

Para altas velocidades, ¿Vía con o sin balasto?

.....
Javier Puebla Contreras

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director de Área de Obra Civil. GIF. Gestor de Infraestructuras Ferroviarias

Antonio Fernández Gil

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Moisés Gilaberte Fernández

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Santiago Hernández Alonso

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Aurora Ruiz Rúa

Economista

TIFSA. Tecnología e Investigación Ferroviaria, S.A.
.....

RESUMEN

En el presente artículo se intenta reavivar el debate sobre la utilización de vía con y sin balasto. La decisión de instalación de vía sin balasto se fundamenta en aspectos técnicos, funcionales y económicos. Aspectos técnicos como el soporte y reparto de cargas a la plataforma, la utilización de elementos de altas calidades en cada caso; funcionales de adaptación a la geometría de las líneas; y económicos, relacionados con el binomio inversión-mantenimiento.

ABSTRACT

The present article attempts to revive the debate on the use of track with or without ballast beds. The decision to employ track without a ballast bed is based on technical, operational and economic aspects. The technical aspects include the bearing and distribution of loads on the platform and the use of high quality elements in each case, the operational aspects refer to the adaptation to the layout of the line, while the economic aspects are related to investment and maintenance factors.

INTRODUCCIÓN

La Unión Europea ha considerado entre sus objetivos prioritarios el establecimiento de una política común de transportes, que permita asegurar la comunicación entre todas las regiones que acoge en su seno. Aún en sus albores, el Tratado de Roma del 25 de Marzo de 1957 recogía este referente. De esta manera, el Consejo Europeo, reunido en Essen en Diciembre de

1994, se comprometió a dar prioridad a 14 proyectos de redes transeuropeas de transporte, entre las cuales figuraba el *tren de alta velocidad sur*, con los ramales mediterráneo y atlántico, claves ambos para el enlace de la zona ibérica con el resto de Europa.

Con la política comunitaria como referencia, el Consejo de Ministros acordó en su sesión del 9 de Diciembre de 1988, dar prioridad a la construcción de las primeras líneas de alta veloci-

dad de la nación, en los corredores de Madrid-Sevilla y Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa, si bien inicialmente se dispuso dar preferencia al primero hasta 1992.

Esta reciente atención prestada a la Alta Velocidad, tanto por el sector de la construcción como por la opinión pública, acrecentada con el empuje dado a la nueva línea Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa, de cuya gestión, proyecto y construcción se encarga el GIF, Ente Público creado a tal efecto, ha reavivado el debate suscitado con anterioridad entre dos soluciones de superestructura con fundamentos claramente diferenciables: la vía con balasto y la vía en placa. Por este motivo, durante los años 1998 y 1999, conjuntamente con la Dirección de Proyectos de dicho Ente, quien hizo el encargo, TIFSA redactó un exhaustivo estudio para el análisis de las diferentes tipologías de la vía y sus elementos, prestando especial atención a la dualidad vía sin/con balasto¹.

En la construcción de la 1ª línea de Alta Velocidad Española, entre Madrid y Sevilla, proyectada para una velocidad máxima de 300 km/h se definieron los elementos básicos de la vía, tomando como referencia las experiencias mayoritarias existentes en el mundo, que utilizaban la vía con balasto. Ocho años de explotación con éxito y aceptación creciente muestran lo acertado de dicha decisión.

Las diferencias entre las dos tipologías hacen referencia principalmente a la resistencia, mantenimiento y coste. Se debe tener presente la explotación de la línea, dado que condiciona tanto las características técnicas como el periodo de amortización de la inversión inicial, aspecto fundamental si se recuerda que en la defensa de la vía con balasto destaca el elevado coste inicial que supone la instalación de la vía en placa, que se pretende paliar con una disminución sustancial de los trabajos de mantenimiento posteriores.

Por otra parte, los análisis realizados hasta el momento han derivado a una situación de bipolaridad dentro del propio marco de la Unión Europea, en la que las simpatías por un sistema u otro dividen el continente en la zona norte (Alemania, Holanda) próxima a la vía en placa, frente a la mediterránea (Francia, Italia, España), partidarios del balasto.

En la amplia bibliografía existente, en la mayoría de las ocasiones, no se considera un aspecto fundamental que afecta a los recursos de cada país y que condiciona notablemente la elección: en la Europa mediterránea, frente a la Europa del Norte, predominan yacimientos de rocas silíceas, cuya gran calidad permite utilizar el balasto con una adecuada relación comportamiento/coste en los tramos más exigentes de líneas de Alta Velocidad.

Por esta y otras circunstancias que se analizan en el presente artículo no nos parece muy racional adoptar una postura apriorística a favor de una u otra alternativa. Más bien nos decantamos por un análisis particular, en cada caso, que permita justificar una elección en base al estado actual de la tecnología, a los costes particulares de cada actuación y a las previsiones de durabilidad del subsistema de la vía.

Se justifican a continuación los condicionantes que hacen, en España y en la actualidad, más adecuada la superestructura balastada para líneas de Alta Velocidad a cielo abierto, sin dejar de mostrar con ellos la conveniencia de utilización de la vía sobre placa en otras situaciones, líneas de cercanías, ferrocarriles urbanos, en los que los programas de mantenimiento tienen escasa cabida dada la alta frecuencia de las circulaciones y en general cualquier otra situación singular en la que el análisis de sus condicionantes así lo recomiende.

Sirva por tanto el presente estudio como elemento de debate y aliento de controversias, las cuales permitirán detectar los problemas de ambas soluciones y poner en práctica las medidas que los solucionen, lo que redundará con toda seguridad en el avance del ferrocarril como elemento de transporte y garantizando en todos los casos la máxima eficiencia de los atributos esenciales de la explotación ferroviaria: disponibilidad - fiabilidad - seguridad - mantenimiento.

FUNCIONALIDADES DE LA VÍA

La vía, como elemento soporte del ferrocarril, cumple con la doble función de guiado vertical y longitudinal de las circulaciones, de modo que las relaciones así creadas son generadoras de esfuerzos aplicados tanto a la vía como a los vehículos.

Una forma de clasificar las funciones de una vía es atendiendo a los esfuerzos verticales (capacidad portante), laterales (guiado) y longitudinales (frenado) ejercidos bien por los vehículos, bien por el entorno de la vía cuando no se encuentra en carga (esfuerzos térmicos por ejemplo); estos deben considerarse como conjunto de los esfuerzos estáticos y dinámicos. Se sabe además que estos pueden depender de forma notable de las características de rigidez y amortiguamiento del sistema.

Por otra parte, a la vía se le exigen determinadas características relacionadas con el tipo de circulación que va a soportar, condicionando gálibos, radios mínimos, peraltes, así como exigencias relacionadas con los sistemas de control que vayan a ser utilizados.

