámicas del material rodante y el asiento irregular de la cimentación de las placas.

— La reparación de la placa monolítica ha resultado bastante complicada.

— Presenta gran rigidez y alto nivel de vibración y ruido.

Independientemente de este tramo experimental, RENFE ha instalado en determinados trayectos, el tipo de vía en placa denominado STEDEF (fig. 6) en un túnel de las proximidades de Molins de Rey (Barcelona), en las estaciones de Nuevos Ministerios (en el túnel Atocha-Chamartín), Embajadores (línea de Villaviciosa de Odón-Embajadores), Méndez Alvaro, Doce de Octubre y Puente Alcocer de la nueva línea Atocha-Villaverde Alto, en los túneles de la duplicación de vía del trayecto Alhama de Aragón-Ateca de la línea Madrid-Zaragoza, y en

la nueva estación de viajeros de Santa Justa en Sevilla.

Sin embargo, en la nueva estación de Atocha se ha aplicado una nueva tecnología de "carril embebido" en una losa de hormigón armado. En la misma se abren unos canales en los que se asientan los carriles sobre unas almohadillas, y se rellenan con un material elástico, a base de una mezcla de corcho granulado y un elastómero reticulado.

No obstante, la aplicación de los últimos prototipos de vía en placa desarrollados en el extranjero, debe concretarse en todo caso en las nuevas líneas de alta velocidad a construir en un próximo futuro.

Bajo esa perspectiva, analizando la actual Red española y teniendo en cuenta los condicionantes que hacen competitiva la solución de vía en placa frente a la superestructura de vía con balasto, son escasos los trayectos en los cuales estaría a priori justificado un estudio comparativo de rentabilidad, si se mantienen los valores y características del tráfico actual (RENFE, 1989).

Se debe partir de la base de que la nueva línea debería de soportar un tráfico superior a la media de la Red, presentar un gran número de túneles y viaductos, y una problemática de impacto ambiental que obligara a elegir unos valores límites de sus parámetros geométricos. La posible elección se ciñe, dado que el trayecto Brazatortas-Córdoba del N.A.F.A. (fig. 8) ya está construido (112 Km de longitud de los que el 18% discurre en túnel y viaducto), al proyecto de la Red Básica de la C.A.P.V. y a la futura variante del puerto de Pajares (Asturias), que constituyen dos de los "cuellos de botella" más importantes que quedan en la Red Ferroviaria española.

En la tabla 5 se presenta un cuadro comparativo de densidades de los trayectos que serían sustituidos por las nuevas líneas, y los valores medios de las Redes española y alemana. Se aprecia que en estos tres casos (uno ya realizado), se superan los valores medios de la Red española, y son del mismo orden de magnitud que los de la Red alemana (DB).

El trayecto del N.A.F.A. (Sur) dispone de una superestructura de vía con balasto tradicional, con radio mínimo de 3.200 m y de 2.300 m ($V_m = 215$ Km/h) en el tramo Villanueva-Adamuz. No obstante, el porcentaje de longitud de los túneles y viaductos es bastante reducido, ya que

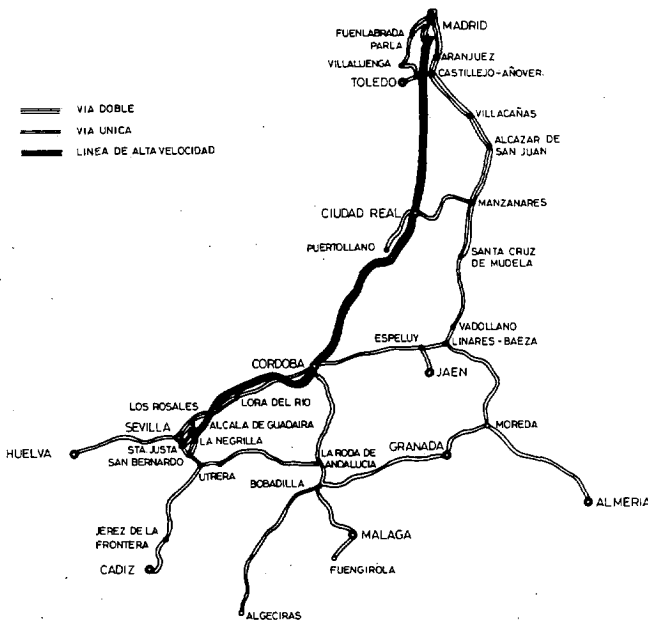


Figura 8. Nuevo acceso ferroviario a Andalucía (N.A.F.A.).

los criterios de proyecto no estuvieron condicionados por la actual normativa sobre evaluación de impacto ambiental.

