

Desarrollo y experimentación del sistema M.L.G. (Metro Ligero de Granada):

Revista de Obras Públicas
nº 3.505. Año 156
Diciembre 2009
ISSN: 0034-8619

Primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho procedente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) y resina de matriz polimérica

Development and experimentation of the MLG system (Light Rail Transit of Granada):
First spanish slab track system embedded in concrete performed with a mixture of rubber from scrap tires and resins with polymeric matrix

Alberto Sánchez López. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Gerente de Proyectos y Obras. Ferrocarriles de la Junta de Andalucía. alberto.sanchez@ferrocarrilesdeandalucia.es.

Emilio Ramírez Ramírez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Obra Tramo III Metropolitano de Granada. Oficina Técnica de Estudios y Control, S.A. e.ramirez@offiteco.es.

César Román Ugarte. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Gerente de Obra UTE Tranvía Campus de la Salud - Armilla.
ACCIONA Infraestructuras. Zona Andalucía. croman@acciona.es.

Pablo Miguel Álvarez de Cienfuegos Gálvez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe de Obra UTE Tranvía Campus de la Salud - Armilla.
ACCIONA Infraestructuras. Zona Andalucía. pdccienf@acciona.es.

José Daniel García Espinel. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director del Departamento de Implantación e Innovación.
Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. jgarcia4@acciona.es.

Ana Neyeloff Frugone. Arquitecto
Jefe de Servicio de I+D+i de Andalucía. Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. neyeloff@acciona.es.

Jorge Gómez Hoyos. Ingeniero Superior de Minas
Jefe del Grupo de Obras Subterráneas de la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras.
Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. jgomez12@acciona.es.

Luis Rodolfo Clemente Ortega. Ingeniero Civil.
Jefe de Obra del Departamento de Implantación e Innovación.
Dirección I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. lclemente@acciona.es.

Raquel Cortinat Sánchez. Ingeniero de Telecomunicaciones
Técnico de la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras.
Dirección de I+D+i, ACCIONA Infraestructuras. rcortinat@acciona.es

Resumen: En la obra "U.T.E Campus de la Salud-Armilla (Granada)" la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado y aplicado con éxito en un tramo de prueba de 800 metros lineales de vía simple el primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón utilizando una mezcla de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y resina de matriz polimérica, sistema el cual permite reducir el fuerte impacto medioambiental provocado por los vertederos de neumáticos usados, destacando su alto nivel de atenuación de vibraciones, parámetro clave en un sistema de vía urbano, debido a la presencia de edificaciones cercanas.

Palabras Clave: Caucho; Neumático; Vía; Placa; Ambiental; Vibraciones; Acciona; I+D

Abstract: During the construction of the project "U.T.E Campus de la Salud Armilla (Granada)" the R&D Direction of ACCIONA Infraestructuras has developed and applied successfully in a test pilot of eight hundred meters of simple track a new slab track railway system using rubber from scrap tires and resins with polymeric matrix, which it allows to reduce the high environmental impact caused by the landfills of used tires, distinguishing a high level of airborne noise, a key parameter in an urban railway system, due to presence of closed buildings.

Keywords: Rubber; Tires; Track; Slab; Environmental; Airborne noise; Acciona; R&D

1. Introducción

Desde el siglo XIX, el transporte público ferroviario ha sido parte integrante de los entornos urbanos de las principales ciudades del mundo, habiendo evolucionado constantemente desde los primeros tranvías, tirados por caballos, hasta los más avanzados sistemas de transporte metropolitano, con vehículos traccionados eléctricamente.

Prácticamente desde sus comienzos, una de las señas de identidad del transporte tranviario ha sido la posibilidad de compartir la superficie de rodadura (el viario público normalmente) con otros medios de transporte urbanos, como son el tráfico rodado (automóviles, autobuses, bicicletas, etc.). Ello es posible dado que los carriles de guiado de los tranvías se encuentran, en mayor o menor medida integrados en la plataforma viaria.

A raíz del gran desarrollo urbano y de la movilidad creciente, comienza a producirse, en paralelo, una especial sensibilización ante los elevados costes medioambientales que se producen como consecuencia del desbordado volumen del tráfico rodado, por lo que en numerosos foros tanto técnicos como políticos se comienza a suscitar la necesidad de contar con sistemas de transporte públicos sostenibles, que permitan mejorar la movilidad en las ciudades contribuyendo al desarrollo económico, desarrollo social y protegiendo el medio ambiente de nuestro entorno.

Por tanto, entre los sistemas de transporte público, el de tipo ferroviario, traccionado con energía eléctrica, se presenta como la mejor alternativa con elevados ratios de eficiencia energética y sostenibilidad, a la vez que es capaz de combinar grandes niveles de calidad en cuanto a accesibilidad, capacidad, regularidad, seguridad y velocidad. Esta es la razón por la que numerosas ciudades han emprendido la aventura de potenciar un transporte ferroviario urbano sostenible, dando lugar al desarrollo de nuevos proyectos para establecer líneas de tranvías o metros ligeros dentro de sus límites o conectando con el extrarradio.

2. Breve reseña histórica sobre los tranvías en Granada

El primer proyecto para construir una línea de tranvías en Granada se remonta al año 1882. Este proyec-

to, que finalmente no prosperó, consistía en unir los pueblos de la vega granadina con la capital.

Sin embargo el primer tranvía que se construyó en la provincia de Granada fue el de Motril, que se inauguró en 1884, siendo Granada una de las provincias pioneras en Andalucía en la construcción, desarrollo e implantación de este nuevo método de transporte que marcaba un hito tecnológico muy importante para el desarrollo de la región.

