

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto BITUVÍA)

En este artículo se describe un nuevo diseño de vía en placa bituminosa, como alternativa a las patentes europeas más extendidas (GETRAC y ATD), exponiéndose los resultados obtenidos dentro del proyecto BITUVÍA, en el que, mediante la instrumentación de un banco de pruebas a escala real y la acción de un Dispositivo Excitador de Vía (DEV), especialmente diseñado y construido dentro del proyecto, se ha podido validar el diseño propuesto, simulando sobre la vía, la acción de un tren de alta velocidad durante su periodo de servicio.

Palabras clave: Bituvía, vía en placa bituminosa, vía de alta velocidad, tren de alta velocidad

A new design of bituminous slab track as an alternative to more extended European patents (GETRAC and ATD) is described in this article. The results of BITUVIA project are showed, implementing a test scale and the action of a Device Railway Exciter (DEV), specially designed and built within the project. Validation of proposed design was possible by simulation of the action of a high-speed train during their period of service on the track.

Keywords: Bituvía, bituminous slab track, high-speed track, high-speed train

José Ramón López, jrlopez@pavasal.com
Jesús Felipo, jfelipo@pavasal.com

Pavasal

Francisco Sánchez, fsanchez@precon.cemolins.es
Marín Cuzic, mcuzic@precon.cemolins.es

Precon

Antonio Martínez, ambuen@gecival.es
Iván Guilló, ivguipe@gecival.es

Gecival

Guillermo Ares, tmetalbierzo@gmail.com
Beatriz Ángel, beatrizangelbarba@gmail.com

T-Metal

Julia Real, jureahe@tra.upv.es
Laura Montalbán, laumondo@cam.upv.es

UPV

ha pasado de unas velocidades relativamente pequeñas a velocidades que rondan los 300 km/h; ello conlleva cambios profundos en las sollicitaciones que sufre la vía de alta velocidad.

Actualmente existen principalmente dos tipologías de vía diferentes para ferrocarril, la vía convencional de balasto y la vía en placa. Esta última, a su vez, puede estar formada por hormigón o mezclas bituminosas, con o sin carril embebido.

La vía convencional de balasto se caracteriza por disponer traviesas de hormigón embebidas dentro de un lecho de balasto. El inconveniente principal de este tipo de vías es su elevado coste de mantenimiento, viéndose este problema fuertemente incrementado con los nuevos requerimientos exigidos al ferrocarril: altas velocidades de recorrido y elevadas cargas por eje.

Las vías en placa de hormigón destacan, respecto a las de balasto, por su comportamiento monolítico. Por esta razón, su mantenimiento es mucho menos frecuente y, por lo tanto, los costes a largo plazo son mucho menores. Por otra parte, se evita el problema del vuelo del balasto a altas velocidades de circulación. Sin embargo, su inconveniente principal reside en su alta rigidez a flexión. Este hecho provoca que la vía apenas pueda soportar los asientos diferenciales de las capas granulares inferiores y por lo tanto tenga una facilidad notable para fisurarse e incluso colapsar sobre todo en tramos de vía con alturas de relleno considerables.

1. Introducción

Durante los últimos años del pasado siglo, en el ámbito del ferrocarril, se ha producido una transformación espectacular; se

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

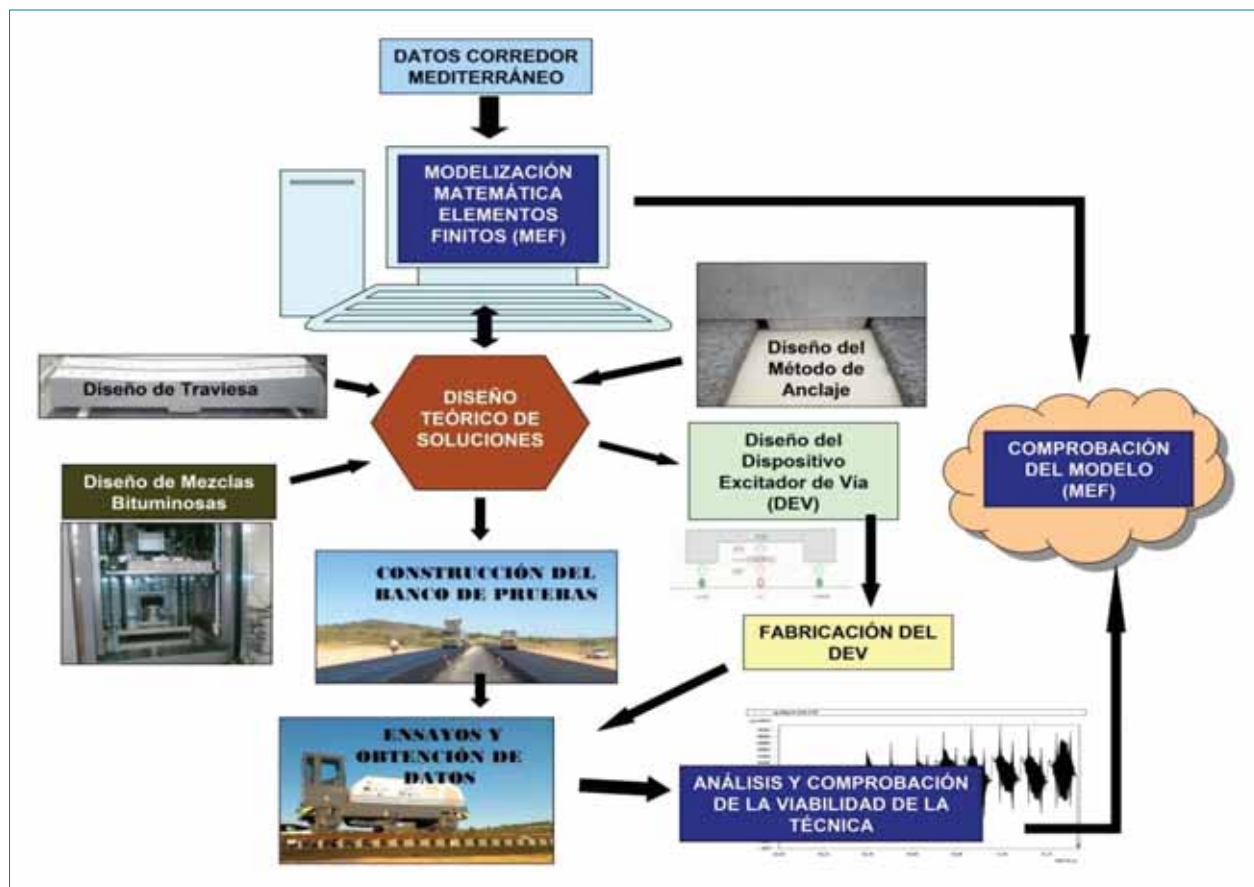


Figura 1. Esquema del proceso seguido en Bituvia.

Por su parte, las vías en placa constituidas por mezclas bituminosas ofrecen las ventajas que se comentaban para cualquier tipología de vía en placa y, además, disponen de mayor capacidad para admitir elevados asientos diferenciales, propios de rellenos de altura considerable. Adicionalmente, favorecen la atenuación de vibraciones provocadas por el paso de vehículos y la reducción del nivel de ruido emitido.

Estas características hacen que las vías en placa de material bituminoso sean adecuadas para el sector del ferrocarril de altas prestaciones. Desde hace varias décadas, existen diversos sistemas y patentes que han sido desarrollados, principalmente en Alemania, entre los que destacan: el sistema GE-TRAC (German track Corporation) y el sistema ATD (Asphalt Railspan Direct Support), que han sido probados en España (Corredor Mediterráneo), aunque actualmente no existe ninguna tecnología o patente desarrollada en nuestro país.

Con la idea de desarrollar técnicas propias en este sector, surge el Proyecto BITUVÍA "Proyecto, diseño, análisis, construcción y homologación de una nueva vía en placa de mate-

rial BITUminoso para líneas ferroviarias de alta VelocIdAd". Este proyecto comenzó a desarrollarse a principios de 2010 y lo lleva a cabo un consorcio de empresas privadas junto con la Universidad Politécnica de Valencia. El consorcio de empresas está formado por las empresas valencianas PAVASAL y GECIVAL, la leonesa T-METAL y la madrileña PRECON. El proyecto tiene un presupuesto de 3,2 millones de euros y está cofinanciado por el CDTI.

El objetivo que persigue este proyecto es el diseño de un nuevo sistema de vía en placa mediante el desarrollo de una mezcla bituminosa que sustituya al balasto granular. El proyecto también contempla el diseño de una traviesa compatible con la nueva configuración, además del desarrollo de una máquina que sea capaz de inducir a la vía acciones similares a las que va a estar sometida durante su vida útil para validar su respuesta y comportamiento, antes de su puesta en servicio.

A continuación, se expone el proceso seguido en el proyecto y las conclusiones obtenidas hasta el momento.