Además, la instalación de una línea de ferrocarril no debe modificar el equilibrio en las relaciones de los distintos sistemas que constituyen el entorno en el que queda integrado, haciendo especial énfasis en temas de ruido y vibraciones, característicos del transporte ferroviario, y en definitiva todos aquellos aspectos que deban considerarse desde el punto de vista medioambiental, tópicos de las obras lineales.

El procedimiento constructivo es también factor destacable en la adopción del tipo de vía a instalar, en términos de: calidad exigible al producto; minimizar riesgos (posibilidad de correcciones durante el proceso constructivo); y reducción de las perturbaciones derivadas (interrupción de tráfico en vías adyacentes).

Estas exigencias deben considerar los riesgos relacionados con la degradación que se produce durante la explotación de la vía, permitiendo operaciones de mantenimiento aplicables tanto a la superestructura como a los equipamientos aso-



Estación Puerta de Atocha (Madrid). Carril embebido en Corkelast.

ciados. Se trata en definitiva de establecer el procedimiento de mantenimiento del sistema, con las periodicidades de control asociadas, y con la definición de los útiles precisos en función del riesgo estimado.

Se pueden prever y formular ciertas exigencias para tener en cuenta accidentes, que puedan tener repercusiones importantes sobre la seguridad o la fiabilidad del sistema. Estas derivan en general en la durabilidad del sistema respecto a los riesgos, o contribuyen a minimizar sus consecuencias.

El resultado global del estudio de las funcionalidades desemboca invariablemente en un análisis cruzado costes/plazos, dado que la construcción de un sistema de vía implica con frecuencia una reducción provisional del potencial de transporte, o si se trata de nueva línea, el establecimiento de partidas destinadas a inversiones durante periodos más amplios. Esta inversión de grandes capítulos muestra, como es obvio, que la elección de una técnica particular no puede basarse en análisis superficiales; al contrario, deben valorarse criterios interrelacionados, con frecuencia ligados a factores externos a la propia vía.

La Vía con balasto

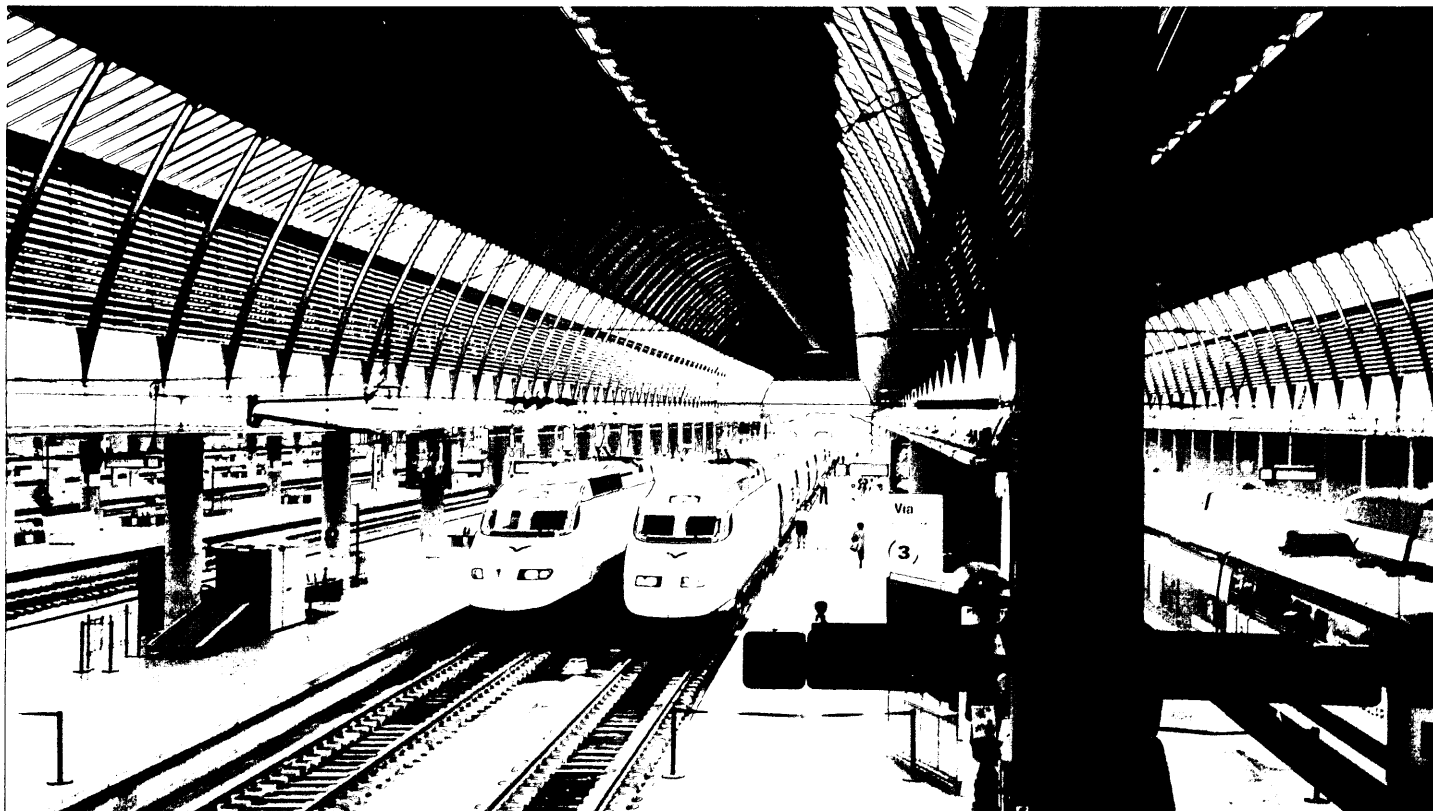
Como soporte de las cargas ferroviarias, la vía se asienta, en este caso, sobre una capa de balasto, constituida por un

granulado que amortigua las vibraciones transmitidas a la plataforma, y asegura el drenaje y evacuación rápida de las aguas superficiales.

Como consecuencia del incremento de las sobrecargas dinámicas que establece la circulación a velocidades próximas a 350 km/h, la necesidad de aumento de la calidad geométrica y la previsible disminución de los intervalos entre bateos sucesivos, hace conveniente dotar, como mínimo, de un espesor de 35 cm a la capa de balasto, aumentando a su vez la protección del mismo, lo cual se consigue dotando a la vía de una mayor elasticidad vertical.