A finales del siglo XIX, la empresa belga Edmond Fage, proyecta una serie de tranvías a vapor, a la cual se le conceden algunas concesiones. Así mismo en paralelo la compañía de Tranvías de Granada y Murcia también obtiene una serie de concesiones en 1895.

En el año 1901 comienzan la construcción de las obras, las cuales quedaron interrumpidas al poco tiempo de su inicio, hasta que en 1903 Nicolás de Escoriaza crea la compañía Tranvías Eléctricos de Granada S.A. (TEGSA). Entre 1903 y 1910 Escoriaza puso en marcha una red local de 18 kilómetros, con un hito de gran interés como fue la construcción de un tranvía que por sistema de cremallera, llevaba a los viajeros hasta la misma colina de la Alhambra. A partir de 1912 la empresa se lanzó a un proyecto más ambicioso como fue la expansión suburbana por toda la Vega de Granada, que gozaba entonces de un gran dinamismo demográfico y económico gracias al cultivo de la remolacha y la industria azucarera. En una década, TEGSA se convirtió en una de las compañías de tranvías más importantes de España con 80 kilómetros de vías suburbanas.

Las líneas de tranvía en Granada tuvieron un gran auge hasta que a finales de los años 50. A comienzos de los 60 comienza su declive, cerrándose las líneas urbanas en 1963. Unos años después dejan de circular los tranvías por la Vega de Granada, desapareciendo definitivamente en 1974.

En el año 2000, tras la aprobación del Plan Director de Infraestructuras de Andalucía 1.997-2.007 aprobado por el Decreto 108/1999 de 11 de Mayo, la Dirección General de Ordenación del Territorio de la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía finaliza la redacción del Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada (P.O.T.A.U.G). En el mismo y con relación al sistema de transportes masivos se contemplan una serie de objetivos que se pueden resumir en los siguientes tres puntos:



Fig. 1. Trazado Tramo III, Polígono Tecnológico de las Ciencias de la Salud - Armilla, del Metropolitano de Granada.

- Definir un sistema integrado de transporte colectivo.
- Crear una oferta de conexión entre los distintos núcleos de población.
- Mejorar el servicio entre distintos núcleos urbanos del área de Granada, hasta hacerlo competitivo con el vehículo privado.

Para la consecución de los objetivos formulados, se proponen diferentes líneas de actuación, entre las que se encuentra la progresiva implantación del metro ligero como medio de transporte público, tanto intermunicipal como municipal en Granada. La Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía pone en marcha los estudios para la creación de "La Línea 1 Metropolitana del Metro Liger de Granada", de 16 km. de longitud, que unirá las localidades de Albolote, Maracena y Armilla con la ciudad de Granada.

La voluntad de la Junta de Andalucía de impulsar la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i) se ha plasmado en el Tramo III del Metropolitano de Granada con la implantación del primer sistema español de vía en placa sostenible cuya descripción es el objetivo de este artículo. El tramo de prueba del sistema

M.L.G. desarrollado por la Dirección de I+D+i de ACCIONA Infraestructuras se ha materializado en 800 metros lineales de vía simple, entre el P.K. 0+000 y el P.K. 0+400, en un intervalo en los que el metro ligero de Granada discurre por los viales del Parque Tecnológico de las Ciencias de la Salud, un polígono sanitario de reciente implantación destinado, entre otros usos, a la docencia y la investigación.

Este hecho hace al Metropolitano de Granada un referente de nuevos sistemas de vía y en concreto a Ferrocarriles de la Junta de Andalucía como una de las administraciones que impulsan la innovación tecnológica ferroviaria, marcando un hito en el desarrollo de la tecnología de la vía en placa en nuestro país.

3. Estudios preliminares

3.1. Introducción

La Dirección de I+D+i de ACCIONA lleva trabajando dos años en proyectos de investigación cuyo objetivo primordial es la reutilización de residuos, en línea con los objetivos estratégicos de sostenibilidad y desarrollo de la compañía. Entre ellos, uno de los residuos



Figs. 2 y 3.
Caracterización
del neumático
fuera de uso (NFU).

que mayor problemática medioambiental genera son los neumáticos fuera de uso (NFUs). Fruto del trabajo desarrollado en este campo, se comenzó una línea de investigación orientada al desarrollo de elementos amortiguadores de ruido y vibraciones para sistemas de vía en placa, aprovechando las ventajas del uso del caucho procedente de los NFUs y utilizando una resina con matriz polimérica para conseguir los efectos conglomerantes del conjunto.

Como resultado de las expectativas puestas en este desarrollo se realizó una propuesta de I+D a la Corporación Tecnológica de Andalucía (CTA) presentando un proyecto con el título de **VIANDA**: "Diseño de sistema de VÍA en placa mediante la utilización de una mezcla de neumáticos fuera de uso y resina para su aplicación en líneas de ferrocarril de ANDALUCIA", y que fue aprobada por dicho organismo.

El objeto básico del sistema es el de introducir este elemento amortiguador entre el carril y la losa de hormigón por medio de la realización previa de un encañado del mismo que, además de envolver al carril, le aporte propiedades elásticas que amortigüen las vibraciones producidas por el paso de los trenes y de esta manera eviten afecciones a las edificaciones cercanas.

El sistema de carril embebido tiene todas las ventajas inherentes al de vía en placa, pero además su concepto añade grandes ventajas: mayor durabilidad de carril, ausencia de fijaciones mecánicas, no exige realineaciones de vía, resistencia eléctrica muy alta, absorbe vibraciones y disminuye la emisión de ruido, es un sistema totalmente estanco, y la caracte-

rística más importante, que permite la circulación de vehículos no ferroviarios sobre la placa.

