MONITORIZACIÓN, ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN ZONAS DE TRANSICIÓN EN ALTA VELOCIDAD

Antonio Luis JIMÉNEZ GARCÍA¹, Ricardo GALÁN DE VEGA², Alicia ARCE RUBIO³

Resumen

En el diseño, y posterior construcción, de un trazado ferroviario, las zonas de transición entre diferentes tipos de infraestructura o superestructura, son sensibles de presentar problemas. Estas zonas están localizadas principalmente en la transición entre estructura y terraplén, denominados bloques técnicos, y las que se producen en las transiciones de vía en placa a vía sobre balasto. En dichas zonas se produce una variación brusca de la rigidez vertical de la vía, la cual puede dar lugar a problemas en la explotación y mantenimiento de la plataforma ferroviaria.

El objeto de este trabajo es llevar a cabo un análisis del comportamiento de estas zonas a partir de casos reales que se encuentren actualmente en explotación y valorar las posibilidades de mejora de estas transiciones para su posible adaptación el nuevo sistema de vía en placa.

Para ello, se ha realizado una monitorización y modelado con el principal objetivo de describir el comportamiento de la vía en dichas zonas de transición durante el paso de vehículos de alta velocidad, a partir de casos reales que se encuentran actualmente en explotación.

Del resultado de la monitorización y modelado realizado, se obtienen los parámetros óptimos de la transición de rigidez en las zonas problemáticas de estudio, permitiendo de esta manera la optimización de posteriores diseños de este tipo de zonas.

Este trabajo de investigación puede servir como recomendación para garantizar un comportamiento correcto de la vía y el vehículo, obteniendo un adecuado ciclo de vida de la estructura en zonas de transición.

Palabras clave: zonas de transición, rigidez vertical, monitorización de la vía, modelo de comportamiento real, parámetros óptimos

1 INTRODUCCIÓN

El objeto de esta actividad es tratar de resolver la problemática existente en las zonas de transición entre diferentes tipos de superestructura, así como en las zonas de transición entre distintos tipos de subestructura, fundamentalmente las transiciones entre estructuras y terraplenes.

Para llevar a cabo estos trabajos se ha procedido a realizar las siguientes tareas:

• En primer lugar se ha llevado a cabo una búsqueda geográfica y análisis de toda la información disponible de zonas de transición de vía en placa a vía sobre balasto construidas en líneas de alta velocidad actualmente en explotación. De entre todas las zonas catalogadas se ha procedido a seleccionar aquellas en las que era posible llevar a cabo una auscultación y estudio pormenorizado de las mismas.

A continuación se ha procedido a monitorizar las zonas de transición seleccionadas, realizando una campaña de recogida de datos para registrar el comportamiento de dichas zonas ante el paso de vehículos.

¹ Fundación Ayesa. aljimenezg@ayesa.com

² Fundación Ayesa. rgalan@ayesa.com

³ Fundación Ayesa. aarce@ayesa.com

• Con la información obtenida se ha diseñado un modelo numérico que permite reproducir el comportamiento real de la infraestructura y el material móvil al paso de las circulaciones. Esta información ha permitido calibrar el modelo y validar los resultados obtenidos.

En base al empleo de este modelo se ha conseguido modelizar el comportamiento de los vehículos ferroviarios al circular por las zonas de transición en estudio.

• El modelo ha permitido también determinar los parámetros óptimos de la transición de rigidez en las zonas estudiadas que garantizaría un correcto comportamiento del vehículo y de la vía, así como para conseguir un adecuado ciclo de vida de la infraestructura.

Los resultados obtenidos han permitido validar las soluciones técnicas existentes. Esta validación se ha realizado planteando diferentes alternativas de mejora para estas soluciones.

2 MONITORIZACIÓN DE LAS ZONAS DE TRANSICIÓN SELECCIONADAS

2.1 Zonas de estudio seleccionadas

Para la selección de las zonas de transición entre vía en placa y vía sobre balasto más adecuadas para elaborar el modelo de comportamiento resulta necesario definir en primer lugar los tramos de la red de alta velocidad sobre los que se ha dispuesto vía en placa para, en base a ellos, determinar la ubicación de estas zonas de transición.

De la documentación consultada, se observa que los tramos en los que se suele disponer este tipo de superestructura, son aquellos situados en las zonas de estaciones o bien en túneles y viaductos.