2. Desarrollo y calibración de los modelos matemáticos

Para poder emprender la tarea de diseño de la vía en placa bituminosa y realizar el estudio teórico del comportamiento estructural de la misma, se ha recurrido a métodos de modelización matemática, utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Utilizado el programa ANSYS, se puede reproducir virtualmente el comportamiento estructural de las diferentes capas de los materiales integrados en la propia vía, simulando las cargas que verdaderamente transmite el ferrocarril a su paso y resultando así un análisis más rápido, versátil y económico que la realización de multitud de prototipos a escala real.

El MEF emplea métodos de discretización espacial y temporal, mediante la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos. La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos, llamados nodos.

Sin embargo, no debemos olvidar que esto no deja de ser un método aproximado de cálculo, debido principalmente a las hipótesis básicas seleccionadas. Por lo que, para validar-lo, debemos apoyarnos en experiencias reales, que depuren las variables introducidas y nos permitan su utilización para futuros diseños.

Para ello, dentro del proyecto, se han empleado las experiencias de vía en placa bituminosa realizadas hasta el momento en España, llevadas a cabo en el tramo experimental

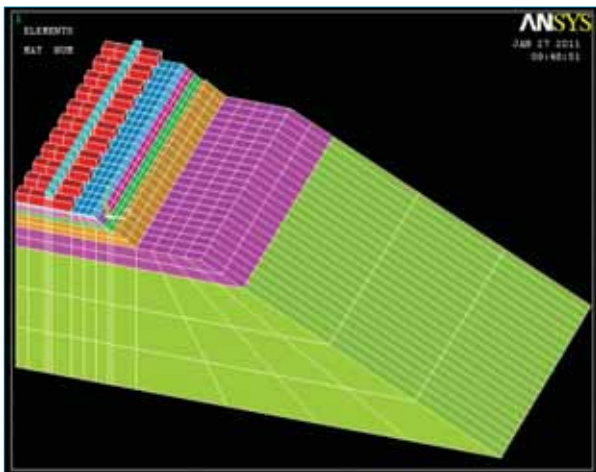


Figura 2. Representación gráfica del programa ANSYS.

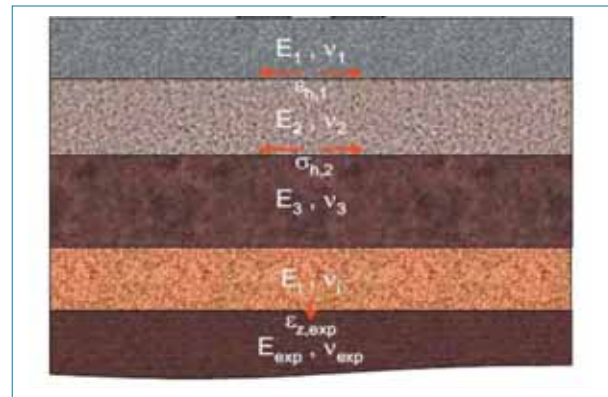


Figura 3. Representación de resultados de modelización.

de Benicàssim, de la línea Valencia-Barcelona (Corredor del Mediterráneo) en las que, aprovechando la construcción de este corredor, se realizaron seis sistemas distintos de vía en placa. Cuatro de ellos sobre hormigón (Edilon, Rheda Dywidag, Rheda 2000 y Stedef) y dos de ellos son sobre asfalto (ATD y GETRAC).

Los tramos anteriormente citados están totalmente monitorizados, por lo que se dispone de una información muy valiosa de ciertas magnitudes, que definen con precisión el comportamiento estructural de las secciones de vía. Gracias a estos datos, se ha podido recrear y calibrar el modelo numérico basado en elementos finitos, capaz de representar el estado tenso-deformacional de la vía.

Una vez calibrado el modelo, se está en disposición de poder diseñar y estudiar diversas configuraciones de vía, en la que los datos resultantes de la modelización son parámetros que definen el comportamiento a fatiga de cada material:

- Tensiones verticales máximas transmitidas por la traviesa.
- Máxima deformación horizontal de tracción en la fibra inferior de la mezcla bituminosa.
- Máxima tensión horizontal de tracción en la fibra inferior de las capas tratadas.
- Máxima deformación vertical de compresión en la fibra superior de los materiales granulares como la capa de forma o la explanada.

3. Diseño de la nueva vía en placa

En esta tarea se trataba de dar respuesta a todas las unidades que componen y acompañan a la vía en placa. En primer lu-

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

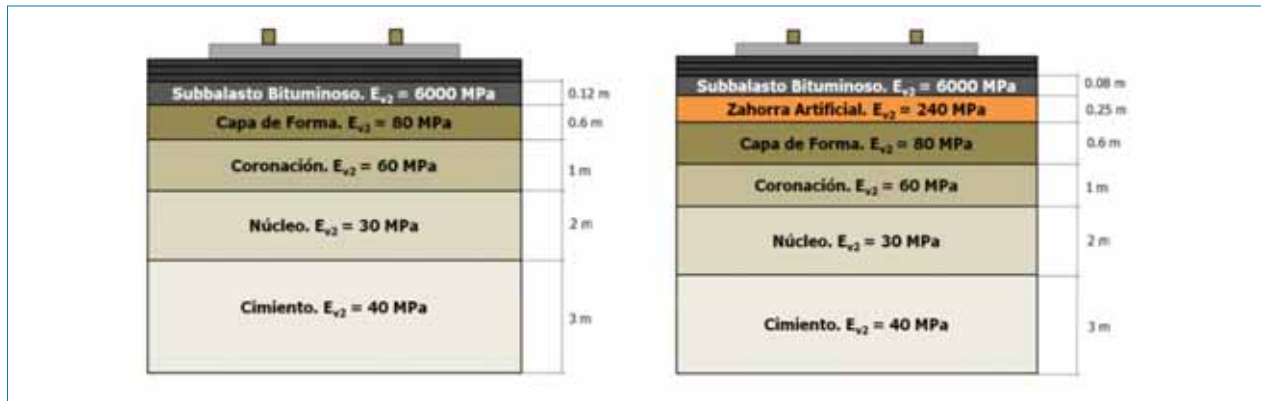


Figura 4. Sección A Bituvia / Sección B Bituvia

gar, el estudio de sección estructural que supone la definición de la infraestructura y la superestructura de la losa a diseñar (materiales y procedimiento de ejecución), en segundo lugar, el dimensionamiento de la traviesa y sus sujeciones, y por último, el método de anclaje de la misma a la superficie de la losa.

3.1 Secciones estructurales seleccionadas

Debido a la naturaleza del proyecto, de todas las secciones propuestas originalmente se seleccionaron para estudio aquellas que no contuviesen en su sección capas tratadas con cemento (suelo cemento y/o gravacemento) y, además, en las que la capa de subbalasto estuviese formada también por una mezcla bituminosa.

Introduciendo las características mecánicas de los materiales y las diferentes configuraciones ideadas para la vía, se obtiene mediante el MEF, los resultados de tensiones y deformaciones para cada capa. Con esto y con las curvas de fatiga de los diferentes materiales, se puede obtener el criterio

de fallo estructural para un número especificado de ciclos o años establecidos.

Para este estudio, el criterio de diseño se ha establecido en 50 años, que para la frecuencia de paso anual de referencia (AVE Madrid-Valencia), tenemos 6,4 millones de ciclos. En estas circunstancias, la fatiga en la explanada resultaba ser el criterio más limitante. En todos los casos, los criterios de diseño se han comprobado variando los espesores y materiales de la superestructura, conservando la misma infraestructura.

Con respecto a la losa bituminosa, las dos secciones mostradas presentan el mismo tipo de materiales y capas, pero diferentes espesores.

La disposición de la sección A está diseñada para su colocación sobre la superficie del subbalasto en cualquiera de las infraestructuras estipuladas por el ADIF, mientras que en la sección B se ha querido realizar algo diferente, buscando sustituir parte de la capa de mezcla bituminosa por una capa equivalente de carácter granular, en forma de zahorra artificial que se ha dispuesto debajo de la capa de subbalasto bituminoso.

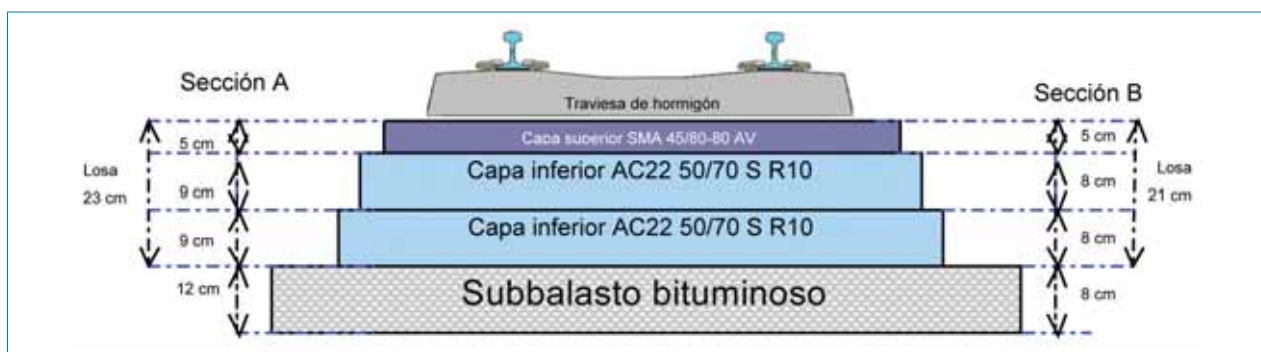


Figura 5. Representación de la sección de la losa bituminosa.