Este sistema ha sido desarrollado en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid de ACCIONA y está patentado y protegido su propiedad intelectual por ACCIONA Infraestructuras.

3.2. Caracterización del material

Respecto a los componentes principales utilizados en la mezcla elastomérica del Sistema M.L.G, se han realizado estudios previos, tanto de los neumáticos fuera de uso (NFUs) con diferentes granulometrías, como de la matriz polimérica que hace la función de conglomerante.

Fue preciso estudiar las propiedades, características y procedencias de cada tipo de NFU y las características de la matriz polimérica, determinándose las características de densidad específica, densidad aparente, porcentaje de vacíos, granulometrías y formas del NFU, así como contar con las características físicas y químicas de la matriz (Figuras 2 y 3)

Posteriormente se realizaron mezclas con dosificaciones variables; Estas mezclas se fabricaron a temperatura ambiente y tiempos de adquisición de propiedades próximos a las 24 horas, sin necesidad de incorporar aditivos que variaran la temperatura y aceleraran el curado. También se analizó en profundidad el comportamiento físico y mecánico de las mezclas

Sobre los estudios en laboratorio, se realizaron una serie de ensayos a compresión, utilizando probetas cilíndricas, con una gran variedad de dosificaciones di-



Figs. 4 y 5. Ejemplo de probetas y ensayo a compresión simple.

ferentes, tanto en lo que se refiere a granulometrías, tipos de matrices y relación NFU - Matriz. Los ensayos de elasticidad proporcionaron información de las deformaciones sufridas por las probetas en función de la fuerza aplicada, para luego calcular y obtener el Módulo de Deformación a la compresión (E_c) y su coeficiente de Poisson (η) (Figuras 4 y 5) de las mismas, tanto a 1, 14 y 28 días de curado, en 3 ciclos de carga y descarga por probeta ensayada.

Para determinar el Modulo de Deformación (E_c), se obtiene del cálculo basado en la formulación matemática de la Ley de Hooke, ecuación de la teoría de la elasticidad, mostrada a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \varepsilon \cdot E \Rightarrow \frac{F}{S} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot E \Rightarrow E = \frac{F \cdot L_0}{S \cdot \Delta L}$$

Donde:

σ : Tensión;

ε : Deformación específica;

E: Modulo de deformación a compresión.

F: Fuerza aplicada;

S: Superficie sobre la que se aplica la carga;

ΔL : Deflexión.

L_0 : Altura inicial de la probeta;

L_f : Altura final de la probeta.

En base a los resultados obtenidos a través de las probetas y tras la elaboración de un modelo de elementos finitos se fabricaron diferentes prototipos del Sistema M.L.G, en función del módulo de rigidez óptimo que se pretendía obtener para el sistema.

3.3. Elaboración de prototipos

Una vez caracterizadas las mezclas, conocido el comportamiento de deformación de las mismas y realizado el diseño de las mismas se pasó a fabricar los prototipos para la realización de los ensayos de comportamiento del sistema y la validación del mismo desde el punto de vista mecánico.

Los prototipos correspondientes al sistema MLG se realizaron de 35 cm. de largo y con la sección que se observa en la fotografía de la figura 6.

Una vez realizados los prototipos se ensayaron en una prensa de compresión simple para hallar su cons-

Fig. 6. Vista de la sección del sistema M.L.G





Fig. 7. Vista general de los prototipos una vez hormigonado.

tante de rigidez estática (K) y posteriormente se hormigonaron hasta conseguir un dado con el fin de simular la losa de hormigón en la que el carril irá embebido y hallar su constante de rigidez estática final. De esta forma se calculó un factor de correlación entre las deflexiones sufridas por el carril encamisado antes de hormigonar y una vez hormigonado (Figura 7) y la relación entre las constantes de rigidez.

4. Ensayos de validación del sistema

Para confirmar los valores obtenidos en los ensayos realizados en el Centro Tecnológico de I+D+i de Acciona, se enviaron prototipos al Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales (LADICIM) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, Cantabria, para que sobre éstos se realizaran todos los ensayos necesarios para poder validar el sistema y poder comprobar su comportamiento frente a cargas estáticas, dinámicas y su comportamiento a fatiga.

Todos los ensayos que a continuación se van a describir se realizaron siguiendo el procedimiento indicado en la Normativa de Metro de Madrid MM-EV-1-2-01: "Fabricación y homologación de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero". Reseñar que, aunque esta normativa no deje ser una recopilación de normas UNE (en especial la Norma UNE-EN 13481-5: Sistemas de sujeción para vía en placa), Metro de Madrid es la única administración pública en España, con una normativa propia y de obligado cumplimiento para la homologación de todos los elementos de vía que se ejecutan en sus instalaciones.

A continuación se enumera la batería de ensayos mecánicos realizados para la validación del sistema M.L.G y que se encuentran descritos con mayor profundidad en la normativa anteriormente citada.

4.1. Ensayos mecánicos

- **Cálculo de la carga equivalente del sistema.** Se considera como carga equivalente del sistema aquella que realizando una iteración entre la deflexión real (procedente de la gráfica carga estática - desplazamiento) y la deflexión teórica (procedente de aplicar la teoría de Zimmerman, y que depende directamente de las características del carril (E, I) y de las propiedades (k) del material elastomérico) produce un error inferior al 1%. En el caso del sistema del Metro ligero de Granada la carga equivalente del sistema es de 24 kN.
- **Ensayo de carga vertical estática:** hasta el 170 % de la carga de prueba equivalente con un ritmo de crecimiento de 2 kN/s. Pretende determinar la rigidez estática secante del sistema que en el sistema MLG se determina en $K = 35 \text{ kN/mm/ml}$ (Figura 8).