Para el análisis de las zonas de transición entre vía en placa y vía sobre balasto se ha optado por buscar zonas no situadas en estaciones, ya que en estos puntos las velocidades de circulación son relativamente bajas. Desde el punto de vista del análisis del comportamiento de este sistema, resulta mucho más interesante el análisis de zonas de transición donde las velocidades de circulación son más elevadas, ya que las aceleraciones verticales a las que se ve sometida la caja de los vehículos son mayores, y también por lo tanto los esfuerzos a los que se ve sometida la vía.

Se ha llevado a cabo un detallado estudio de todos los túneles que se encuentran en servicio en las líneas de alta velocidad y que dispongan de vía en placa.

De igual modo, en lo que respecta a las transiciones entre estructuras y terraplenes, se ha intentado localizar aquellas zonas en las que la superestructura de vía estuviese constituida por algún tipo de vía en placa.

Del análisis de estos datos, la zona finalmente escogida para realizar los trabajos de monitorización de vía se encuentra localizada en el acceso ferroviario de alta velocidad a la ciudad de Valencia.

El tramo en cuestión se encuentra situado en la margen izquierda del encauzamiento del río Turia, y cuenta con dos transiciones que se ajustan a la tipología de transiciones que se pretende estudiar. Por un lado la transición estructura-terraplén situada en el estribo este del viaducto sobre el río Turia (se trata del único viaducto de la red de alta velocidad que actualmente se encuentra en servicio, y sobre el que se ha dispuesto vía en placa), y por otro la transición entre vía en placa y vía sobre balasto situada en la boca oeste de los túneles de acceso a la ciudad de Valencia.

La reducida distancia entre ambas zonas es precisamente lo que ha motivado la selección de esta zona de transición para realizar la monitorización de vía, ya que se reducen de forma considerable los tiempos y costes de instalación del sistema de monitorización.



Figura 1. Vista general conjunta de las dos zonas de transición seleccionadas

2.2 Trabajos previos a la monitorización

2.2.1 Diseño del sistema de monitorización

El sistema que se planteó para llevar a cabo la monitorización de las dos zonas de transición presenta el mismo esquema de funcionamiento y está formado por los siguientes tres tipos de dispositivos:

- Sensores acelerómetros, alojados dentro de un encapsulado
- Dispositivos inalámbricos de monitorización. Nodos
- Dispositivo recolector de datos. Nodo principal



Figura 2. Arquitectura del sistema de monitorización

El sistema de funcionamiento consiste en la recolección de datos sobre los desplazamientos producidos en la vía por parte de una serie de sensores acelerómetros, que serán enviados a los dispositivos inalámbricos a través de una conexión cableada.

El dispositivo encargado de recibir la información de todos los nodos estaría dotado con WiFi a través de un router MiFi (router móvil 3G). Esto permitiría guardar la información en un servidor web accesible desde cualquier lugar con acceso a internet y así se evitaría tener que estar en la vía durante la prueba.

El objeto de esta retransmisión de datos es poder monitorizar en tiempo real el comportamiento de la vía y detectar si alguno de los nodos no está registrando datos correctamente. Esto permitiría poder acceder a la vía, en el caso de que fuese posible, y corregir este fallo.



Figura 3. Esquema de disposición de los nodos en ambas zonas de transición

2.2.2 Planificación de los trabajos.

En una primera instancia, fue necesaria la redacción de una memoria explicativa que exponían los trabajos a realizar, donde se solicitaba autorización al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), con objeto de poder llevar a cabo la monitorización de varias zonas de transición en plataforma de alta velocidad.

Tras la aprobación de los trabajos de monitorización y con carácter previo a la realización de los mismos, se llevó a cabo una planificación de dichos trabajos, a requerimiento de ADIF, y como herramienta para poder optimizar el proceso y evitar posibles errores.

La instalación de los elementos necesarios para realizar la monitorización se realizaría en horario nocturno, tal y como se acordó en las reuniones mantenidas con ADIF, con objeto de evitar afecciones a la explotación.

La fecha finalmente escogida fue el jueves 24 de julio de 2014.

- 2.2.3 Desarrollo de los trabajos de monitorización de vía
- 2.2.3.1 Despliegue del sistema de monitorización. Jornada 1
 - 1) Replanteo de la ubicación de los sensores acelerómetros

En primer lugar, y mediante el empleo de una cinta métrica, se procedió al replanteo de los puntos donde, de acuerdo con la memoria de los trabajos, estaba prevista la fijación de los sensores acelerómetros.



Figura 4. Replanteo de la ubicación de los sensores acelerómetros

Este punto se marcó sobre la superficie exterior del patín del carril mediante una tiza, indicando a su vez la distancia de dicho punto al punto 0, en el que se produce el inicio de la transición.