Tabla 1. Características mecánicas de la mezcla empleada en las capa inferiores AC 22 BIN 50/70 S R10.

Parámetro	Norma	Resultado	
AC22 50/70 S R10			
Contenido de ligante	UNE- EN 12697:39	S/M	4,4%
Densidad máxima	UNE- EN 12697:5	D _{máx}	2.545 kg/m ³
Densidad aparente	UNE- EN 12697:6	D _{aparente}	2.439 kg/m ³
Huecos mezcla	UNE- EN 12697:8	H _{mezcla}	4,2%
Huecos árido	UNE- EN 12697:8	H _{árido}	14,5%
Huecos rellenos	UNE- EN 12697:8	H _{rellenos}	71,3%
Estabilidad	UNE- EN 12697:34	Est	16,6 KN
Deformación	UNE- EN 12697:34	Def	2,4 mm
Tracción probetas en seco	UNE-EN 12697:23	ITS _{seco}	2,27 KPa
Tracción probetas en húmedo	UNE-EN 12697:23	ITS _{húmedo}	2,60 KPa
Sensibilidad al agua	UNE-EN 12697:12	ITSR	87,6%
Ensayo de rigidez	UNE-EN 12697:26	Módulo	7.867 Mpa
Ensayo en pista	UNE-EN 12697:22	WTS	0,04
Ensayo fatiga cuatro puntos 23 Hz	UNE-EN 12697	6,4 x 10 ⁶ ciclos	89 μm/m
Ensayo fatiga cuatro puntos 23 Hz	UNE-EN 12697	10 ⁶ ciclos	120 μm/m

En las pruebas realizadas se han empleado tres tipos de mezcla bituminosa diferentes. La primera se extiende encima de la capa de forma y constituye el subbalasto bituminoso; las otras dos forman la losa propiamente dicha, objeto de estudio de este proyecto.

La losa se divide en dos tipos de mezclas para ambas secciones, dispuestas en tres capas. En la parte superior se ha colocado una mezcla especial tipo SMA16 45/80-80 AV. Debajo de ésta se colocan dos capas compuestas por una única mezcla, que corresponde al huso de una AC22 BIN 50/70 S R10. En este caso, se ha optado por una mezcla reciclada al 10%, ya que, como se explica más adelante, se pretende aprovechar el material fresado que resulta del proceso de anclaje entre la traviesa y la losa. Esta mezcla permite ser sustituida por una mezcla AC22 BIN 35/50 S, en la que no se incorpora reciclado, sin que se alteren sensiblemente los resultados de la estructura.

Las características mecánicas de las capas inferiores se muestran en la Tabla 1.

Debido al comportamiento a flexión de la losa, las capas inferiores son las que más trabajan a tracción, siendo así las

que más van a sufrir el fenómeno de la fatiga, por lo que se han realizado diversos ensayos de laboratorio, que han permitido la obtención de las leyes de fatiga del material.

La ley utilizada finalmente para la comprobación estructural de la capa inferior es la correspondiente a una excitación cíclica a 23 Hz, que corresponde a la frecuencia de paso de ejes de un mismo bogie de un tren de alta velocidad circulando a 300 km/h (Figura 6).

Capa superior:

Los criterios de diseño de la capa superior obedecen a un estudio más elaborado. La selección de esta mezcla ha surgido de un análisis multicriterio, en el que se han ponderado los parámetros técnicos que se consideraban más relevantes para su correcto funcionamiento: características mecánicas convencionales (módulos de rigidez, fatiga, sensibilidad al agua, estabilidad, deformación, etc.), condiciones de permeabilidad, "resistencia al punzonamiento" y criterios de tipo económico y medioambiental.

De todas estas características, cabe destacar "La resistencia al punzonamiento", entendida como "la resistencia que

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

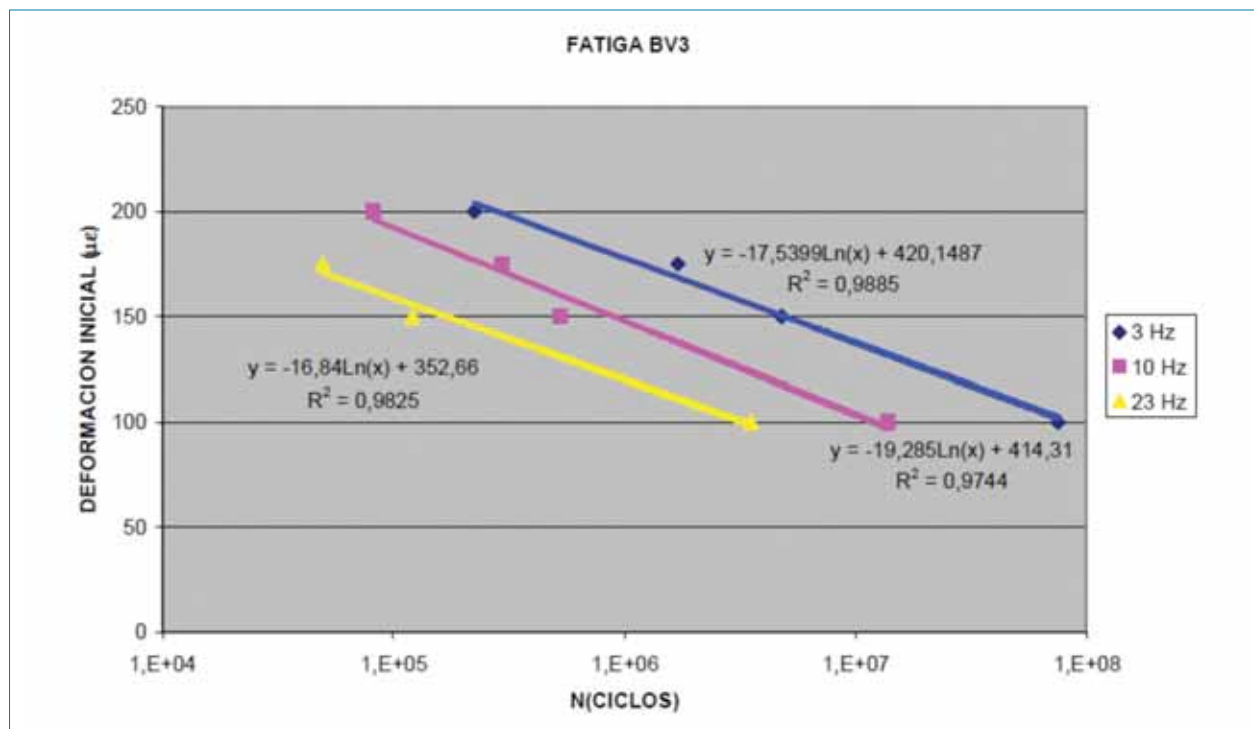


Figura 6. Gráficas de fatiga de la mezcla bituminosa, capas inferiores AC 22 BIN 50/70 S R10.

opone el material a sufrir una deformación permanente o corte vertical, cuando se le aplica un esfuerzo determinado (penetrante), sobre una superficie puntual, relativamente pequeña, con respecto al tamaño natural del objeto o muestra”.

Este “punzonamiento” se produce en la interacción entre la base de la traviesa y la superficie superior de la losa bituminosa, resultando uno de los parámetros prioritarios para el diseño de la capa superior. Valores bajos evitan deformaciones verticales en la regularidad de la vía y la aparición de grietas en la superficie de la losa.

Dentro del proyecto se ha diseñado un protocolo de ensayo que ha permitido comparar las distintas mezclas propuestas para esta capa en el laboratorio, midiendo en términos relativos la capacidad para resistir el punzonamiento a una temperatura de 40°C, tanto de forma estática como dinámica.

Como consecuencia de este estudio, se llegó a la conclusión de que las mezclas que menor punzonamiento ofrecían a temperaturas de 40°C, manteniendo unas características mecánicas aceptables, eran las del tipo SMA16, fabricadas con betunes modificados de alta viscosidad y celulosa. Las características de la mezcla que finalmente fue seleccionada se muestran en las tablas 2 y 3.