Fig. 8. Vista general de la disposición del prototipo en el ensayo de carga vertical estática.



Fig. 9. Vista general del prototipo en el ensayo de carga estática angular (22°).

primer bloque de 1.000.000 de ciclos bajo carga angular (22°) hasta el 100% de la carga equivalente y un segundo bloque de 1.000.000 de ciclos bajo carga vertical hasta el 170% de la carga equivalente. Este ensayo pretende ver una posible degradación del material y evaluar la variación en la rigidez del sistema antes y después de fatiga.

- **Ensayo para la determinación del aislamiento eléctrico del conjunto.** Este ensayo pretende comprobar la posible presencia de corrientes vagabundas que se transmiten entre los carriles y que pueden interferir con los diversos sistemas eléctricos de comunicación y señalización montados a lo largo de la estructura de la vía. Para ello se mide primeramente la resistencia entre los carriles en seco y posteriormente se representan las condiciones de lluvia sobre los carriles objeto del ensayo a través de una plataforma de riego hasta lograr que queden completamente mojados. (Figura 10).

Una vez obtenida la intensidad de la corriente eléctrica en el ensayo, se calcula la resistencia para la mayor medida de intensidad de corriente registrada a lo largo del ensayo.

Finalmente se obtiene que la resistencia eléctrica del sistema es de 6,22 k Ω , por lo tanto se puede concluir que la resistencia eléctrica alcanzada por el sistema M.L.G. es superior a la requerida por la Normativa, que es de 5 k Ω .

- **Ensayo de carga vertical dinámica:** Hasta el 100% de la carga equivalente aplicando bloques de ondas senoidales de 100 ciclos de duración a diferentes frecuencias: 0,5; 1; 5; 10; y 15 Hz. Este ensayo pretende determinar el comportamiento del material frente a las cargas dinámicas inducidas por el paso del ferrocarril a lo largo de la vía y medir el aumento de rigidez con el aumento de la frecuencia.
- **Ensayo de carga angular estática (22°):** hasta el 170 % de la carga de prueba equivalente con un ritmo de crecimiento de 2 kN/s. Este ensayo pretende determinar el comportamiento del material considerando las peores condiciones reales de radios de curvas, peraltes, velocidades y tipos de bogues) (Figura 9).
- **Ensayo de carga angular dinámica (22°):** Hasta el 100% de la carga equivalente. Se aplican bloques de ondas senoidales de 100 ciclos de duración a diferentes frecuencias: 0,5; 1 5; 10; y 15 Hz.
- **Ensayos de fatiga:** 2.000.000 de ciclos de fatiga a 5 Hz. de frecuencia repartidos en dos bloques: un

Fig. 10. Disposición del ensayo de aislamiento eléctrico.



4.2. Resumen de resultados de los ensayos

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos realizados por la normativa en aplicación se comprobó que el sistema M.L.G cumplía todos los requisitos mínimos marcados por dicha normativa, por lo que se pudo validar el sistema de forma satisfactoria.

5. Estudio de amortiguación de vibraciones

Una vez realizado el estudio de las características mecánicas del sistema, se determina la realización del ensayo vibroacústico del mismo para comprobar su eficacia en la atenuación de la transmisión de vibraciones al terreno. Todos estos estudios se han realizado tomando como referencia la Norma Europea UNE-EN ISO 10846-1:1997: "Medida en Laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústico de elementos elásticos".

Tras la revisión de la bibliografía existente se determinó plantear el problema desde dos puntos de vista diferentes:

$$kd = \frac{\text{Re}(R)}{|R|^2 \left(1 - \left(\frac{f_{\text{excitación}}}{f_0} \right)^2 \right)} \quad \eta = -\frac{\text{Im}(R)}{\text{Re}(R)} \left(1 - \left(\frac{f_{\text{excitación}}}{f_0} \right)^2 \right)$$