Todos estos puntos presentan la característica de que se encuentran situados en el punto medio entre dos traviesas o puntos de apoyo del carril.

2) Medida de la inclinación del carril

Una vez realizado el replanteo de cada punto donde se iba a disponer un sensor acelerómetro, se procedió a la medida de la inclinación del carril en esa misma sección.

Esta medición se realizó mediante el empleo de una regla de peralte. Este instrumento, habitualmente empleado en los trabajos de vía, permite obtener el valor del peralte en una sección determinada, apoyando la misma sobre la cara superior del carril y fijándola mediante una serie de topes para evitar su desplazamiento cuando se realiza la medición.

A partir de esta medición se puede deducir la inclinación de la superficie donde se fijará el acelerómetro, ya que la inclinación del carril (1:20) y la geometría del mismo son parámetros fijos.



Figura 5. Medida de la inclinación del carril mediante el empleo de una regla de peralte.

3) Fijación de los sensores acelerómetros al carril

Tras realizar el replanteo de la posición de los sensores acelerómetros se procedió a la fijación de los mismos a la superficie exterior del patín del carril.

Tal y como estaba previsto y recogido en la memoria de los trabajos, esta fijación se realizó mediante la aplicación de un adhesivo del tipo Loctite, empleando las herramientas suministradas por el fabricante, a la superficie inferior de la carcasa plástica donde se encontraban alojados los sensores.

Posteriormente dicha carcasa se disponía sobre la superficie exterior del patín del carril, en la posición previamente marcada, aplicando sobre la misma presión hasta que adhesivo adquiría la resistencia adecuada (del orden de 30 segundos).



Figura 6. Fijación de los sensores acelerómetros a la superficie del patín del carril

4) Extendido del cableado y posicionado de los nodos

Una vez que el sensor se encontraba correctamente adherido a la superficie del carril se procedió al extendido del cableado que unía dicho sensor con el nodo. El cableado que unía los sensores acelerómetros con su correspondiente nodo se trasladó a la zona de monitorización premontado, con objeto de evitar posibles errores en la instalación y reducir el tiempo de las labores de despliegue.

Los nodos, alojados dentro de sus correspondientes carcasas plásticas de protección, se dispusieron alejados de la zona de afección de vía, siguiendo las instrucciones del piloto de vía que facilitó ADIF para el seguimiento y control de los trabajos.





5) Fijación de los nodos y el cableado de conexión

Con objeto de evitar el movimiento del cableado y de los nodos con el paso de los trenes se procedió a fijar los mismos a la plataforma de vía.

En aquellos casos en los que existían superficies de hormigón próximas se fijaron tanto el cableado como los nodos a las mismas mediante el empleo de cinta americana.

En el resto de los casos se procedió a inmovilizar estos elementos simplemente con las piedras que componían el lecho de balasto.



Figura 8. Fijación de los nodos y el cableado de conexión

6) Conexión del nodo principal al armario

Una vez colocados todos los sensores con sus correspondientes nodos se procedió a instalar los nodos principales en los armarios facilitados por ADIF.

Estos armarios permitían conectar el equipo portátil a una toma de corriente, y a su vez garantizar que dicho equipo quedaba protegido durante los trabajos de monitorización





Figura 9. Conexión del nodo principal al armario

7) Conexión de las baterías de los nodos y retirada de vía

Tras instalar el nodo principal en los armarios se abrieron las tapas de las cajas donde iban alojados los nodos para proceder a conectar las baterías. Esta labor se realizó en último término para poder ahorrar en el consumo de las baterías que, tal y como se ha señalado en apartados anteriores, resultaba ser uno de los factores limitantes del proceso. Esta decisión, como se vería más adelante, fue acertada ya que en la retirada de los equipos se detectó que algunas baterías se habían agotado, aunque el registro de información fue completo.

Una vez conectadas las baterías se observó que la antena con la que iban equipados algunos de los nodos emitía una señal luminosa que, aunque de baja intensidad, podía afectar a la explotación de la línea si algún conductor se veía sorprendido por la misma. Es por esto que, siguiendo las instrucciones del piloto de vía, se procedió a tapar las mismas con cinta aislante, hecho que no afectaba al funcionamiento del sistema.



Figura 10. Sellado de la antena de algunos de los nodos mediante cinta aislante

Una vez realizadas estas operaciones se procedió a realizar una última comprobación de la instalación del sistema y se revisó que la plataforma de vía había quedado totalmente despejada.