Sin embargo, en los nuevos proyectos de otras líneas de alta velocidad, los condicionantes de impacto ambiental serán determinantes, dada la gran sensibilización social existente en la actualidad. Ello obligará a tomar decisiones mucho más restrictivas en este campo, lo que llevará a construir muchos más túneles y viaductos.

Será pues en ese marco de diseño, donde estarán justificados los estudios de rentabilidad comparativos entre ambos tipos de superestructura de vía. A título de ejemplo cabe recordar, que el porcentaje de longitud de túneles y viaductos que se maneja en el proyecto de la Nueva Red Básica de la Comunidad Autónoma del País Vasco (fig. 9) es del 54%, cifra muy superior a la del N.A.F.A. (Sur). La problemática del impacto ambiental, en ese caso, condiciona totalmente el proyecto.

8. CONCLUSIONES

La superestructura de vía en placa sin balasto, es una solución estructural que se presenta como alternativa de la de balasto ante el constante incremento de velocidades y cargas.

En los últimos años se han desarrollado diferentes soluciones constructivas, técnica y económicamente muy competitivas, aunque presentan todavía algunos aspectos mejorables. En este sentido, se han aprovechado los conocimientos y experiencias desarrolladas paralelamente en el ámbito de las carreteras y autopistas.

	Densidad media de circulación	Densidad de remolque	Densidad de carga
	(Viajeros y Mercancías)	(mercancías)	
TRAYECTOS	(Por Km. y día)		
N.A.F.A (Sur)			
Sta. Cruz de Mudela-Linares Baeza	67	32000	7000
Red Básica C.A.P.V.			
Alsasua a Zumárraga	73	28000	7000
Miranda de Ebro a Orduña	41	18000	6000
Variante de Pajares			
León a Ujo	41	17000	6000
Red española (valores medios)	35	13000	3000
Red alemana DB (valores medios)	80	25000	6000

Tabla 5.- Estudio comparativo de densidades, según las líneas y los valores medios de las Redes ferroviarias española y alemana.

Densidad media de circulación: número medio de circulaciones diarias.

Densidad de remolque: número de toneladas-Kilómetro brutas remolcadas (TKBR) por kilómetro y día.

Densidad media de carga: número de toneladas-Kilómetro netas por kilómetro y día.

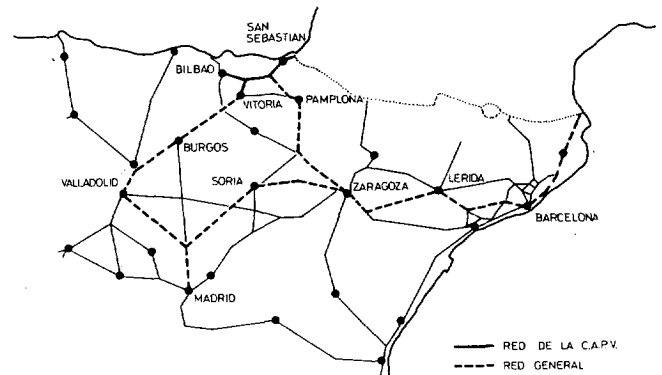


Figura 9. Proyecto de la Nueva Red Básica de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

La superestructura de balasto tradicional (carril UIC 60, traviesa de hormigón pretensado de 2.60 m de longitud, sujeción elástica y capa de balasto de 30 cm. bajo traviesa) ha demostrado su validez para la alta velocidad, tanto para sus condiciones de explotación como en las intercepciones para trabajos de mantenimiento. La desventaja de la vía con balasto, que exige que se tenga que volver a batear después de varios años en servicio, puede convertirse en una ventaja cuando se tratan de corregir de forma sencilla los defectos de asientos, debidos al hundimiento de la plataforma.

La solución de vía en placa es más cara de construcción, pero más económica en su mantenimiento. La decisión sobre la elección de una de las dos superestructuras de vía es una cuestión de rentabilidad en la mayoría de los casos. Sólo cuando los condicionantes técnicos lo determinan, es la superestructura de vía en placa la única solución posible en la práctica.

Una vez solucionado el acceso a Andalucía con la próxima puesta en servicio del N.A.F.A., los dos puntos negros más importantes que quedan en la Red Ferroviaria española, la Red Básica de RENFE en la Comunidad Autónoma del País Vasco y el puerto de Pajares en Asturias, son los dos grupos de trayectos que a priori justifican, en mayor medida, un estudio de rentabilidad comparativa entre ambos tipos de superestructura, en la elaboración de los proyectos correspondientes de sus nuevos trayectos o variantes.