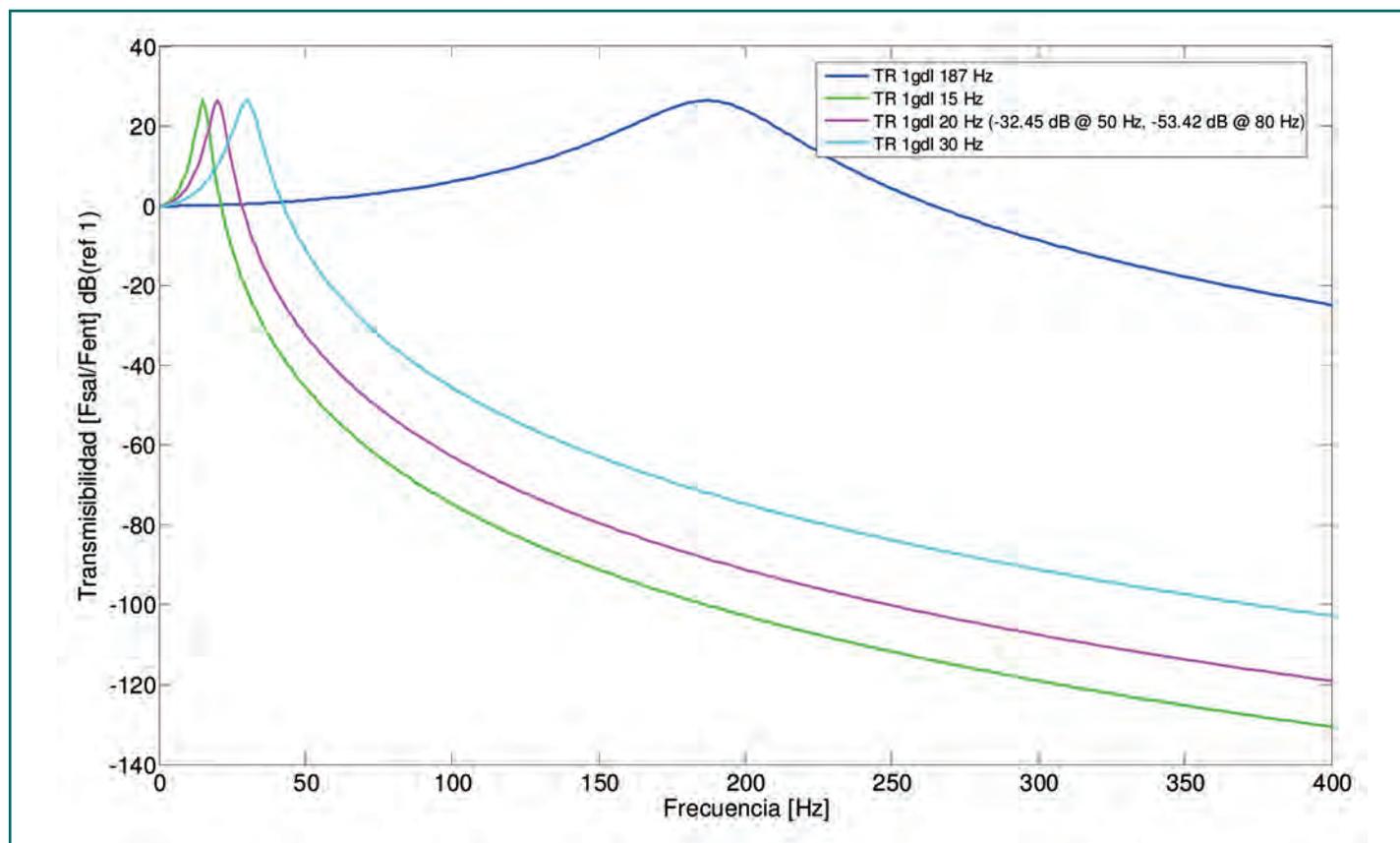
Fig. 11. Fórmula para obtener la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento del sistema.

En primer lugar se realiza el estudio de las propiedades intrínsecas del sistema. Haciendo una simplificación importante del sistema, se interpreta el mismo como un sistema sencillo de un grado de libertad, sistema masa - resorte - amortiguador. Se caracteriza la atenuación de la transmisión de vibraciones de este sistema mediante el factor de transmisión o factor de pérdidas por inserción (transmisibilidad), o lo que es lo mismo, la relación entre la fuerza que excita el sistema y la fuerza transmitida por el sistema.

Para determinar la curva de transmisibilidad del sistema M.L.G se obtienen la rigidez dinámica y el factor de amortiguamiento estructural de elemento amortiguador, a partir de la respuesta en frecuencia del sistema.

El conocimiento de estas características permite interpretar el sistema y evaluar su funcionamiento en

Fig. 12. Curva de transmisibilidad del sistema ante condiciones de carga reales.



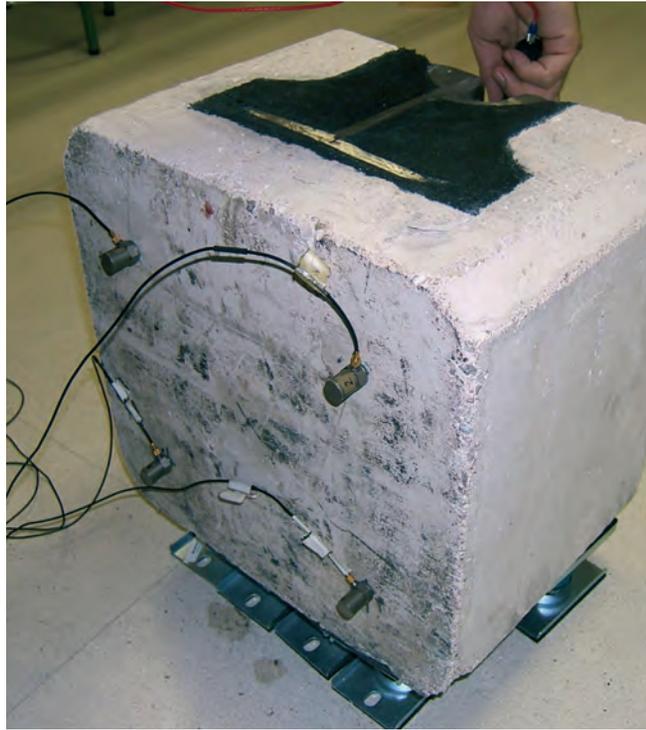
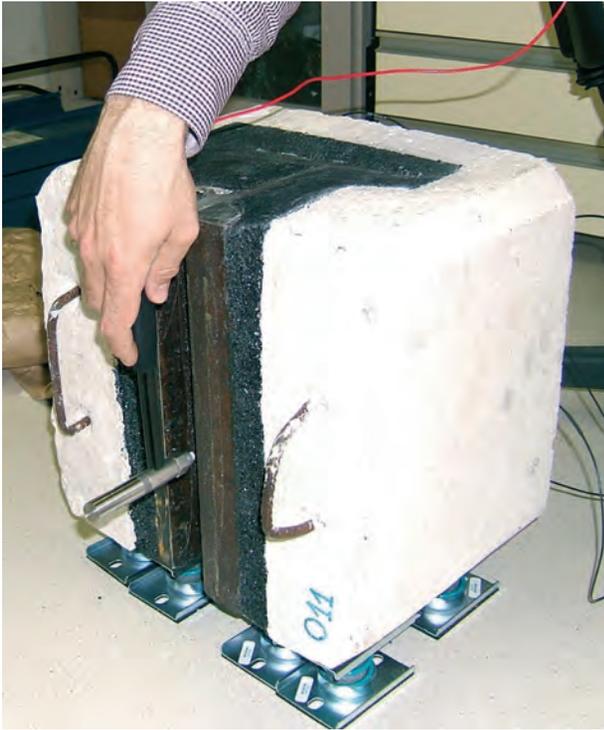