2.2.3.2 Monitorización de la vía. Recogida de datos. Jornada 2

Una vez finalizado el despliegue de todos los elementos necesarios para realizar la monitorización de vía, se mantuvo a los sensores acelerómetros durante toda la jornada del jueves 24 de julio de 2014 registrando los datos de la aceleración vertical que sufría el carril en cada sección de vía considerada al paso de los trenes.

Esta información quedó registrada físicamente en las tarjetas de memoria que se dispusieron en cada uno de los nodos a los que iban conectados los sensores.

No obstante lo anterior, y de acuerdo con el diseño planteado para la arquitectura del sistema, la recogida de esta información fue monitorizada a distancia, con objeto de poder detectar la aparición de algún tipo de error en este proceso. Esto permitiría poder acceder a la vía, según lo acordado con ADIF, en el intervalo de tiempo existente entre dos trenes consecutivos, para poder chequear el sistema y corregir los fallos que se pudiesen estar produciendo.

Por desgracia, y a pesar de todas las pruebas realizadas en jornadas anteriores, esta labor de monitorización no pudo realizarse, y hubo que esperar toda la jornada para poder tener acceso a la vía y comprobar que los datos se habían registrado correctamente.

El fallo se produjo debido a que la tensión de alimentación suministrada por los armarios a los que iban conectados los nodos emisores era insuficiente para alimentar a todos los elementos del sistema. La conexión a esta fuente de alimentación solo pudo realizarse durante los trabajos de despliegue del sistema la noche anterior, bajo la supervisión de personal de ADIF.

Afortunadamente, los sensores almacenaron correctamente todos los datos en las tarjetas de memoria.

2.2.3.3 Retirada del sistema de monitorización. Jornada 3

Tras el paso del último tren del que se tomaron datos, en la madrugada del día 24 al día 25 de julio de 2014 se accedió nuevamente a la vía para proceder a la retirada del sistema de monitorización.

La retirada de los sensores acelerómetros se realizó, tal y como estaba previsto y se había ensayado previamente, mediante la aplicación de un golpe sobre la carcasa que protege el sensor utilizando un simple martillo.



Figura 11. Retirada de los sensores de los carriles mediante el empleo de un martillo

Tal y como se puede observar en las siguientes figuras el sistema de fijación seleccionado permite la retirada sencilla de los sensores sin que ni la carcasa donde va alojado el sensor ni la superficie del patín del carril donde se encontraba adherida sufran ningún tipo de desperfecto.



Figura 12. Imagen del encapsulado del sensor una vez retirado



Figura 13. Imagen del estado en el que queda la superficie del carril tras la retirada del sensor

Una vez retirados los sensores se procedió a retirar también el cable y los nodos.

Las cajas donde se encontraban alojados los nodos se abrieron una a una para poder ir extrayendo las tarjetas de memoria donde se habían almacenado todos los datos para que no sufrieran ningún tipo de desperfecto.





Figura 14. Apertura de los nodos y extracción de las tarjetas de memoria. Comprobación de los datos registrados

Se procedió a la apertura de los armarios de comunicaciones en los que había permanecido alojados los equipos emisores, desconectando los mismos de la fuente de alimentación a la que se encontraban conectados.

Una vez realizadas estas operaciones, y recogido todo el material, se realizó una inspección general de la zona donde se habían realizado los trabajos para comprobar que la vía se encontraba totalmente despejada y en las mismas condiciones que al inicio de los mismos.

3 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE MONITORIZACIÓN

Con los datos recogidos se pueden realizar análisis encaminados a la caracterización del comportamiento mecánico de las transiciones monitorizadas al paso de los trenes y al pronóstico de la respuesta de nuevos tipos de bloques técnicos.

El fin este estudio será la determinación de la calidad de las transiciones cuyas aceleraciones se han medido en campo y proponer una mejora de las mismas, dado el caso de que esto sea posible.

Para ello se estudiarán primero los datos recogidos, y se filtrarán a fin de obtener unas series temporales adecuadas para posteriores análisis. A través de ellas se obtendrán las velocidades y los desplazamientos en los nodos monitorizados.

Posteriormente se obtendrán las propiedades mecánicas de la plataforma y el terreno en el que ésta se asienta mediante una técnica llamada SASW, que se explicará posteriormente, y que se basa en análisis espectrales de las aceleraciones convenientemente filtradas.

El procedimiento utilizado para el análisis de los datos provenientes de la monitorización ha sido el siguiente:

- 1) Determinación de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en los nodos.
- 2) Obtención de la curva de dispersión experimental.
- 3) Inversión de las curvas de dispersión experimentales.
- 4) Obtención de los perfiles geotécnicos de las transiciones.