3.2 Traviesa, anclaje y método de ejecución

El diseño de la traviesa, el sistema de anclaje y el método de ejecución de la losa están íntimamente relacionados. La traviesa utilizada es tipo monobloque de hormigón pretensado y la unión con la losa se realiza mediante un tacón de anclaje

Tabla 2. Curva granulométrica de la mezcla empleada en la capa superior SMA 16 45/80-80 AV.

Mezcla BV-10 SMA 16 45 /80-80 AV Tamices (mm)	Curva granulométrica
22,4	100
16	96
11,2	83
8	54
4	31
2	21
0,5	11
0,063	7,2

Tabla 3. Características mecánicas de la mezcla empleada en la capa superior SMA 16 45/80-80 AV.

Parámetro	Norma	Resultado	
Contenido de ligante	UNE- EN 12697 :39	S/M	5,59%
Densidad máxima	UNE- EN 12697 :39	D _{máx}	2.444,2 kg/m ³
Densidad aparente	UNE- EN 12697:5	D _{aparente}	2.357 kg/m ³
Huecos mezcla	UNE- EN 12697:8	H _{mezcla}	3,6%
Huecos árido	UNE- EN 12697:8	H _{árido}	16,4%
Huecos rellenos	UNE- EN 12697:8	H _{rellenos}	77,4%
Estabilidad	UNE- EN 12697:34	Est	12,8 kN
Deformación	UNE- EN 12697:34	Def	2,6 mm
Tracción probetas en seco	UNE-EN 12697:23	ITS _{seco}	2,15 kPa
Tracción probetas en húmedo	UNE-EN 12697:23	ITShúmedo	2,12 kPa
Sensibilidad al agua	UNE-EN 12697:12	ITRS	98,4%
Ensayo de rigidez	UNE-EN 12697:26	Módulo	5.523 Mpa
Ensayo en pista	UNE-EN 12697:22	WTS	0,02 mm
Punzonamiento dinámico 40°C	Bituvia	Def. 10 ⁶ ciclos	0,4 mm
Punzonamiento estático 40°C	Bituvia	4 horas	0,55 mm

de hormigón situado en la parte inferior de la traviesa y solidario a la misma, que se introduce en el hueco practicado en la capa superior de la losa.

Mediante el análisis del MEF, se han podido evaluar las fuerzas y tensiones que intervienen en esta interfase y se ha llegado al diseño definitivo de la traviesa estableciendo las dimensiones, peso, armado y forma del tacón.

Aunque actualmente existen medios técnicos para realizar una perfecta nivelación en el extendido de la mezcla bituminosa, en el dimensionamiento de la traviesa debemos contemplar los casos en los que el apoyo inferior no va a poder ser uniforme, generándose así unas solicitaciones a flexión que hay que resolver mediante el incremento del esfuerzo de pretensado.

Por otra parte, había que incorporar un suplemento para tacón de anclaje. La condición que se imponía era que este molde especial debía pasar sin problemas por la mayoría de las máquinas de la línea de fabricación y que se debía poder apilar en las carpas de curado teniendo por arriba y por abajo otros moldes. Por este motivo la altura del tacón quedaba limitada a 50 mm, quedando posteriormente esta dimensión comprobada estructuralmente gracias al cálculo de las tensiones del tacón mediante el MEF.

Este tacón está diseñado para encajar en el hueco practicado en la superficie superior de la losa. Después de probar varias alternativas, se llegó a la conclusión de que la mejor

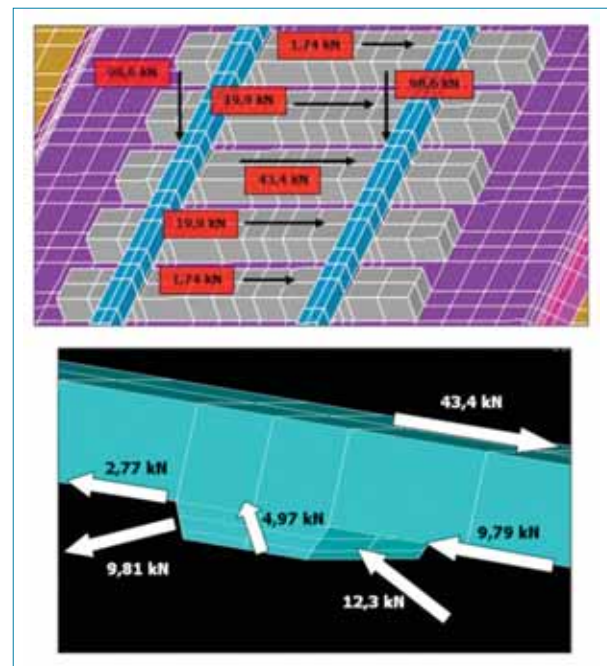


Figura 7. Representación gráfica de las fuerzas obtenidas mediante el MEF.

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)



Figura 8. Fotografías de la traviesa utilizada en Bituvia.

forma de realizar este hueco era mediante fresado continuo de la parte central de la losa, utilizando una máquina de fresado convencional de tambor pequeño, (35 cm).

Esta máquina permite realizar una acanaladura continua a lo largo del eje longitudinal central de la vía, que, asistida por las referencias topográficas previas, permitirá posteriormente servir de guía para el correcto posicionado de las traviesas en el trazado previsto para la vía.

Las dimensiones del hueco son tales que permiten que exista una cierta holgura para la introducción del tacón; esta holgura es suficiente para absorber la incertidumbre del proceso de fresado y presenta el suficiente espacio para, posteriormente, ser rellenado con un material fluido y adhesivo, capaz de soportar los esfuerzos transversales y longitudinales, calculados mediante la modelización de elementos finitos.

La intención original del proyecto era la utilización de un material bituminoso fluido como relleno intertraviesa, pero, debido a la reología propia de los materiales bituminosos, la resistencia obtenida a temperaturas alrededor de los 40 °C ha resultado insuficiente para las solicitaciones a las que se va a ver sujeto el conjunto (esfuerzos transversales máximos de hasta 43 kN para tramos en curva con deficiencia de peralte), por lo que finalmente se ha optado por el uso de lechadas cemento autonivelantes.

Estas lechadas presentan una rigidez elevada, lo cual puede traducirse en la aparición de grietas y sobre todo, en la aparición de tensiones verticales excesivas en la parte central de la traviesa, que podrían derivar en una fisuración prematura de la misma.

Para evitar este efecto, se ha previsto el uso de un elastómero o espuma en la parte inferior del canal, que asegure una menor reacción al esfuerzo vertical que la ofrecida por la propia mezcla bituminosa. Además, para el material de relleno se ha utilizado finalmente una lechada, a la cual se le ha añadido un alto contenido en polímeros, que le confiere una cierta elasticidad, a la vez que evita la fisuración del mismo.

Para evitar una excesiva rigidez en la dirección longitudinal de la vía, se han interpuesto una serie de juntas transversales de material PVC de baja densidad, a modo de juntas de dilatación, que permiten separar e independizar cada traviesa del resto, rompiendo con la continuidad longitudinal de la estructura.

4. Dispositivo Excitador de Vía (DEV)

Como se expuso al principio del documento, uno de los objetivos del proyecto BITUVIA es el desarrollo de un equipo excitador de vía para ensayar los tramos de pruebas. Este equi-

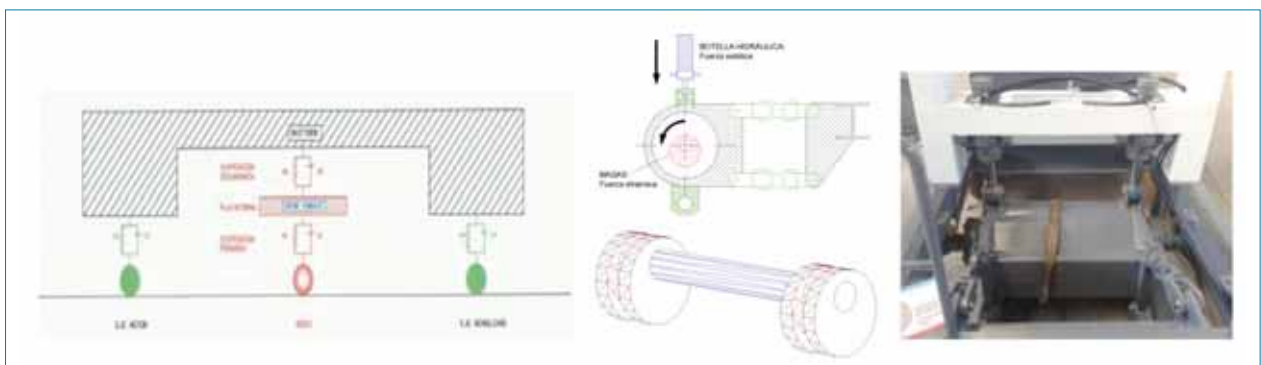


Figura 9. Esquema dinámico del prototipo (DEV) y su núcleo excitador vibrante.