Fig. 13. Ensayo con martillo excitador y acelerómetros triaxiales.

las condiciones de carga reales. En la figura 12 se puede observar cómo varía la curva del sistema M.L.G según diferentes cargas.

En segundo lugar, y a modo de comparativa preliminar entre sistemas con diferentes propiedades, se ha evaluado la diferencia de niveles de velocidad, cuando el sistema es excitado por un impulso, antes y después del elemento elástico. Esta medida ha permitido la discriminación entre los diferentes sistemas desarrollados inicialmente (Figura 13).

Finalmente, a pesar de que los ensayos se han realizado sobre prototipos de pequeñas dimensiones y que tienen que ser apoyados con resultados de mediciones de transmisión de vibraciones in situ en el tramo experimental, los resultados que arrojan indican una atenuación muy importante que situaría, de confirmarse estos resultados, al sistema M.L.G como una alternativa ventajosa a los sistemas utilizados hoy en día.

Si se supone un nivel de emisión de vibraciones de 85 dBv en la vía, una atenuación por transmisión a través del terreno de 1dBv/m y se considera un nivel de inmisión admisible de 68dBv en el interiores de las viviendas próximas a la vía, en función de la distancia se necesitarían tres niveles de atenuación de vibraciones (Figura 14), para los cuales con los resultados de los ensayos realizados se puede determinar que el sis-

tema M.L.G supera el máximo nivel de atenuación requerido por dichos niveles.

De ahí que uno de los problemas que se plantean durante la ejecución de la obra fue que el trazado del tramo de prueba en uno de sus puntos discurre a una distancia inferior a 15 metros de un edificio que alberga el Centro de Investigaciones Biomédicas y que cuenta con laboratorios que por sus características exigen que el paso del Metro Ligero transmita la menor cantidad posible de vibraciones. Si bien en este tramo se ha utilizado el Sistema MLG para el encajisado de los carriles y éste logra una atenuación de vibraciones que cumple con las exigencias del proyecto, la Dirección de Obra solicitó que se estudiara la posibilidad de colocar adicionalmente una manta elastomérica bajo la losa de vía para aumentar la capacidad de atenuación del sistema y asegurar que el paso del Metro Ligero no interfiriese con las labores desarrolladas en el CIB.

DISTANCIA	ATENUACIÓN REQUERIDA	ATENUACIÓN ACCIONA MR
Menor de 7m	19 dBv	>20 dBv
Entre 7m y 12m	10 dBv	>20 dBv
Mayor de 12m	6 dBv	>20 dBv

Fig. 14. Comparativa entre valores de atenuación requeridos y esperados para el sistema M.L.G.

Fig. 15. Vista general de la zona de acopio de carriles.



Debido a que la adición de elementos elásticos al sistema de amortiguación de vía implica unas condiciones de entorno diferentes y mayores deflexiones en el carril que las estudiadas inicialmente para el Sistema MLG, se debió hacer un reestudio de la curva de atenuación y ubicar la frecuencia de resonancia para comprobar que no exceda el valor máximo permitido.

Para ello se parte de un modelo mecánico del sistema que se compone de los diferentes elementos amortiguadores presentes en el conjunto de la vía (encamisado, manta elastomérica, losa de hormigón y terreno) para posteriormente realizar una analogía eléctrica que nos permite trabajar con las impedancias de los diferentes elementos, con el objetivo de obtener las pérdidas por inserción del sistema y por tanto la curva de transmisión del sistema.

Finalmente de este estudio se concluye que no es necesario el uso de la manta elastomérica en este tramo para disminuir las vibraciones.

6. Puesta en obra

La puesta en obra se realiza en dos fases independientes que son, por un lado el encamisado de carri-

les propiamente dicho y por otro lado, la colocación en la vía de los carriles ya encamisados.

6.1. Encamisado de Carriles

El encamisado se realiza impregnando previamente el carril con una resina de imprimación, posteriormente se introduce en un molde que es llenado con la mezcla de NFU y resina a la cual se le ejerce presión y temperatura para el curado. Aplicar la mezcla directamente sobre el carril garantiza la perfecta adherencia del encamisado evitando cualquier holgura y espacios vacíos.

Las dimensiones del encamisado, y por tanto de los moldes tienen un estricto control geométrico, usando separadores en la zona de apoyo y centradores para el carril a lo largo del molde.

Una vez que la resina ha adquirido las condiciones mínimas de consistencia se extrae el carril ya encamisado para trasladarlo a la zona de acopio (Figura 15).

Para poder realizar la soldadura entre carriles se deja una longitud de 1,00 m. sin encamisar en ambos extremos, que serán encamisados posteriormente in situ siguiendo un procedimiento similar al descrito anteriormente.