La solución constructiva recomendable a aplicar en esos casos como superestructura de vía en placa, sería una variante de la solución italiana, adaptada a los condicionantes de la Red Ferroviaria española. La tecnología actual de las empresas españolas de investigación (Universidad), fabricación y construcción, está en disposición de diseñar un prototipo óptimo, técnica y económicamente, como se ha demostrado recientemente con el diseño de la traviesa de hormigón de doble ancho de vía.

La experiencia obtenida en los próximos años en el comportamiento de la superestructura de vía en placa sin balasto en las nuevas líneas de alta velocidad europeas, deberá demostrar en la práctica que es una solución de calidad complementaria e imprescindible, en algún caso, a la superestructura de vía con balasto.

9. AGRADECIMIENTOS

Es de destacar la colaboración prestada por la Dirección de Documentación de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles en la recopilación de toda la bibliografía, que ha servido de base para la elaboración del presente artículo.

BIBLIOGRAFIA

BANDOW, H. (1988). Realización de vía sin balasto en la DB Der Eisenbahningenieur, vol. 39, nº 2, pp. 51-55.

BEECKEN, G. (1987). Vía de traviesas de acero en Y con placas de apoyo de asfalto para la superestructura ferroviaria. Comprobación en la práctica. Bitumen, vol. 49, nº 4, pp. 165-353.

CAROLLO, R.; CASALE, R.; FOCACCI, C. (1988). La vía sin balasto. La Técnica Professionale, nº 7, pp. 371-382.

CERVI, G. (1980). Reparación de la vía sobre losa de Neuillysur-Marne después de un descarrilamiento. Revue Générale des Chemins de Fer, vol. 99, nº 10, pp. 566-570.

EISENMANN, J.; LEYKAUF, G. (1988). La vía para alta velocidad. Exigencias constructivas. Dimensiones. Realización. Der Eisenbahningenieur, vol. 39, nº 9, pp. 438-447.

EISENMANN, J.; MATTNER, L. (1991). Dimensionado de una vía sobre placa. Der Eisenbahningenieur, vol. 42, nº 3, pp. 116-124.

ESTRADE, J. M. (1989). Contribución al conocimiento del mecanismo de deterioro de la geometría de la vía, por el análisis del comportamiento en rotura de los materiales que forman la capa de balasto. Tesis Doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Barcelona.

ESVELD, C.; JOURDAIN, A.; KAESSE, G.; SHENTON, M.J. (1989). Consecuencias sobre la conservación de la vía del aumento de las cargas por eje de 20 a 22.5 t. Rail Engineering International, vol. 18, nº 2, pp. 20-24.

FASTERDING, F.; FREZEL, J.; LINKER, W.; OSWALD, R. (1986). La traviesa de acero en Y en la construcción de vía convencional y como vía sobre capa continua de asfalto. Der Eisenbahningenieur, vol. 37, nº 3, pp. 120-132.

FOCACCI, C. (1990). La experiencia italiana de la vía férrea sin balasto. Rail International, nº 2, pp. 2-8.

GLATZEL, L. (1988a). Comparación de algunos parámetros infraestructurales en líneas escogidas de nueva construcción en Europa. E.T.R., vol. 37, nº 3, pp. 111-118.

GLATZEL, L. (1988b). Parámetros de la infraestructura de las líneas de alta velocidad japonesas. E.T.R., vol. 37, nº 9, pp. 599-603.

GOBIERNO VASCO (1989). Alternativas ferroviarias en el País Vasco. DYNA, nº 6, pp. 27-30.

HILLIGES, D. (1987). Empleo de la vía sin balasto en las líneas de nueva construcción de la DB. Eisenbahningenieur, vol. 38, nº 7, pp. 347-353.

HILLIGES, D.; BITTNER, W. (1989). Construcción mecanizada de la superestructura sobre placa tipo Rheda. E.T.R., vol. 38, nº 3, pp. 133-136.

HOFMANN, CH.; PFARRER, H. (1980). Renovación de vía sobre el tramo de vía sin balasto en el interior del túnel de Boetzer de los Ferrocarriles Federales Suizos después de un descarrilamiento. Revue Générale des Chemins de Fer, vol. 99, nº 10, pp. 562-565.

HOLZL, G.; SAID, A. (1988). Revestimientos insonorizantes en los túneles de las nuevas líneas de la DB, con la vía sobre placa. E.T.R., vol. 37, nº 3, pp. 143-147.

JANSCH, E.; GESKE, J. (1986). Vía sobre lecho de balasto o sobre placas fijas, para las nuevas líneas de los DB. E.T.R., vol. 35, nº 6, pp. 395-401.