La colocación de una primera capa o lecho de balasto en espesores del orden de 10 cm permitirá asegurar un volumen de bateo suficiente para mantener la estabilidad adecuada de la vía. Sobre este lecho, la colocación de traviesas de hormigón monobloque del peso suficiente para soportar, en su caso, los efectos derivados de la instalación en los vehículos del freno por corrientes de Foucault, supone, junto con un adecuado sistema elástico de sujeción, el mejor elemento de transmisión y reparto de cargas entre carril y plataforma portante. Un perfil de carril 60 E1 asegura un comportamiento óptimo del conjunto.

La utilización de bateadoras dotadas de equipos con corrección de la nivelación y alineación en acuerdos verticales y parabólicos, con registros continuos de los parámetros carac-



Estación de Santa Justa (Sevilla). Vía en placa tipo Stedef. Abajo detalle de vía en placa tipo Stedef con sujeción Nabla.

terísticos de la vía, con obtención de flechas y determinación de órdenes para efectuar la alineación y la nivelación, así como el uso de estabilizadoras dinámicas, permiten, mediante su aplicación en las operaciones de montaje y posterior mantenimiento, garantizar el nivel de fiabilidad, confort y seguridad requerido por las líneas de Alta Velocidad.

La Vía sin balasto

La vía sin balasto surge como respuesta a la necesidad de disminución de los trabajos de mantenimiento de vía, sin pérdidas en la estabilidad y seguridad en la marcha de los vehículos.

Con frecuencia englobada bajo la denominación de vía en placa, sustituye la plataforma de balasto por la de hormigón o asfalto. Con esto se pretende que los elementos del sistema de superestructura de vía se mantengan inmóviles en el tiempo, especialmente aquellos relacionados con la geometría de la vía. El nivel de mantenimiento se reduce hasta entornos del 50%, sustituyendo operaciones pesadas de bateo y posterior estabilizado, por pequeñas y normalmente rutinarias inspecciones del carril, sus soldaduras y del sistema de sujeción.

La construcción de una vía en placa exige tolerancias restrictivas superiores a las observadas con el balasto, dado que nivelación, alineación y ancho de vía deben ser vigilados con minuciosidad, huyendo de trabajos de reparación posteriores.



Una vez construida la losa, ya sea hormigón o asfalto, cualquier modificación o corrección se convierte en una costosa operación, frente a la misma situación con vía sobre balasto.

Si bien en la actualidad numerosos desarrollos de este tipo de sistema de vía se encuentran en período de concepción e incluso de pruebas avanzadas, se pueden englobar la mayoría de ellos en cuatro grupos especialmente diferenciados y con singularidades importantes:

▼ Sistemas de construcción *en capas*, formados por una serie de capas entre las que se encuentra la losa, ya sea de hormigón o de asfalto.

▼ Sistemas de construcción *monolítica*, en el que las traviesas están embebidas en la losa soporte de hormigón. Caracterizados principalmente por su alta resistencia mecánica y baja elasticidad.

▼ Sistemas de construcción *por bloques recubiertos de elastómero*, igualmente con traviesas introducidas en hormigón, si bien se recubren por su parte inferior de materiales elastoméricos y disipativos que modifican el comportamiento dinámico y aportan una mayor elasticidad al sistema.

▼ Sistemas de construcción *especiales*. Entre estos a su vez se encuentran varios modelos o concepciones de vía, desde las losas flotantes hasta construcciones sin traviesas, en las que el carril, apoyado en toda su longitud, se encuentra recubierto por un elemento de propiedades elásticas.

Si bien, como ya se ha indicado, existe una gran variedad de modelos, de losas, placas, e incluso de materiales, la experiencia actual de vías rápidas o muy rápidas fundamentadas en este tipo de sistemas, se reduce actualmente a líneas alemanas (con velocidades en el entorno de los 250 km/h), japonesas y proyectos en estudio y desarrollo en los Países Bajos, donde los condicionantes geológicos y geotécnicos –escasa y costosa piedra de gran calidad–, sociales o poblacionales –trayectos no demasiado largos y con alternativas existentes–, priman sobre las necesidades de competencia, en cuanto a tiempos de trayecto se refiere, con otros medios de transporte, caso de la anteriormente denominada Europa mediterránea.

RESPUESTAS DE LA VÍA CON BALASTO

En el diseño de una vía con balasto de alta calidad ha de prevalecer siempre la relación fiabilidad-seguridad-disponibilidad y mantenimiento, persiguiéndose un sistema de reparación o reemplazo sencillo, eventualmente por partes, con medios, actualmente muy sofisticados y de alto rendimiento como son las bateadoras. Esta filosofía se opone a la que rige las obras de fábrica, en las que exigencias constructivas, y por ello tareas de reparación y sustitución, imponen un largo periodo de vida útil, así como unos márgenes considerables en relación con los riesgos anticipados.

La vía con balasto ha sido el primer medio descubierto para permitir, con una estructura reducida, dar capacidad portante a suelos de baja resistencia, no aptos más que para vehículos automóviles. Es este criterio mecánico de capacidad portante el que parece primordial en los diferentes tipos de superestructura, si bien hoy en día se ha abandonado su apli-

cación sobre terrenos débiles, de forma particular sobre nuevas líneas, sin duda para el uso en la construcción de medios mecánicos que exigen suelos con suficiente resistencia.

En una vía con balasto, para limitar los efectos de fatiga en la plataforma, los esfuerzos generados en el contacto rueda/carril son transmitidos al suelo con una importante reducción, tanto en superficie (efecto de la parrilla de vía, realizado por la combinación de un elemento longitudinal como es el carril con elementos transversales al mismo, las traviesas), como temporal en caso de choque (debido a la elasticidad y capacidad de amortiguación de los diferentes elementos, en particular el balasto).

Tomemos por ejemplo la limitación vertical: una rueda ejerciendo un esfuerzo estático de 10 Tn puede crear localmente una carga de 17 Tn, teniendo en cuenta los efectos dinámicos, repartida sobre algunos centímetros de superficie en cabeza de carril; este rango de limitaciones, del orden de 4t/cm² (400 Mpa), debe estar soportado por el subbalasto en un nivel compatible con el último, del orden de 4 Kg/cm² (0,4 Mpa). Se observa entonces que la vía con balasto realiza un esfuerzo del orden de 1000 veces la relación de trabajo entre el acero de la superficie de la cabeza del carril y del suelo portante. Esta amortiguación de esfuerzos está relacionada con el efecto de parrilla de vía realizado por el conjunto carril-traviesa.

Surge entonces la pregunta: ¿porqué no realizar una placa portante sobre el suelo, en la que reposen los carriles?

En efecto, las propiedades reológicas simples de la vía, elasticidad y amortiguamiento, son insuficientes para describir el funcionamiento de esta, dado que los materiales constitutivos trabajan muy frecuentemente en un dominio donde la adaptación plástica es esencial. Es el caso de desgaste de la superficie de la cabeza del carril, el mismo que en el balasto, material cohesivo pero en definitiva, *autorreparable*.