Desarrollo y experimentación del sistema M.L.G. (Metro Ligero de Granada): primer sistema nacional de vía en placa embebida en hormigón realizado con una mezcla de caucho proveniente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) y resina de matriz polimérica



Figs. 16 y 17.
Colocación de los carriles y desvío mediante pórticos.



Fig. 18. Vía hormigonada y acabado de adoquines.

6.2. Colocación de carriles

Los carriles que ya han sido encamisados son llevados a la vía, donde después de soldarlos entre sí con soldadura aluminotérmica y realizar el remate del encamisado en dicha zona se colocan en su posición definitiva utilizando una serie de pórticos colocados cada 2,00-2,50m de los que se suspenden los carriles.

Los carriles se fijan a cada pórtico en dos puntos que aseguran el ancho internacional de vía de 1.435 mm. Los pórticos a su vez cuentan con husillos verticales y horizontales que permiten ajustar la alineación y nivelación de la vía de forma precisa. (Figura 16).

Con los carriles colocados en su posición definitiva se procede a hormigonar (Figura 17) la losa de apoyo logrando mantener la correcta posición de los carriles lo cual garantiza la elevada calidad de la vía y el confort posterior del viajero al circular por ella.

6.3. Ensayos de Rigidez

Para comprobar la correcta ejecución del encamisado de los carriles se realiza un ensayo de rigidez

con una prensa móvil autónoma que consta de un pistón hidráulico con una célula de carga montada en un bastidor anclado al suelo, dos LVDT para medir deformaciones y un registrador de lecturas. Con este conjunto se le aplica al carril una fuerza puntual y se mide la deformación del conjunto del carril encamisado. Haciendo la relación entre fuerza y deformación logramos calcular la rigidez del sistema. Los ensayos se realizan en un banco de pruebas antes de hormigonar (Figura 19) y posteriormente in situ con el carril ya hormigonado.

La máquina utilizada para comprobar la rigidez in situ del elemento amortiguador de la vía en placa ha sido diseñada y patentada por ACCIONA Infraestructuras en el Centro Tecnológico de I+D+i de Madrid.

6.4. Cálculo de deflexiones de vía

En función del estudio de amortiguación de vibraciones descrito anteriormente y ante la posible necesidad de insertar debajo de la losa de vía una manta elastomérica fue necesario realizar un estudio de las deflexiones sufridas por el conjunto de la

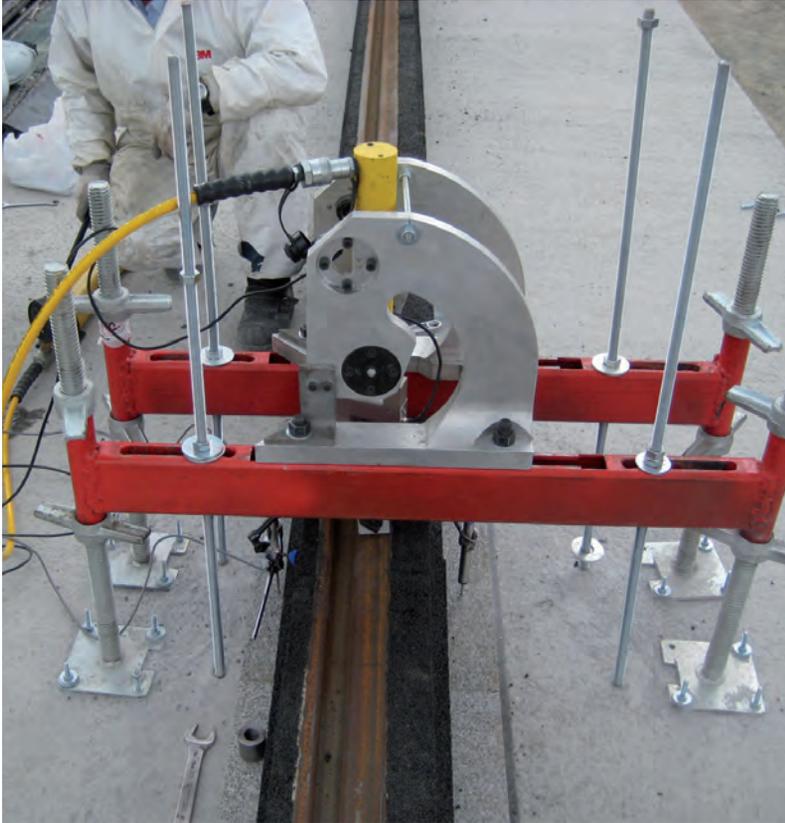


Fig. 19. Auscultación de los carriles in situ previa al hormigonado.

vía, ya que la adición de elementos elásticos al sistema de amortiguación de vía implica unas condiciones de entorno diferentes y mayores deflexiones en el carril que las estudiadas inicialmente para el Sistema MLG, y que no podían exceder el valor máximo permitido, que en este caso no podría ser superior a los 3 mm.

Una vez analizadas las características de los diferentes elementos de amortiguación presentes en la vía (encamisado, manta elastomérica y terreno), y en base a las teorías tradiciones de mecánica de vía (Zimmerman, Winkler, Schwedler) se puede observar que en el caso de instalar adicionalmente una manta elastomérica al sistema M.L.G. la deflexión sufrida por el conjunto de la vía sería superior al establecido de 3 mm, mientras que la deflexión sufrida únicamente con el sistema M.L.G sería de 1,81 mm, por lo que complementando estos datos con los resultados del estudio de amortiguación de vibraciones, en los que quedaba reflejado que en todo momento se cumplían los niveles de atenuación en edificaciones cercanas, se optó por no instalar finalmente una manta elastomérica que complementara al sistema M.L.G.