Figura 10. Fotografías del DEV, núcleo de vibración y pantalla de control.

po tiene como misión la de reproducir las acciones de un vehículo de Alta Velocidad, en cuanto a términos de carga transmitida, frecuencia y número de ciclos de carga, excitando la vía en un estado estacionario sobre un punto localizado.

Después de revisar todo el estado del arte y analizar los esfuerzos provocados por los vehículos en la vía, se planteó un sistema de excitación por vibración y se pusieron en marcha los cálculos necesarios para poder obtener qué número de masas era necesario disponer para poder transmitir el peso adecuado a la vía, realizando las consideraciones oportunas para el diseño y fabricación del resto de chasis y elementos auxiliares.

El esquema básico del DEV es un vehículo montado sobre los carriles mediante dos ejes, siendo el eje trasero motor lo que le confiere cierta autonomía de translación (velocidad máxima 40 km/h). Posee un tercer eje central elevable, provisto del núcleo de vibración, que es el encargado de producir la excitación sobre los dos carriles en un punto determinado de la vía.

El núcleo vibrante del equipo excitador está formado por un sistema de masas excéntricas relacionadas por un eje que, al girar, produce una vibración. Según las revoluciones por minuto a las que se encuentre girando y la disposición de las

masas, se pueden obtener distintas frecuencias de vibración y empuje. Además de esta fuerza dinámica ejercida por las masas (según frecuencia), también es posible excitar la vía mediante una fuerza estática.

Dicha fuerza estática se consigue mediante la incorporación de dos botellas hidráulicas, las cuales ejercen una presión vertical que se suma a la dinámica cuando las masas se encuentran actuando. Esto permite comprobar diferentes parámetros adicionales interesantes en el transcurso de las pruebas, como por ejemplo la rigidez vertical de vía.

Con esto, el equipo es capaz de reproducir fuerzas estáticas desde 5 a 28 t. Y combinaciones de fuerzas estáticas y dinámicas que dependen de la frecuencia establecida (de 0 a 28 Hz), suficientes para poder simular los esfuerzos de los vehículos ferroviarios. Todo el sistema está comandado por una pantalla táctil, que permite el control de todos los parámetros desde el exterior del vehículo.

5. Ejecución del banco de pruebas

El banco de pruebas previsto en el proyecto se ha ejecutado en las instalaciones, pertenecientes a un miembro del consorcio, situadas el término municipal de Chestre, junto a la

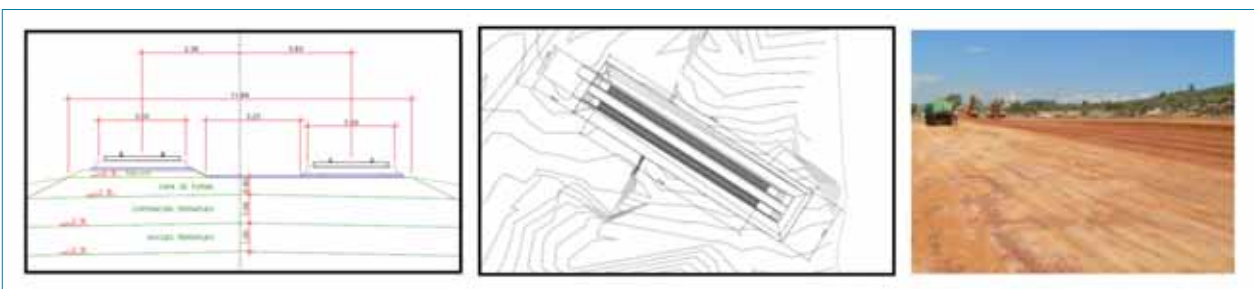


Figura 11. Sección transversal del banco de pruebas / Vista en planta del banco de pruebas / Relleno de explanada.

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

Tabla 4. Resumen de resultados de ensayos de las capas granulares del banco de pruebas Bituvia.

Capa: Núcleo de terraplén	Acabado superficial	Errores máximos de cota: + 3,6 cm / - 1,3 cm		
	Densidades	Min: 95% / Max: 100%		
	Placas de carga	$E_{v1} = 300,00$	$E_{v2} = 865,00$	$E_{v2}/E_{v1} = 2,88$
	Observaciones	Ver incidencia del punto interior		
Capa: Coronación de terraplén	Acabado superficial	Errores máximos de cota: + 2,8 cm / - 1,3 cm		
	Densidades	Min: 95% (92%) / Max: 100%		
	Placas de carga	$E_{v1} = 50,94 - 99,26$	$E_{v2} = 71,40 - 197,37$	$E_{v2}/E_{v1} = 1,30 - 2,44$
	Observaciones	Las densidades entre paréntesis corresponden a valores de capas no aprobadas previos a su recompactación		
Capa: Capa de forma	Acabado superficial	Errores máximos de cota: + 3,5 cm / - 1,3 cm		
	Densidades	Min: 97% / Max: 100%		
	Placas de carga	$E_{v1} = 83,85 - 300,00$	$E_{v2} = 196,68 - 487,14$	$E_{v2}/E_{v1} = 1,15 - 2,35$
	Observaciones	Aunque exista alguna relación entre rigideces superior a 2,2, se aprueban las capas al tener un E_{v1} superior a la rigidez mínima del modelo: 80 MPa		
Capa de ahorras	Acabado superficial	Errores máximos de cota: + 2,6 cm / - 3,6 cm		
	Densidades	Min: 98% / Max: 100%		
	Placas de carga	$E_{v1} = 127,36 - 142,11$	$E_{v2} = 170,89 - 259,62$	$E_{v2}/E_{v1} = 1,34 - 1,83$

cantera de explotación de áridos. Para ello se ha dispuesto de una superficie de 4.000 m² donde ejecutar las dos secciones mencionadas anteriormente.

Después de un proceso de excavación y de relleno de la explanada, se procedió a la ejecución de las capas establecidas en proyecto. Los materiales utilizados han sido seleccionados con especial cuidado, buscando las calidades aceptables para cumplir con los mínimos establecidos en el pliego de prescripciones técnicas del ADIF para este tipo de capas.

Debido a que se trata de un prototipo experimental, el objetivo es situar a la placa bituminosa en la situación límite



Figura 12. Fotografía de instalación célula de carga.



Figura 13. Fotografía de extendido.

más desfavorable e intentar en la medida de lo posible, acercarse a las condiciones mínimas de establecidas en el modelo matemático previo (MEF). Durante la ejecución se ha realizado un gran número de ensayos de control, con el fin de poder caracterizar perfectamente las condiciones iniciales de las diferentes superficies.

Una vez alcanzada la capa de forma, se procede a diferenciar los dos tipos de sección, extendiendo la zahorra únicamente en la sección B.

Durante la construcción de este banco de pruebas, se han introducido diversos sensores de medición, que permiten la monitorización posterior de las cargas y deformaciones producidas durante las pruebas con el DEV. Así pues, se instalaron células de presión dinámicas en la parte inferior de la capa de forma y galgas extensiométricos bajo la última capa de la losa asfáltica.

El extendido de las capas bituminosas se realiza con los medios habituales utilizados en carreteras, teniendo especial cuidado con los riegos de adherencia y en mantener una muy buena regularidad superficial.

Una vez extendidas y compactadas todas las capas, se procedió al fresado de la acanaladura central donde va alojado el tacón de la traviesa. El proceso de fresado puede rea-



Figura 14. Fotografía de proceso de fresado y colocación de la traviesa.



Figura 15. Fotografías del relleno intertraviesa.

lizarse con éxito, consiguiendo desviaciones de linealidad bajas con respecto a la referencia teórica.

Una vez practicado el hueco y barrido, se coloca el elastómero sobre todo el fondo del canal (planchas de espuma de poliuretano de 1.900 x 355 x 25 mm y 20 kg/m³), iniciando después el proceso de colocación de las traviesas y montaje del carril.

Terminado el proceso de colocación del carril, se procede al relleno mediante vertido de una lechada de los espacios entre la traviesa y el canal practicado, así como en los espacios comprendidos entre dos traviesas continuas, en los que es posible utilizar elementos prefabricados de hormigón u

otro material, de dimensiones adecuadas, con el fin de economizar material de relleno.

6. Proceso de medición, resultados y validación de modelos

Como se ha comentado anteriormente, el banco de pruebas está monitorizado de forma que se pueden integrar las diferentes señales. En la Figura 16 se muestra un croquis, donde se puede apreciar la colocación de los diferentes sensores:

- La célula de presión está situada en la fibra superior de la capa de coronación en ambas secciones.
- Las galgas en H están dispuestas en la cara inferior de la losa de material bituminoso. Estos sensores tienen como finalidad medir las deformaciones horizontales máximas a tracción que sufre la capa al someter a carga la vía y así predecir su comportamiento a fatiga a largo plazo.
- Para medir el parámetro de rigidez de la vía y los desplazamientos, tanto transversales como verticales de la traviesa, se dispone de sensores de desplazamiento (LVDT).
- A la misma profundidad, y en un entorno cercano a la galga en H y a la cara inferior de la traviesa, se han colocado sensores de temperatura.