La modificación de las relaciones entre dos piedras unidas no conlleva la degradación de todo el conjunto de balasto en un punto, sino tan solo su adaptación a una nueva forma geométrica, sin modificaciones en su comportamiento global. No ocurre igual en una estructura monolítica como es la placa, en la que una modificación relevante de sus relaciones conlleva fisuraciones, por las que el funcionamiento de la placa se altera. La placa no es *autorreparable*, y la superficie portante sobre la que apoya puede estar sometida a deformaciones plásticas, frente a las que la placa ofrecerá escasas posibilidades de adaptación, salvo que se tomen precauciones particulares.

En la práctica y sobre todo en Alta Velocidad, se constata que la constitución de una placa monolítica sobre un suelo de poca capacidad portante no es posible, lo que conduce en principio a técnicas de consolidación de terrenos para al menos tratar de garantizar que, bajo el efecto de deformación del suelo y de gradientes térmicos, no se produce una fisuración que modifique el funcionamiento de la placa.

Por el contrario, sobre plataformas rígidas como viaductos o túneles, solo el incremento de coste asociado se opondría a la ejecución de placas, que ofrecen ventajas de cara al mantenimiento de la geometría de la vía.

Resistencia transversal

La vía con balasto, hasta ser estabilizada, presenta una resistencia lateral limitada tanto sin carga (por esfuerzos de tipo térmico) como cargada. Después de una operación de nivelación con bateadora, la vía ha perdido la mitad de su resistencia transversal, y tras un primer proceso de estabilización de 60.000 Tn de tráfico, o de una estabilización artificial dinámica, le permite recuperar el 50% de la perdida. Esta resistencia transversal es resultado en gran parte (casi exclusivamente para una vía cargada) del rozamiento de la cara inferior de la traviesa sobre el balasto, con un coeficiente de rozamiento de al menos 0,33.

Las exigencias de reducción de los esfuerzos transversales ejercidos por los vehículos, así como la resistencia aportada por las modernas vías sobre traviesas de hormigón, son suficientes para asegurar la seguridad en las circulaciones.

Desde el punto de vista de los esfuerzos térmicos, los grandes radios exigidos en los trazados de líneas nuevas dan un margen de confianza del mismo orden.

Por otra parte, la resistencia longitudinal de la vía con balasto es al menos igual a su resistencia transversal, dado que la superficie de rozamiento bajo traviesa es la misma, y en caras laterales es superior en el sentido longitudinal a la obtenida en el transversal. El coeficiente de rozamiento mínimo de 0,33 se obtiene únicamente a condición de que el sistema de sujeciones tenga una resistencia al deslizamiento superior, suficiente para asegurar la estabilidad de la vía bajo vehículos en los que la deceleración máxima no supere el valor de 0,25 g. Podemos entonces estar seguros de encontrarnos en el dominio elástico y de no provocar deformaciones permanentes en la zona de frenado.

Elasticidad

La elasticidad de una vía, entendida como la capacidad de esta para no producir deformaciones remanentes o permanentes, es un factor íntimamente ligado con el comportamiento dinámico del sistema rueda-carril, con la sollicitación a fatiga de los distintos elementos y por supuesto, con el confort del viajero.

En el sistema sobre balasto esta elasticidad se consigue con la interposición de elementos muelle, como son el balasto y normalmente elementos elastoméricos, como cauchos o termoplásticos de alta calidad, bajo carril. La acción de las cargas del tráfico sobre las diferentes rigideces de estos elementos supone una deflexión en sentido vertical, que se recupera con el cese de la carga.

Este comportamiento, que en líneas de Alta Velocidad viene asociado con vibraciones de alta frecuencia, debe ser estudiado en profundidad, adecuando en cada caso el binomio alta elasticidad – mayor fatiga del material y del carril, optimizando los valores prescritos en el balasto y en los componentes plásticos, y permitiendo reducir notablemente las tareas de mantenimiento.

Una elasticidad traducida en términos de deflexión o descenso vertical de carril bajo carga, del orden del milímetro representa sin duda la mejor solución al trinomio arriba planteado, fatiga de materiales/protección frente a cargas verticales/disminución de costes de mantenimiento.

En la vía con balasto la obtención de este valor es simple, fundamentada en rigideces de los elementos intermedios del orden de 100 KN/mm y una adecuada compactación del balasto. No lo es, sin embargo, en la vía sobre placa, donde al no existir balasto, su rango elástico debe compensarse incrementando notablemente el de los elementos situados entre capas o en la propia sujeción, afectando, en caso de conseguirlo a la durabilidad de los mismos.

Otras funcionalidades

Se ha planteado la deficiente adaptación de la vía sobre balasto a peraltes altos. Muy al contrario, se adapta con facilidad a trazados con valores de 180 mm practicados en nueva línea, soportando con fiabilidad además las variaciones de este en transiciones. Esto es consecuencia en parte del sistema de nivelación con bateadoras, que sitúa el balasto bajo la traviesa y evita imprecisiones de métodos en los que la cara inferior de las traviesas debe adaptarse a la geometría de un soporte existente.

Igualmente, las propiedades de absorción de ondas de presión en túnel por vías en balasto, han sido bien observadas por los japoneses, y permiten reducir considerablemente los efectos de las ondas sónicas a la salida de túneles; este aspecto no está presente, sin embargo, en la vía en placa.

La vía con balasto ofrece una mayor facilidad a la hora de la utilización de subsistemas como aparatos de dilatación, obras de fábrica y equipamientos de señalización. Además permite el drenaje de la vía, dado que las aguas recogidas se pueden percolar a través de la estructura permeable que constituye el balasto.

Esta facultad del balasto no necesita reservas particulares sobre el conjunto de la vía; con la salvedad hecha de una pendiente transversal o longitudinal del subbalasto, que significa una ventaja en líneas de doble vía, donde la misma sobre placa impone en curva sistemas de recogida y evacuación del agua.

En materia de emisiones acústicas, es de sobra conocido que la vía sobre balasto es menos ruidosa que en placa, debido al efecto de absorción del material por sí mismo. Por el contrario, en caso de vibraciones la vía con balasto no tiene

propiedades antivibrátiles intrínsecas, pero permite, con dispositivos complementarios, ya sean tapices elásticos bajo el balasto o suelas situadas directamente en la interface balasto-travesía, obtener unas atenuaciones del orden de 7 dB.