7. Ventajas del sistema M.L.G.

El sistema de vía embebido M.L.G. en placa de hormigón tiene innumerables ventajas, entre las que destacan:

- **Transformación de un residuo (Neumático Fuera de Uso) en un recurso productivo evitando afectaciones al Medio Ambiente:** Se recicla un residuo como es el NFU, lo que reduce el impacto sobre el Medio Ambiente. Se puede cuantificar, utilizando como base fuentes del gestor de neumáticos fuera de uso, que se revalorizan 7 neumáticos de turismo por metro lineal de vía, lo que supone un total de 5.211 neumáticos en el tramo de prueba del sistema M.L.G
- **Alta atenuación de vibraciones:** en el rango de frecuencias comprendido entre 6,3Hz y 20kHz se consigue una atenuación global mayor de 20Db para este sistema. Este parámetro marca la atenuación de las vibraciones generadas por el tránsito del Metro Ligero en los edificios colindantes.
- **Elevado confort del viajero al garantizar la geometría de la vía:** los tres parámetros que marcan la calidad de la vía: nivelación, alineación y ancho de vía se consiguen con pórticos metálicos extensibles sobre los que se sustenta la vía antes del hormigonado. Este es el parámetro principal que repercute en el confort del viajero.
- **Fácil de puesta en obra:** los carriles llegarían a vía como un único bloque monolítico (carril+encamisado), sin posibilidad de despegues, holguras o falta de adherencia por lo que se trabajaría como si fuera un único elemento, además el propio encamisado haría de encofrado perdido durante las fases de hormigonado.
- **Bajo coste de mantenimiento:** No tiene fijaciones mecánicas, se consigue una mayor durabilidad del carril y no es necesario realizar realineaciones de vía.
- **Permite la circulación de vehículos no ferroviarios sobre la vía:** En caso de emergencia pueden circular vehículos de auxilio sobre la plataforma y se pueden realizar cruces con tráfico de vehículos no ferroviarios en calles.
- **Primer desarrollo de un sistema de vía en placa nacional:** ACCIONA Infraestructuras ha desarrollado en su Centro Tecnológico de I+D+i de Ma-

drid el primer sistema de vía en placa desarrollado íntegramente en nuestro país.

- **Experiencia piloto en Andalucía:** La ejecución del tramo de prueba de 800 metros de vía simple pone a la vanguardia de la tecnología a Andalucía y en particular al metro ligero de Granada.

8. Conclusiones

Tras la realización de los ensayos previos de validación del sistema y la ejecución del tramo de prueba se puede afirmar que la viabilidad técnica de montaje y ejecución en obra ha sido demostrada con el tramo de prueba realizada en el tramo II Campus de Salud de la Línea Metropolitana 1 de Metro Ligero de Granada, implicando esta actuación un hito dentro del desarrollo de la tecnología ferroviaria y en concreto de los sistemas de vía en placa dentro de nuestro país.

El desarrollo futuro de esta tecnología con nuevas configuraciones y ampliando el rango de rigidez del sistema, abre la puerta para futuros proyectos de investigación donde se creen nuevas alternativas para

sistemas de vía en placa que puedan ser utilizados tanto en el metro subterráneo, como el ferrocarril convencional y la alta velocidad.

9. Agradecimientos

Para concluir queríamos expresar nuestro agradecimiento a todas las entidades, así como su personal involucrado, que han permitido la realización de este tramo de prueba y que han sido imprescindibles para el desarrollo y buen fin de este proyecto.

- Ferrocarriles Andaluces de la Junta de Andalucía (Administración Pública).
- Oficina Técnica de Estudios y Control de Obras, S.A (Dirección de Obra).
- Delegación de Andalucía de ACCIONA Infraestructuras (Constructora).
- Hormigones Asfálticos Andaluces, S.A (Constructora).
- Signus Ecovalor (Entidad Gestora de neumáticos fuera de uso). ♦

Referencias:

-De los tranvías a los Metros Ligeros en la Comunidad de Madrid. Madrid: Consejería de transportes e infraestructuras, (MINTRA, Madrid, Infraestructuras del Transporte), Consorcio Regional de Transportes de Madrid, con la colaboración de Metro de Madrid. 2008. 436 p.: il. col. ISBN: 978-84-451-3177-0

-Especificación de vía "Fabricación, homologación, suministro y recepción de vía en placa con tacos prefabricados embebidos en elastómero (MM-EV-1-2-01) de Metro de Madrid.

-Modern Railway Track. Second Edition (2001).Coenraad Esveld. Delft University.

-Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2003): "UNE-EN 13481-5. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 5: Sistemas de sujeción para vía en placa".

-Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical. Tesis Doctoral P. Fonseca Teixeira. Universidad Politécnica de Cataluña. Depósito Legal: B-34313-2005/84-689-2536-5

-Harris C.M. Handbook of noise control. McGraw-Hill, 1957.

-Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-1 (ISO 10846-1:1997). Medida en laboratorio de las propieda-

des de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 1. Principios y líneas directrices.

-Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-2 (ISO 10846-2:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 2. Rigidez dinámica de soportes elásticos para movimiento de translación, método directo.

-Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR UNE EN ISO 10846-3 (ISO 10846-3:1997). Medida en laboratorio de las propiedades de transferencia vibroacústica de elementos elásticos. Parte 3. Método indirecto par la determinación de la rigidez dinámica de soportes elásticos en movimientos de translación