JANSEN, J.; OHM, K. (1989). Experiencias en la construcción y conservación de vías sobre losas. E.T.R., vol. 38, nº 5, pp. 295-300.

JOHANSEN, T. (1989). El túnel ferroviario bajo el Gran Belt. E.T.R., vol. 38, nº 10, pp. 615-617.

KAESS, G.; SCHULTHEISS, H. (1984). La superestructura de las líneas de nueva construcción de los Ferrocarriles Federales Alemanes. Der Eisenbahningenieur, vol. 35, nº 9, pp. 421-428.

KLINOV, S. I. (1986). Líneas ferroviarias por túneles: construcción y conservación. Zeleznodoroznyj transport, Serija: Put'i putevov hozjajstvo, nº 1, pp. 1-36.

KOMATSU, N.; YOSHIKAWA, T.; NAKAHARA, A. (1989). Historia del Shinkansen en 25 años y proyectos futuros. Japanese Railway Engineering, nº 9, pp. 1-5.

LANNI, S.; RIVIECCIO, L. (1989). La superestructura sobre placa de los Ferrocarriles Federales Italianos (FS). E.T.R., vol. 38, nº 3, pp. 125-131.

LEYKAUF, G. (1989). Conservación de la superestructura de una vía sin balasto. E.T.R., vol. 38, nº 3, pp. 139-144.

LOPEZ PITA, A.; ESTRADÉ, J. M. (1990). Planteamiento de una nueva metodología para el estudio del mecanismo de deterioro de la capa de balasto bajo la acción de las cargas del tráfico ferroviario. Revista de Obras Públicas, nº 4, pp. 23-36.

MIYAI, T.; IIDA, H.; HOSOKAWA, T.; HAMAZAKI, S. (1983). Resistencia lateral del balasto en el plano de la traviesa. Quarterly Reports, vol. 24, nº 4, pp. 163-164.

NAUE, K. H. (1988). Tráfico de alta velocidad y tráfico por trenes completos con cargas por eje de 22.5 toneladas, por la misma línea: ¿Existe compatibilidad? Rail International, nº 2-3, pp. 15-20.

NAUE, K. H. (1989). Importancia de la superestructura clásica de balasto. Posibilidades de la vía rígida sin balasto. E.T.R., vol. 38, nº 3, pp. 115-118.

OLIVEROS, F.; CELADES, L. (1976). El tramo de ensayo Ricla-Calatorao en la investigación de la vía en placa. A.I.T., nº 8.

OLIVEROS, F.; CELADES, L. (1977). Comportamiento del tramo de ensayo Ricla-Calatorao. A.I.T., nº 14.

OLIVEROS, F.; LOPEZ PITA, A.; MEJIA, M. (1977). Tratado de Ferrocarriles I. Vía. Editorial Rueda, Madrid.

PICHLMAIER, R. (1983). Sujeción del carril regulable vertical y lateralmente, para vía sin balasto. Der Eisenbahningenieur, nº 8, pp. 446-453.

PINTAG, G. (1989). Coste de inversión y explotación del sistema de trenes de alta velocidad en Alemania Occidental. Journal of Transportation Engineering, vol. 115, nº 1, pp. 57-67.

PUJIA, V. (1989). Los FS finalizan los parámetros de vía de alta velocidad. International Railway Journal, nº 3, pp. 21-25.

RENFE (1989). Mapas. Gabinete de Información y Relaciones Externas, D.G.A. de Desarrollo y Control de Gestión Corporativa, pp. 1-87.

RIESSBERGER, K. (1989). Elemento clave de la conservación de la vía para alta velocidad. Railway Gazette International, vol. 145, nº 3, pp. 147-149.

SARI, G. (1981). La influencia del estabilizador dinámico en la geometría de la vía. Transport International, nº 6, pp. 1-10.

SUGIHARA, R.; FUCHIKAWA, A. (1982). Mantenimiento de vía en placa en los túneles. Railway Civil Engineering Association, Tokyo, Japan, Permanent Way, nº 93.

TANAKA, J.; SHIDOJI, T. (1981). Diseño de la vía del Shinkansen de Tohoku. Railway Civil Engineering Association, Tokyo, Japan, Permanent Way, nº 91.

WATANABE, K.; TAKAHARA, K.; SATO, Y. (1984). Ingeniería Civil de mantenimiento para el ferrocarril de alta velocidad. Track Technology for the next decade, Telford, London.

Joan-Manuel Estradé Panadés



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la E.T.S.I.C.C. y P. de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya, 1989. Colaborador de la Cátedra de Ferrocarriles del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de esa Universidad, desde 1983. Desarrolla su actividad profesional en RENFE desde 1982, especialmente en el campo del Mantenimiento de la Infraestructura.