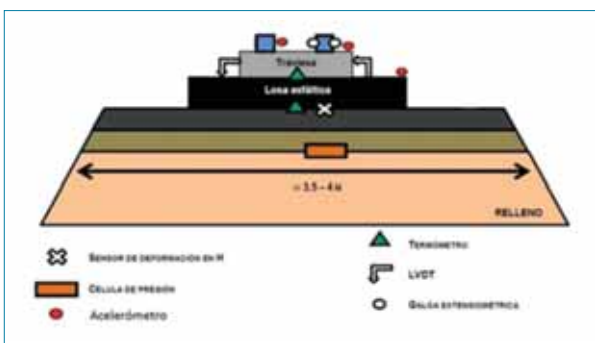


Figura 16. Croquis de la instrumentación del banco de pruebas.

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

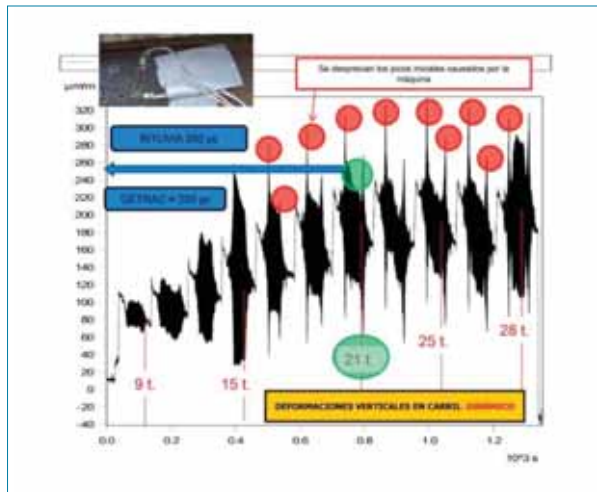


Figura 17. Gráfica de las deformaciones verticales del carril.

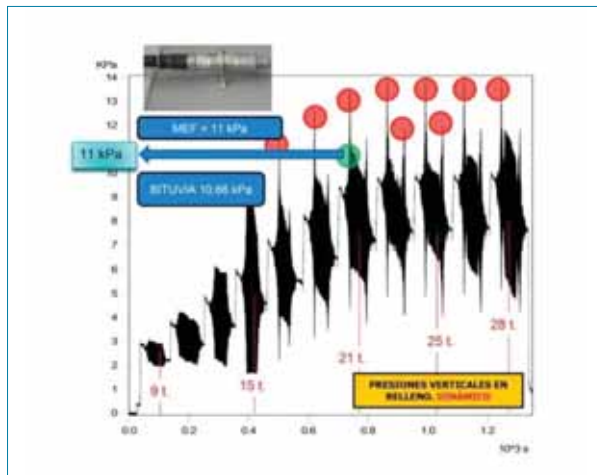


Figura 18. Gráfica de las presiones verticales en relleno.

- Se han colocado 3 acelerómetros en el carril, traviesa y losa de asfalto, que permiten conocer las vibraciones transmitidas en los diversos puntos de la vía.

Tabla 6. Deformaciones verticales del carril y presiones verticales en relleno secciones A y B.

Tramo de ensayo	Deformaciones de las galgas en H ($\mu\epsilon$)	
	Medidas	MEF
Sección A1	2,0	10,6
Sección A2	6,0	10,4
Sección B1	6,0	14,8
Sección B2	Fallo del sensor	-
Media	4,7	11,9

- Los carriles llevan instalados unas galgas extensiométricas para medir la deformación de los mismos. Con ellas puede conocerse la compresión que ha sufrido el carril al recibir las cargas.
- Por otra parte, se realizan mediciones externas, utilizando niveles ópticos y la regla de ancho y peralte para medir los datos de nivelación de la vía antes y después de cada periodo de ciclos de carga y una célula de carga externa, acoplada a un cilindro hidráulico para producir y medir los esfuerzos transversales de la vía.

Utilizando todos estos instrumentos, se han planteado cuatro grupos diferentes de ensayos que realizar. A continuación se describen estos grupos de ensayos y se muestran los resultados obtenidos, estableciendo comparativas con los datos extraídos del modelo matemático (MEF):

Conjunto de ensayos Tipo 1 (para calibración y validación de los modelos numéricos):

Estos ensayos están destinados fundamentalmente a obtener resultados de los diferentes sensores, frente a un corto

Tabla 5. Deformaciones verticales del carril y presiones verticales en relleno secciones A y B.

Tramo de ensayo	Deformaciones del carril $\mu\epsilon$		Presiones verticales kPa	
	Medidas	Getrac/ATD	Medidas	MEF
Sección A1	250	220	10,7	11,0
Sección A2	280	220	15,6	15,5
Sección B1	312	220	14,0	14,0
Sección B2	275	220	14,4	14,0
Media	279	220	13,7	13,6

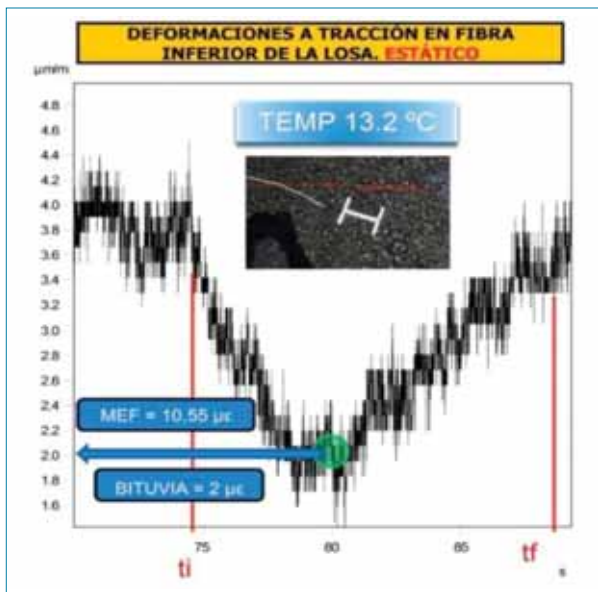


Figura 19. Gráfica de las Deformaciones a tracción de la losa.

número de ciclos, para así poder posteriormente calibrar y validar los modelos numéricos desarrollados.

El primero de los parámetros registrados en este conjunto de ensayos corresponde a las deformaciones del carril en estático y dinámico, elemento que es independiente de la disposición de vía utilizada (UIC 60).

El ensayo dinámico nos permite verificar que el DEV está ejerciendo una fuerza vertical similar a la que ejercen los vehículos reales (hasta un máximo de 28 t). En este caso, la deformación vertical media medida en el alma del carril (279 µε) es ligeramente superior a la alcanzada en las medi-

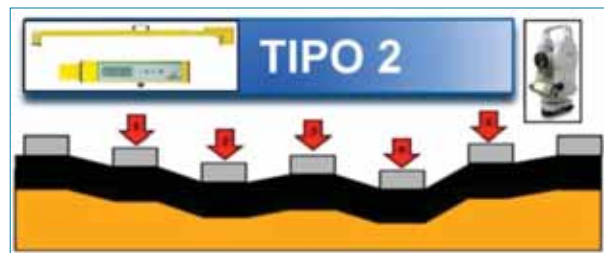


Figura 20. Esquema del ensayo tipo 2 en el banco de pruebas.

ciones del Corredor Mediterráneo (GETRAC 220 µε). Esto nos sitúa del lado de la seguridad a la hora de interpretar los resultados que se obtienen.

Cuando comparamos los resultados de las presiones verticales obtenidos con la célula de carga de la parte inferior de la capa de forma con los resultados calculados en el MEF para las condiciones particulares de cada tramo de pruebas, podemos apreciar que son del mismo orden.

Los resultados del MEF, recalculados ajustando las calidades reales de cada punto en el banco de pruebas, muestran valores muy aceptables que nos permite validar el modelo matemático.

La mayor divergencia de resultados la tenemos en los datos obtenidos en las deformaciones a tracción de la capa inferior de la losa. Donde el modelo MEF ofrece un valor medio alrededor de 12 µε, mientras que en los datos medidos con las galgas extensiométricas aparecen valores más bajos, en torno a los 5 µε.

Por los resultados de experiencias anteriores de otros grupos de trabajo, se ha podido comprobar que este tipo de galgas, suelen ofrecer valores inferiores a los esperados. Ade-

Tabla 7. Resultados obtenidos en el ensayo tipo 2 para los defectos aislados al cabo de 10 años equivalentes de excitación. En nivelación, “-” supone un hundimiento de la vía; en ancho de vía, “+” supone un aumento del ancho de vía.