El proceso constructivo de una vía con balasto recorre etapas sucesivas hasta alcanzar un espesor de balasto que permita, en un estado relativamente poco avanzado de la construcción, soportar sobre la vía vehículos medidores de la geometría, que corrijan defectos de calidad en la construcción. Un sistema de este tipo permite al menos introducir procesos de control de calidad que puedan optimizar métodos, sin tener en cuenta resultados de una comprobación final. De esta forma la calidad de vía obtenida con los medios clásicos (bateadoras, niveladoras y dresinas) es al menos equivalente a lo realizado de forma más complicada en vía sin balasto. Las tolerancias alcanzables de nivelación son inferiores a 0,3 mm en construcción nueva, y el control de defectos de gran longitud de onda (entre 30 y 200 mm) se asegura con facilidad.

Por otro lado, los trabajos pesados de mantenimiento son en apariencia sencillos, dada la naturaleza en sí del material granular, relativamente fácil de cribar, cargar y descargar, al contrario que los materiales constitutivos de una vía en placa, hormigón o asfalto, que requieren una preparación previa a su manipulación.

En caso de disfunción de un sistema de vía en placa, ya sea por error de concepción (capacidad portante insuficiente de las capas, que derivan en una fisuración del hormigón), o debido a efectos externos (térmicos o de cohesión química del hormigón), la solución al problema implica con frecuencia disponer una estructura ferroviaria anexa para asegurar el tráfico. En el caso de vía con balasto, por el contrario, esta permite efectuar esos trabajos con una limitación de velocidad (actualmente 120 km/h en la línea de Alta Velocidad París-Lyon), conservándose así una gran parte de la capacidad de transporte de la línea.

Ahondando aún más en lo anterior, conviene recordar que los países que más utilizan la vía sin balasto, como son Alemania y Japón, disponen de líneas alternativas convencionales para poder desviar el tráfico en caso de interrupciones prolongadas.

Por el contrario, en España, las líneas de Alta Velocidad se construyen en ancho UIC, diferente al existente en la Red Convencional, lo que imposibilita cualquier encaminamiento alternativo.

ANÁLISIS DE COSTES

El análisis técnico comparativo entre la instalación de cada uno de los dos sistemas de vía no hace sino plantear de manera abierta el debate sobre su utilización. Es el análisis

económico el que, al final, aporta un dato más objetivo en la toma de decisiones.

El análisis económico que aquí se presenta, se fundamenta en el estudio de los costes que cada uno de los dos sistemas generan, es decir, se analizan dos aspectos especialmente relevantes, como son, los costes que denominaremos de inversión y que son los derivados de la instalación o colocación de la vía y de renovación (en el caso de la vía con balasto), y los producidos en los años de vida útil de la misma como consecuencia de las labores de mantenimiento o conservación periódica.

Todos ellos dependen e inciden directamente en la planificación y cumplimiento de los programas de explotación de las líneas y, por tanto, en las necesidades de disponibilidad existentes, por lo cual, en el análisis de la dualidad vía sin/con balasto, se debe tener en cuenta que un programa de explotación que maximice capacidades y utilización de vía, reduce la disponibilidad para tareas de mantenimiento, eleva sus exigencias y reduce la diferencia económica entre vía en placa y en balasto.

Es importante destacar que el análisis, técnico, pero fundamentalmente económico, debe ser tratado de manera singular para cada caso. Así, la diferencia geográfica es consecuencia, por ejemplo, de que los costes de la mano de obra sean sensiblemente diferentes en cada país; y también la calidad, cantidad y coste de la piedra de balasto varía en rangos del 50% de una zona a otra, etc.

TIFSA, dentro del marco del Proyecto de Definición Tecnológica de la Vía de Alta Velocidad, realizado conjuntamente con la Dirección de Proyectos del GIF, en el que se analizan desde todos los puntos de vista las distintas tipologías de vía y elementos destinados a este tipo de líneas, ha desarrollado un amplio estudio económico adaptado a la realidad de nuestro país, fundamentado en el método del VAN² (Valor Actual Neto del Proyecto) y anualidades equivalentes³, cuyos supuestos de partida, que configuran la metodología utilizada, son:

▼ Los proyectos de inversión objeto del estudio tienen distintas características: por un lado la instalación de vía en placa tiene una elevada inversión inicial y un menor coste de mantenimiento; por otro, el sistema de vía con balasto tiene una menor inversión inicial pero un coste de mantenimiento más elevado.

▼ Existe capacidad de la línea disponible, es decir, existe un periodo (normalmente nocturno) en el que se pueden realizar las operaciones de mantenimiento.

▼ Como consecuencia del punto anterior, el análisis se plantea, de forma general, como elección entre dos proyectos mutuamente excluyentes con diferente inversión inicial y costes de mantenimiento y cuya distinta duración es homogeneizada incluyendo renovaciones de vía cada 30 años en el caso de vía con balasto.

Los resultados obtenidos representarán en este caso el valor actualizado (al momento actual) de los costes. Por tanto, un valor superior, en valores absolutos, representará un menor valor económico o en otras palabras, aquel sistema con un mayor VAN será el más costoso respecto de aquel con un VAN menor.

Costes de inversión (inicial y de renovación)

Se han considerado como punto de partida los costes generales de construcción correspondientes a una vía con balasto para Alta Velocidad y se ha estudiado un "tramo tipo" de la línea Madrid-Barcelona, destinada a explotación a 350km/h.

Los costes de inversión inicial para el sistema de vía en balasto y los principales parámetros que se han considerado se presentan en el cuadro 1. En él se muestran tanto la información general correspondiente a la inversión como los valores incluidos en el presupuesto inicial de construcción.

Resumiendo, los costes de inversión inicial del proyecto en vía con balasto ascienden a 13.658 millones de pesetas para un tramo tipo de 100 km.

La inversión en renovación que se lleva a cabo cada 30 años asciende a 9.747 millones de pesetas. Esta inversión se distribuye en cuatro años entre el final y el inicio de cada ciclo (en el caso que nos ocupa el periodo de mayores necesidades de inversión según la curva de vida útil de los elementos -cuadro 3 del documento- se corresponde con los años 29 a 32). Las cuotas son anuales y ascienden a 2.437 millones de pesetas aproximadamente.

Sobre la base de los datos mostrados en el cuadro 1, y aplicando coeficientes, basados en experiencias previas de otras Administraciones, se han estimado los costes de inversión que corresponderían al proyecto, si este se hubiera realizado con vía en placa. (Cuadro 2).

Por tanto los costes de inversión inicial representan más del doble de los obtenidos en la vía con balasto y ascienden a 28.871 millones de pesetas.