Traviesas			1	2	3	4	5	Normativa aplicable
Defectos de nivelación (mm)	Sección A	Carril dcho.	0	0	0	0	0	UNE EN 13848-5 (Nivel de alerta) Defecto aislado max de ±6
		Carril izq.	0	0	-1	0	-1	
	Sección B	Carril dcho.	-1	-1	-1	-1	-1	
		Carril izq.	0	0	0	0	-1	
Defecto ancho de vía (mm)	Sección A	0,5	0,6	0,5	0,3	0,4	UNE EN 13848-5 (Nivel de alerta) Defecto aislado máx. entre -3 y +20 mm	
	Sección B	1,5	1,5	1,6	0,7	-0,5		
Defecto de peralte (mm)	Sección A	0	0	-1	0	-1	Normativa Adif Vía (NAV) Defecto aislado para velocidad más exigente de ±7 mm	
	Sección B	-1	-1	-1	-1	-1		

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

Tabla 8. Resultados obtenidos en el ensayo tipo 2 para los defectos relativos al cabo de 10 años equivalentes de excitación

Travesas			Defecto relativo	Normativa aplicable
Defectos de nivelación (mm)	Sección A	Carril dcho.	0	Normativa Adif Vía (NAV) Defecto relativo a 3 m (5 traviesas) límite = ± 6 mm
		Carril izq.	1	
	Sección B	Carril dcho.	1	
		Carril izq.	1	
Defecto ancho de vía (mm)	Sección A		1	Normativa Adif Vía (NAV) Defecto relativo a 2 traviesas contiguas límite = ± 2 mm
	Sección B		1	
Defecto de peralte (mm)	Sección A		0,2	Normativa Adif Vía (NAV) Defecto relativo a 3 m (5 traviesas) límite = ± 5 mm
	Sección B		1	
Alabeo (mm/m)	Sección A		0,33	UNE EN 13848-5 (Nivel de alerta) Defecto relativo a 3 m (5 traviesas) menor de = 3 mm/m
	Sección B		0,33	

más, la temperatura de ensayo es relativamente baja y puede haber afectado aumentando la rigidez de la losa. En cualquier caso, los resultados obtenidos son, en ambas situaciones, lo suficientemente bajos como para concluir que el material asfáltico no va a sufrir por fatiga.

Conjunto de ensayos Tipo 2 (comprobación de mantenimiento en un número determinado de años):

Mediante el presente ensayo, se estudia el comportamiento de la vía frente a sus 10 primeros años de vida útil. El ensayo se lleva a cabo realizando 4 ciclos de ensayos, equivalentes a un periodo de 2,5 años cada uno, sobre 5 traviesas consecutivas.

Por una parte, se analizan los defectos aislados obtenidos para cada una de las 5 traviesas excitadas (Tabla 7).

Como se puede apreciar en la Tabla 7, todas y cada una de las magnitudes de los defectos registrados son muy reducidos para un tiempo de simulación de 10 años. Su magnitud, prácticamente, se encuentra en el umbral de la incertidumbre del equipo de medida, quedando alejados sobradamente de los límites de tolerancias fijados por las especificaciones técnicas impuestas para una vía en servicio según la normativa. La UNE-EN 13848-5 fija 3 niveles de tolerancias de defecto, el límite de alerta, siendo el más limitante y, a su vez el menos preocupante; el límite de intervención; y el límite de acción inmediata.

Tabla 9. Resultados obtenidos en el ensayo tipo 3.

		0 años		12.5 años		25 años		37.5 años		50 años		Normativa
Tipo de sección		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
Defectos de nivelación (mm)	Carril int.	0	0	0	1	0	2	-1	2	-1	2	± 6 mm
	Carril ext.	0	0	0	1	0	2	0	2	0	2	
Defecto de peralte, mm		0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	± 7 mm
Defecto ancho de vía, mm		0	0	0,1	0,6	0,1	1,3	0,2	1,3	0,4	1,4	-3 y +20 mm
Rigidez vertical, kN/mm		95,7	84,7	93,5	82,7	92,1	80,2	89	79,3	86,8	78,7	70-100 kN/mm
Temperatura superior de la losa, °C		18,8	27,4	18,8	31	22,2	32,9	22	28,1	23,2	26,8	-
Temperatura inferior de la losa, °C		19,4	28,8	19,4	29,8	20,5	31,5	20,1	28,1	21	28,6	-

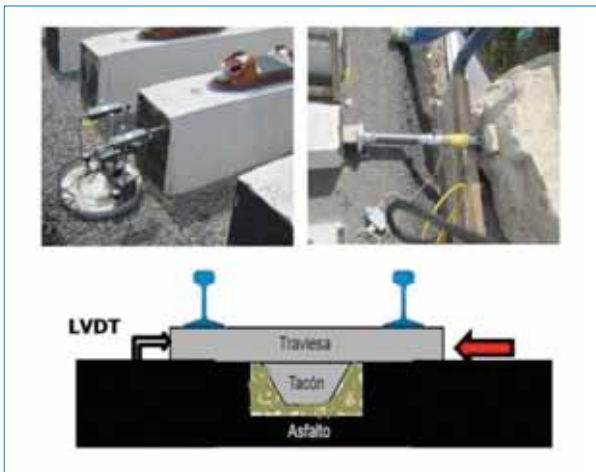


Figura 21. Esquema del ensayo Tipo4 en el banco de pruebas.

Por otra parte, las diferentes normativas también limitan los defectos, no sólo en función del máximo aislado, sino también los defectos en relación a las traviesas que se encuentran en un entorno cercano. Así pues, la normativa NAV, para la nivelación y peralte, fija como limitación la diferencia entre los defectos medidos cada 3 metros (o 5 traviesas). Esto se ha simulado comparando los defectos de la traviesa central con los generados en una traviesa que se encuentra 3 metros alejada, es decir, fuera del tramo de ex-

citación. En cuanto al ancho de vía, se referencia para dos traviesas contiguas.

De forma equivalente, se ha determinado el alabeo, según la normativa UNE-EN 13848-5, también para una longitud de 3 m entre traviesas auscultadas. Como se puede ver en la Tabla 8, todos los datos registrados quedan también muy lejos de los límites impuestos.

Además, no se aprecian defectos en la inspección visual del entorno de las traviesas ensayadas, ni tampoco se aprecia fisuración a lo largo de su sección central, ni en la superficie del material de relleno que sirve de anclaje a la losa a lo largo de todos los ciclos de carga aplicados.

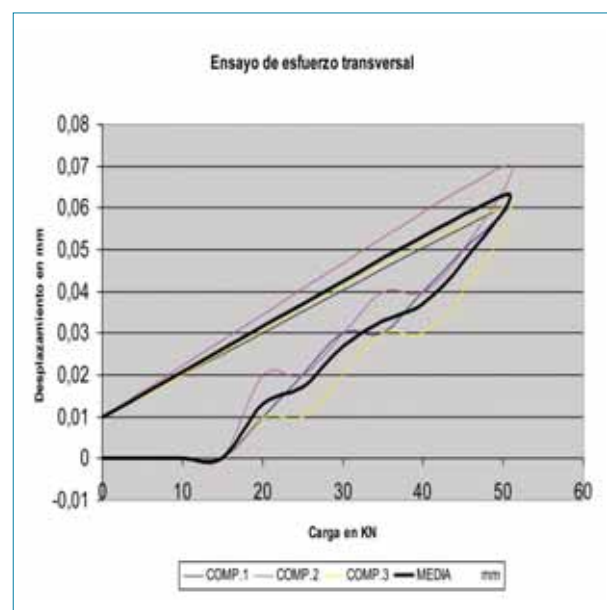
Conjunto de ensayos Tipo 3 (ensayo hasta los 50 años de vida):

Se estudia el comportamiento de la vía frente a un largo número de ciclos de carga, excitando una única traviesa durante una vida equivalente de 50 años. De esta forma, se estima cuál es el deterioro de la vía, debido a la fatiga en términos de geometría de vía y de variación de su rigidez vertical total, determinándose estos parámetros cada 12,5 años de vida equivalente.

Como se puede apreciar, la variación de los parámetros de vía no son nada notables frente a una evolución del en-

Tabla 10. Resultados obtenidos en el ensayo de esfuerzo transversal.