**Cuadro 1. Desglose de los Costes de inversión Inicial para vía en balasto.
Caso de estudio, línea Madrid- Barcelona. Pesetas de 1999**

	Unidad de medida	Costes medios para 100Km de línea
a) Inst.tajos y trenes trabajo	Mill.de ptas.	2.600
b) Materiales puestos en obra	Mill.de ptas.	11.058
Balasto	Mill.de ptas.	1.862
Carriles	Mill.de ptas.	2.800
Traviesas+Sujeción	Mill.de ptas.	4.000
Aparatos	Mill.de ptas.	2.396
Total costes Inversión Inicial (Costes de superestructura)	Mill.de ptas.	13.658

Cuadro 2.-Estimación de los costes de inversión para vía en placa.

	Unidad de medida	Coeficiente de Incremento (1)	Costes medios para 100Km de línea
a) Inst.tajos y trenes trabajo	Mill.de ptas.	2,7	7.123
b) Materiales puestos en obra	Mill.de ptas.		21.748
Hormigón	Mill.de ptas.		5.877
Balasto	Mill.de ptas.	0,15	279
Carriles	Mill.de ptas.	=	2.800
Traviesas+Sujeción	Mill.de ptas.	2	8.000
Aparatos	Mill.de ptas.	2	4.792
Total costes Inversión Inicial	Mill.de ptas.		28.871

(1) Los coeficientes aquí mencionados han supuesto:

▼ Un incremento de casi tres veces en las instalaciones, tajos y trenes de trabajo debido al número y complejidad de los trabajos específicos que se realizan para la vía en placa, tales como: instalación de subbase mejorada, protecciones antiruido, encofradoras, acero de armaduras, tendido de armaduras, bombeo hormigón, hormigoneras, etc.

▼ Una reducción del 85% en el balasto debido a que este es únicamente necesario en los laterales, si se utiliza como sistema de absorción del ruido y en las transiciones.

▼ El mayor coste que se incluye para las traviesas, sujeciones y aparatos se basa en su mayor complejidad constructiva y en la utilización del propio hormigón de losa en el caso de estar constituida por este material.

Costes de mantenimiento

El coste de mantenimiento, para cualquier sistema, viene condicionado por un lado, por el deterioro, desgaste y las exigencias de calidad establecidas por la explotación, y por otro por los materiales instalados: traviesas, sujeciones y carril o placa según el sistema que se elija, vía con balasto o sin balasto. Es decir, vendrá determinado, tanto por la planificación/condiciones de explotación, como por las decisiones adoptadas en la inversión inicial.

Los costes de mantenimiento considerados incluyen el análisis del deterioro que sufren los distintos componentes de la superestructura:

▼ El balasto, su espesor, calidad, compactación y vida útil, alteran notablemente los costes de mantenimiento de una línea. Así, la cantidad y frecuencia de las operaciones de bateo suponen un coste añadido de gran magnitud.

▼ El desgaste de carril, ya que depende principalmente del tráfico que soporta la línea, o más concretamente de la carga por eje soportada. Dentro del sistema de explotación que caracteriza las vías de alta velocidad, es de gran importancia el análisis de la velocidad a la que circulan los trenes y cómo influye esta en el carril, su desgaste y los costes de mantenimiento asociados.

▼ En lo referente al resto de los elementos de la vía, estos tienen un deterioro que se corresponde principalmente con un deterioro temporal.

Otro elemento fundamental, en la determinación de los costes de mantenimiento es el comportamiento de estos con respecto al tráfico que soporta la línea. En la actualidad, se desconoce la forma funcional exacta que relaciona los costes de mantenimiento y la evolución del tráfico, pero en cualquier caso, se pueden establecer, por la experiencia adquirida en las labores de mantenimiento, los siguientes datos correspondientes a la vida útil de los elementos instalados (Cuadro 3).

Con objeto de analizar la influencia que el tipo y cantidad de tráfico tienen sobre el deterioro de los materiales y por tanto la necesidad de su conservación, el estudio supone unos determinados "escenarios" previsibles de tráfico, que sirven de base para la realización de las hipótesis de mantenimiento consideradas.

▼ Escenario 0: Escenario de partida, con un programa de explotación y por tanto con unos costes de mantenimiento extrapolados (al caso que nos ocupa) de los correspondientes a la línea de Alta velocidad Madrid-Sevilla.

▼ Escenario 1: Incremento de tráfico respecto del anterior en un 50%, lo que supone pasar de un total de 21.500 circulaciones reales en 1997 (Cirtra⁴ 1998) a 43 circulaciones medias diarias por sentido incluyendo lanzaderas y otros productos diferentes al tren de Alta Velocidad. Con este incremento del tráfico se estima que el incremento del coste de mantenimiento será del 10%.

▼ Escenario 2: Incremento de tráficos mayor, del orden del 75% (aproximadamente 50 circulaciones reales en total por sentido y día), estimando un in-

Cuadro 3. Vida útil de los principales elementos de vía

Concepto	Vida útil (Mill. Tn Brutas)	Vida útil (años)
Carril de vía convencional UIC-60	300	30-35
Carril sobre vía en placa UIC-60	400	35
Placas elásticas sobre vía en placa	250	20
Losa	975	60-65
Traviesas hormigón	500	30-40
Balasto silíceo	300	25-30

cremento en los costes de mantenimiento del orden del 15%.

▼ Escenario 3: Incremento del 100% en el número de circulaciones, produciendo un incremento en los costes de mantenimiento anuales del orden del 20%.

Para el caso español, se han extrapolado para el caso que nos ocupa (Madrid-Barcelona) los datos facilitados por la Dirección de Infraestructura del AVE que hacen referencia al mantenimiento corriente de una línea de Alta Velocidad sobre balasto durante los primeros 30 años de servicio.

Estos costes no comprenden la renovación de materiales constitutivos que se necesiten durante ese periodo de tiempo. (Cuadro 4).

Este coste se considera constante para los 30 años de vida útil de las instalaciones, simplificándose otras consideraciones como posibles degradaciones de la vía según se aproxima el final de la vida útil de las instalaciones, pues este concepto está recogido por el coste de renovación.

Si suponemos que los costes de mantenimiento varían en relación directa con el tráfico soportado en el tramo, el coste de mantenimiento variará según los escenarios:

Cuadro 4. Estimación del coste de mantenimiento por kilómetro de línea durante sus primeros 30 años de vida. Vía sobre balasto. Condiciones económicas de 1999

Designación de los trabajos	Costes de mantenimiento. (Mill. Pts. en 100km línea)
Abastecimiento y mantenimiento del material y de herramientas: balasto, pequeños materiales, herramientas, soldaduras, vehículos.....	12,05
Mantenimiento de la geometría: bateado, enderezado.	
Coste de personal	155,62
Amolado.....	4,22
Aparatos de vía: material y geometría.	83,13
Personal de dirección, de control y de vigilancia	30,12
Mantenimiento de cercados, taludes y desherbado	25,68
Reparaciones excepcionales: material y geometría	65,86
Total	376,68

Cuadro 5. Estimación del coste de mantenimiento para 100 km de línea. Precios de 1999

Designación de los trabajos	Vía con balasto	Vía en placa	
	Ctes. Mantenimiento (Mill. ptas./ 100km)	Coef. reducción estimado	Ctes.Mantenimiento (Mill. ptas./ 100km)
Abastecimiento y mantenimiento del material y de herramientas: balasto, pequeños materiales, herramientas, soldaduras, vehículos.....	12,05	20%	9,64
Mantenimeinto de la geometría: bateado, enderezado.			
Coste de personal.....	155,62	90%	15,56
Amolado	4,22	20%	3,37
Aparatos de vía: material y geometría	83,13	30%	58,19
Personal de dirección, de control y de vigilancia.....	30,12	0%	30,12
Mantenimiento de cercados, taludes y desherbado.....	25,68	20%	20,55
Reparaciones excepcionales: material y geometría.....	65,86	45%	36,22
TOTAL.....	376,68	54%	173,66

▼ Escenario 0: Los costes de mantenimiento ascienden a 376,68 millones de pesetas para 100 km de línea.

▼ Escenario 1: 10% de incremento sobre los costes anteriores lo que significa 414,35 es de pesetas para 100 km de línea.

▼ Escenario 2: 15% de incremento sobre los datos base, los costes de mantenimiento ascienden a 433,18 millones de pesetas para 100 km de línea.

▼ Escenario 3: Coste de mantenimiento de 452,02 millones de pesetas para 100 km de línea, teniendo en cuenta las hipótesis realizadas sobre el supuesto base de un incremento del 20% del coste de mantenimiento debido a un incremento del tráfico del 100%.

En lo referente al coste de mantenimiento de la vía sin balasto, y debido a la reducida experiencia española, circunscrita a pequeños tramos, hemos tomado como referencia los coeficientes de reducción de los costes de mantenimiento considerados por otras Administraciones Europeas que toman como hipótesis de partida una buena construcción tanto en la infraestructura como en la superestructura y mantenimiento de las calidades a un nivel aceptable. (Cuadro 5).

Este coste se extiende a lo largo de los 60 años de vida útil de la vía en placa y, como en el caso anterior, se mantiene constante para el periodo considerado teniendo en cuenta los siguientes escenarios:

▼ Escenario 0: Los costes de mantenimiento ascienden a 173,66 mill.de ptas.

▼ Escenario 1: El coste de mantenimiento de vía en placa es de 191 mill.de ptas.

▼ Escenario 2: Tiene un coste total de mantenimiento de 199,70 mill. ptas.

▼ Escenario 3: 208,39 millones de pesetas como coste total de mantenimiento.

Una vez definida la inversión inicial y renovaciones, los flujos anuales y la vida útil de cada una de las inversiones, analizaremos los resultados obtenidos del Valor Actual Neto (VAN) y anualidades equivalentes.

Resultados del VAN y anualidades equivalentes

A continuación se resumen los distintos escenarios con los costes considerados, los resultados obtenidos para el VAN que se calculan partiendo de un coste de inversión: inicial y de renovación (en el caso que corresponda) y unos flujos anuales, constantes (para el periodo considerado) y equivalentes a los costes de mantenimiento. (Cuadro 6).

Con los datos anteriores que hacen referencia únicamente a los costes, los resultados obtenidos para el VAN y las anualidades equivalentes son los mostrados en los cuadros 7 y 8.

Los datos referentes al VAN son considerados en términos absolutos, de esta forma los costes que representan significan mayores necesidades de desembolso en aquellas inversiones con un VAN mayor.

CONCLUSIONES

El debate sobre la idoneidad de instalación de vía con o sin balasto en líneas nuevas, y principalmente destinadas a Alta Velocidad, está y probablemente seguirá durante mucho tiempo abierto a todo tipo de estudios y opiniones. No obstante y como se ha venido insistiendo en el presente estudio, cada situación, cada Administración Ferroviaria, cada condición geográfica y

Cuadro 6. Resumen de los escenarios calculados. Millones de pesetas para el año 1999

ESCENARIO 0

Vía en BALASTO

Costes de Inversión inicial	13.658
Costes de Mantenimiento (anuales)	376,68
Costes de Renovación (anuales por 4 años)	2.436,75

Vía en PLACA

Costes de Inversión inicial	28.871
Costes de Mantenimiento (anuales)	173,66

ESCENARIO 1

Vía en BALASTO

Costes de Inversión inicial	13.658
Costes de Mantenimiento (anuales)	414,35
Costes de Renovación (anuales por 4 años)	2.436,75

Vía en PLACA

Costes de Inversión inicial	28.871
Costes de Mantenimiento (anuales)	191,02

ESCENARIO 2

Vía en BALASTO

Costes de Inversión inicial	13.658
Costes de Mantenimiento (anuales)	433,18
Costes de Renovación (anuales por 4 años)	2.436,75

Vía en PLACA

Costes de Inversión inicial	28.871
Costes de Mantenimiento (anuales)	199,70

ESCENARIO 3

Vía en BALASTO

Costes de Inversión inicial	13.658
Costes de Mantenimiento (anuales)	452,02
Costes de Renovación (anuales por 4 años)	2.436,75

Vía en PLACA

Costes de Inversión inicial	28.871
Costes de Mantenimiento (anuales)	208,39

económica, presenta singularidades que obligan a estudiar cada caso como independiente de los demás.

¿Hasta qué velocidad se puede circular sobre balasto? Los conocimientos adquiridos hasta el momento no presentan límite a esta pregunta. Experiencias europeas han probado, a nivel de ensayo, que se puede circular a 500 km/h. Eso sí, garantizar el adecuado estándar de seguridad y confort, requerirá un gran esfuerzo para asegurar la alta calidad de los materiales en su instalación y permitir una alta vida útil de los mismos en buenas condiciones, mejorando para ello técnica y económicamente los sistemas generales de mantenimiento de las vías férreas.

La tipología como sistema de la vía con balasto, se encuentra hoy en día perfectamente definida y consolidada. Las posibles variantes del sistema, como son los aparatos de vía, la elasticidad, el contacto rueda-carril, etc, no afectan a su concepción general.

No existe, por el contrario, una tipología de vía sin balasto que goce de la aprobación unánime, ni de la experiencia garantizada a velocidades superiores a 250km/h.

Desde el punto de vista meramente económico, el estudio realizado aporta resultados cuyo análisis, en términos de VAN y anualidades, se recogen en los cuadros 9 y 10.