Carga (kN)	Desplazamiento (mm)			Media (mm)
	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	
0	0	0	0	0,000
5	0	0	0	0,000
10	0	0	0	0,000
15	0	0	0	0,000
20	0,01	0,02	0,01	0,013
25	0,02	0,02	0,01	0,017
30	0,03	0,03	0,02	0,027
35	0,03	0,04	0,03	0,033
40	0,04	0,04	0,03	0,037
45	0,05	0,05	0,04	0,047
50	0,06	0,07	0,06	0,063
0	0,01	0,01	0,01	0,010



Ensayo de esfuerzo transversal

Nuevo sistema de vía en placa bituminosa (Proyecto Bituvia)

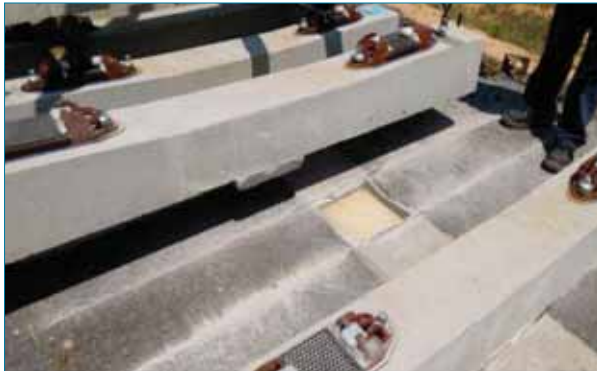


Figura 22. Imagen del hueco y la traviesa una vez realizado la extracción.

sayo durante 50 años equivalentes, siendo del mismo orden que los presentados para el ensayo tipo 2. Por otra parte, la rigidez de vía ha ido disminuyendo en ambas secciones, siendo al final un 9% menor que la original, para la sección A, y un 7%, para la sección B.

Conjunto de ensayos Tipo 4 (ensayo de esfuerzo transversal):

En este caso, se pretende provocar a la traviesa un esfuerzo transversal igual al calculado por los métodos matemáticos. Según estos cálculos, la fuerza media que debe soportar transversalmente la traviesa se encuentra en 22,9 kN, pudiendo alcanzar en casos muy extremos (máxima insuficiencia de peralte, curva cerrada y alta velocidad) los 43,3 kN.

Así pues, en este ensayo, se somete al conjunto hasta una fuerza de 50 kN, midiendo mediante un comparador (LVDT) el desplazamiento provocado en el extremo contrario a la aplicación de la fuerza. Con esto se pretende evaluar el sistema de anclaje losa-traviesa y la resistencia del relleno utilizado.

En los ensayos realizados, se ha aplicado una fuerza tanto transversal sobre traviesa, que simula la inercia del tren en curva, como vertical sobre los carriles, que simula el peso del propio vehículo. En la Tabla 10, se puede comprobar que los resultados han sido muy satisfactorios ya que los desplazamientos laterales son mínimos ante la aplicación de la fuerza de 50 kN (desplazamiento máximo de 0,07 mm), y además se produce una recuperación prácticamente completa una vez cesa dicha fuerza.

Aparte de los ensayos descritos anteriormente, se han realizado sobre el banco de pruebas operaciones de simulación de mantenimiento y extracción de traviesas.

Donde se ha podido comprobar que las juntas transversales de PVC embebidas en el relleno favorecen las labores de desmontaje y sustitución de las mismas, de una manera limpia y con relativamente poca fuerza (1.500 kgf), asumible por la mayoría de la maquinaria de obra.

7. Conclusiones

Con los trabajos desarrollados hasta el momento, podemos concluir lo siguiente:

- El modelo matemático desarrollado en el proyecto reproduce de manera muy aproximada el comportamiento real de la vía diseñada. Tras el último proceso de calibración con las experiencias de Chestre, este modelo puede llegar a ser una herramienta muy útil para el dimensionamiento de la vía en placa bituminosa en futuros proyectos de construcción.
- Se ha verificado que el Dispositivo Excitador de Vía (DEV) diseñado en el proyecto es capaz de excitar la vía (en sus componentes verticales), de manera similar a la de los vehículos ferroviarios reales registrados en las experiencias analizadas.
- El método de anclaje (tacón + relleno) de la traviesa a la superficie de la losa soporta de forma adecuada los esfuerzos máximos transversales a los que puede ser sometido y se ha podido comprobar que no se genera fisuración sobre la parte central de la traviesa.
- Los datos obtenidos en la monitorización del banco de pruebas muestran que el diseño de la vía es consistente y cumple con las solicitaciones que se le habían impuesto.
- Según la tendencia de los datos obtenidos y bajo las condiciones impuestas en el banco de pruebas, no se prevé que el sistema vaya a requerir intervenciones de mantenimiento a lo largo de toda su vida útil, salvo los provocados por condiciones ambientales adversas o los derivados de la oxidación de las fijaciones y demás elementos por el paso real del tiempo.
- El procedimiento ideado para la ejecución de la vía en placa resulta sencillo y rápido. El extendido, compactación y fresado de las capas no requiere de modificaciones en la maquinaria, la técnica es de sobra conocida y la calidad de la superficie terminada está avalada por años de experiencia en carreteras.

- Las juntas de dilatación utilizadas en el proceso de anclaje de la traviesa a la losa facilitan considerablemente la extracción posterior de la misma, sin que se produzca ningún tipo de rotura o destrozo de la superficie de la losa. Facilitando que las reparaciones sean rápidas y efectivas para varios escenarios de actuación, como eventuales deterioros puntuales de carácter estructural, ligeros hundimientos, sustitución de traviesas, etcétera.
- Las deformaciones a tracción, tanto las calculadas como las medidas bajo la losa, son muy reducidas, en comparación con las obtenidas en las curvas de fatiga de las mezclas bituminosas estudiadas. Esto abre la puerta a una optimización de espesores, en función de la calidad de la infraestructura disponible para diseño.
- Muchos de los procesos complementarios a la ejecución, como la colocación de la traviesa o del carril y el vertido del relleno intertraviesa, son susceptibles de ser mejorados y automatizados, mediante pequeñas modificaciones de la maquinaria utilizada actualmente. Así pues, la técnica está en disposición de ser trasladada a producción para ser probada en una vía real.
- El incremento en el coste de construcción relativo a las soluciones de vía en balasto sólo supone, aproximadamente, el 1,5% del total de la inversión realizada para la construcción de una línea de alta velocidad.
- Cuando se incluyen los costes de mantenimiento diferenciales entre ambas tipologías de vía, el incremento de coste inicial de la vía en placa de Bituvía se amortiza antes de los 10 años de puesta en servicio.

8. Agradecimientos

Los autores del presente artículo quieren agradecer a todo el equipo de trabajo de las diferentes empresas e instituciones su contribución al desarrollo de este proyecto, así como a la empresa IDVIA, contratada para la coordinación de las labores administrativas, y al Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI), que gracias a la financiación de su programa de Investigación y Desarrollo, cofinanciado por la Unión Europea dentro del programa operativo del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), han hecho posible que se hayan podido alcanzar los objetivos marcados en este proyecto.

9. Bibliografía

- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2007, Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Serie de Normas UNE EN 12697, España, AENOR. 2º volumen, 645 Pág.
- Buonanno A. y Mele R., 2000, The use of bituminous mix sub-ballast in the Italian State Railways, Barcelona, 2nd Eurasphalt & Eurobitumen Congress. Pág.11
- Comisión Europea de normalización, 2009, Aplicaciones Ferroviarias. Vía. Calidad de la Geometría de Vía. Serie de Normas UNE EN 13848-5, Madrid, AENOR: Pág de 17 a 20
- D.G. de Infraestructuras ferroviarias, 1999, Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias, Madrid, Cº Publicaciones Ministerio de Fomento, 1er volumen 130 Pág.
- Geometría de la Vía. Parámetros geométricos de nuevas líneas en ancho internacional, ADIF, 1ª Edición: 24 Pág.
- López J.R., Berbis J., Albert J.R., Felipe J., Martínez A., Real J.I., Galisteo A., Ares G., Sánchez F.J., 2012, Diseño de un ensayo de punzonamiento en mezclas bituminosas, VII Jornada Nacional de ASEFMA,. comunicación 35, 11 Pág.
- López Pita A., 2006, Infraestructuras ferroviarias, Barcelona, Ediciones UPC, 1er volumen: 448 Pág.
- Moreno Robles. J., 2008, Reproducción, mediante ensayos a escala real, del efecto en vía de la circulación ferroviaria a alta velocidad, Madrid, Archivo digital UPM.
- Peña M., 2003, Tramos de ensayo de vía en placa en la línea del corredor del Mediterráneo para su explotación a alta velocidad I. diseño y construcción, Madrid, Ciencia y técnica de la ingeniería civil, N° 3.431, Pág. de 57 a 68.
- Potts D.M. y Zdravkovic L., 1999 Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory, London, Thomas Telford, Volumen 1: Pág de 6 a 7, Pág de 114 a 187 y Pág de 200 a 235.
- RENFE, 1983, NAV 7-3-2.0. Calificación de la Vía. Ancho de vía, ADIF, 1ª Edición, Pág. 4.
- RENFE, 1983, NAV 7-3-5.0. Calificación de la Vía. Peralte, alabeo y estabilidad de traviesas, ADIF, 1ª Edición, Pág.5
- RENFE, 1983, NAV 7-3-5.5. Calificación de la Vía. Nivelación longitudinal, ADIF, 1ª Edición. Pág. 2 a 3.