La conclusión resulta clara: según se deduce de la comparación económica, la pretendida ventaja económica de la vía sin balasto, hemos comprobado que hoy, y en España, no es tal, ni siquiera contemplada en un horizonte tan dilatado como el anteriormente indicado de 60 años.

Debemos destacar otras cuestiones que no son puramente económicas pero que afectan a la valoración que se vaya a realizar sobre los dos sistemas. Así:

- ▼ En zonas urbanas, menor disponibilidad y capacidad para el mantenimiento pueden recomendar técnicamente la utilización de vía en placa.
- ▼ Por el contrario y desde un punto de vista social, el mencionado sistema de vía en placa puede estar no recomendado por la contamina-

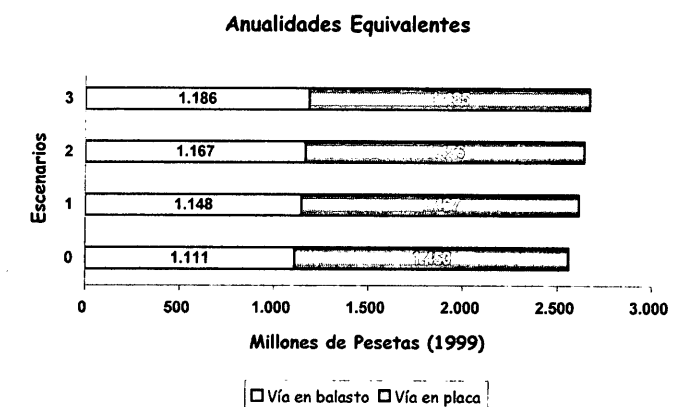
Cuadro 7. Resumen de los datos obtenidos para el VAN. Valores en millones de pesetas de 1999

	VAN			
	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Vía en Balasto	25.129	25.982	26.408	26.834
Vía en Placa	32.800	33.193	33.389	33.586

Cuadro 8. Resumen de los datos obtenidos en el calculo de las Anualidades equivalentes. Valores en millones de pesetas de 1999

	ANUALIDADES			
	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Vía en Balasto	1.111	1.148	1.167	1.186
Vía en Placa	1.450	1.467	1.476	1.485

Cuadro 9.-Resumen VAN para los escenarios considerados.



ción acústica que produce si tenemos en cuenta cuestiones medioambientales. Por su parte, esta situación se puede reducirse mediante diferentes sistemas de absorción de ruido que se han desarrollado a tal efecto.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que el análisis que aquí se presenta es una fotografía actual que puede modificarse teniendo en cuenta:

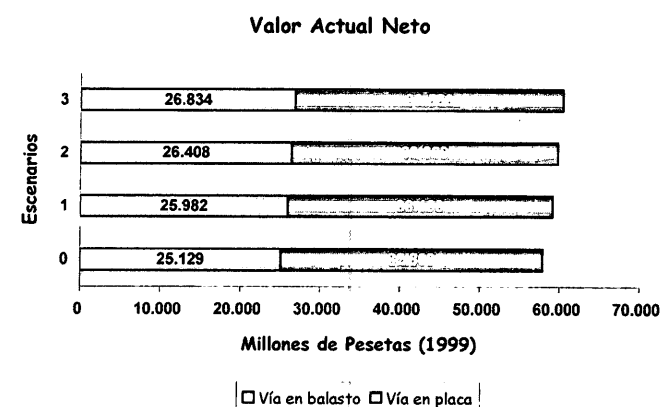
- ▼ Que uno de los factores que inciden en el aumento del coste de la vía en placa es la falta de materialización en la construcción de la misma; una vez se haya resuelto este problema, puede que se produzca una reducción en los precios que hagan esta opción más competitiva frente a la vía en balasto.
- ▼ La incorporación de nuevos materiales para uso ferroviario, como productos asfálticos, puede hacer mejorar algunos de los problemas de la superestructura sobre placa, como son el problema de la capacidad portante de la estructura soporte y su coste.

Sirva por tanto el presente estudio de apoyo para permitir mantener abierto, consecuentemente, el debate entre expertos, ingenieros constructores y mantenedores del ferrocarril. Para Alta Velocidad, ¿vía con o sin balasto?

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Definición Tecnológica del Equipamiento de la Vía para la línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera francesa, tramo Madrid-Lleida. GIF-TIFSA.
- Diseño e implantación de la vía sin balasto en RENFE. RENFE-TIFSA.
- Congreso Nacional de Ingeniería Ferroviaria: Ferroviaria 98. Universidad da Coruña.
- Feste Fahrbahn. Edition ETR.

Cuadro 10.-Resumen ANUALIDADES EQUIVALENTES para los escenarios considerados.



- BREALEY, R. Y MYERS, S. (1996), Fundamentos de financiación empresarial. Mc Graw Hill.
- Estradé Penadés, Joan Manuel (1998). "La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad de nuestro país" Revista de Obras públicas N° 3.372, Enero 1998.
- Henn, M.W. et Brise, M.W. (DE-CONSULT) (1989). Comparaison systématique entre la voi ballastée et la voi sans ballast (voie sur dalle) avec une étude de rentabilité.
- SUÁREZ SUÁREZ, A. (1990), Decisiones óptimas de inversión y financiación en la empresa. Pirámide.
- TERMES, R. (1997), Inversión y Coste de Capital. Manual de Finanzas. Mc Graw Hill. ■

NOTAS

1. Este estudio es continuación de los trabajos que, en el seno del "grupo de trabajo para el desarrollo de la vía en placa" constituido por técnicos de RENFE, Ministerio de Fomento, TIFSA, se han venido realizando a lo largo de los últimos años.
2. El cálculo del VAN se realiza a través de la siguiente fórmula:

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1+k)} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n} = -A + \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{(1+k)^j}$$

donde: A representa el valor de la inversión inicial, Q contiene el valor de los costes de mantenimiento anuales que al no considerar los ingresos tendrá valores negativos y serán constantes para el periodo considerado y k es el tipo de interés, que se considera del 4%. Los valores considerados del VAN serán tomados en valores absolutos ya que al representar los costes del proyecto tendrán, todos ellos, valores negativos. En pura teoría económica, al considerar únicamente los costes del proyecto, lo que se calcula no es propiamente un VAN sino los Valores Actualizados de los costes considerados.

3. El cálculo de la anualidad equivalente se realiza aplicando a los valores obtenidos del VAN el siguiente factor denominado de anualidad: $(1/k) - (1/(k(1+k)^n))$

Donde k es el valor del tipo de interés y n es el periodo de la inversión.

4. Dirección de Planificación Control de Gestión y Sistemas de Información, U.N. Circulación de RENFE (1998). Informe CIRTRA. Este informe recoge la información referida a las características de la red ferroviaria y circulaciones de trenes de RENFE.