De esta forma, con los datos registrados por los sensores, y tras acometer las operaciones necesarias para limpiar de ruidos y anomalías las series temporales, se han conseguido unas curvas de dispersión que, al invertirse, dan lugar a perfiles longitudinales de velocidades de ondas S que se asemejan bastante a los valores esperados, y por tanto se consideran correctos.

Una vez que se tuvieron todos los perfiles de velocidades de ondas S se procedió a su compendio para obtener un perfil general de propiedades de propagación de los suelos. La metodología seguida dio como resultado perfiles que se consideraron satisfactorios.

Los perfiles de velocidades de ondas S obtenidos aportan, para ambas transiciones monitorizadas, un terreno bastante homogéneo, con intercalaciones de estratos de menor y mayor capacidad mecánica que la superficie.

Este resultado es creíble teniendo en cuenta la ubicación de las zonas de transición estudiadas y su historia geológica. Ambas se hallan en las cercanías de río Turia, en Valencia, y por tanto se enclavan dentro de la llanura de inundación del río. De esta forma, el terreno bajo las transiciones estará formado por diferentes capas de grano arrastrados y depositados allí por la corriente del río. Entonces, dependiendo de la violencia de la crecida que movilizó material río arriba y lo condujo hasta el sitio de estudio, el material será más grueso o menos, y por tanto tendrá mayor o menor velocidad de ondas S.

De esta forma, es razonable hallar intercaladas capas de diferentes capacidades mecánicas, o diferentes valores de velocidad de propagación de ondas de corte, lo que se considera una validación de los resultados de los análisis conducidos.

De todas formas, se puede afirmar que el trabajo realizado ha sido capaz de sacar el máximo partido a los datos de los acelerómetros, y que los resultados obtenidos, pese a ser verosímiles y aceptables, podrían ser algo más precisos si se mejorara la calidad de los datos de entrada. Esto quiere decir que la metodología de análisis seguida es capaz de reportar, dadas unas series temporales de aceleraciones, las características mecánicas del terreno donde se encuentra la plataforma ferroviaria.

Como conclusión general, es de destacar la gran labor llevada a cabo durante el análisis de los datos de monitorización, ya que a partir de escasas mediciones se han conseguido resultados altamente satisfactorios para los perfiles geotécnicos de las transiciones y los subsuelos donde se asientan.

4 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LAS ZONAS DE TRANSICIÓN

Se pretende reproducir la respuesta en aceleraciones obtenidas mediante la monitorización a través de la resolución de modelos numéricos de elementos finitos y diferencias finitas, a fin de que dichos modelos sirvan de base al pronóstico del comportamiento mecánico de la transición a lo largo del tiempo y para estudiar la mejora en el desempeño de sus funciones tras tomar alguna medida de refuerzo geotécnico.

En esta línea se desarrollaron tres modelos diferentes para cada transición:

- Modelo estático tridimensional de diferencias finitas mediante FLAC3D.
- Modelo dinámico bidimensional de elementos finitos mediante PLAXIS 2D AE
- Modelo bidimensional de placa sobre cimiento de Winkler.

Los dos primeros modelos son necesarios debido a que el modelo tridimensional se emplea para ajustar el modelo dinámico bidimensional, que debe simular el comportamiento tridimensional de la vía empleando sólo dos dimensiones, ya que el paso de un tren provoca una excitación dinámica con un gran efecto tridimensional. Por otra parte, resolver un modelo dinámico tridimensional tiene un coste computacional tal, que resulta inviable a efectos prácticos, con lo que la elaboración de los dos modelos se convierte en una necesidad para el desarrollo de la investigación.

Con los perfiles de terreno obtenidos se determinan las deformaciones para una carga unitaria estática aplicada sobre la vía mediante el modelo tridimensional estático. Posteriormente se ajustan los modelos de Winkler tanto para el modelo tridimensional como para el bidimensional, obteniéndose el coeficiente de balasto correspondiente a la plataforma ferroviaria. Con los dos ajustes se pueden determinar las acciones a introducir sobre el modelo dinámico bidimensional para que se produzcan los mismos desplazamientos que en el modelo tridimensional, con lo que se pueden calibrar ambos modelos.

Este proceso se lleva a cabo debido al enorme esfuerzo computacional que requiere la resolución de un modelo dinámico tridimensional, lo cual lo hace inviable a efectos de posteriores análisis, en los que se variará la geometría de las transiciones a fin de encontrar una configuración que produzca un mayor confort para el pasajero.

De esta forma, el ajuste de un modelo bidimensional al comportamiento del tridimensional produce un modelo que aporta resultados precisos con un coste de computación asumible para futuros análisis

4.1 Ajuste de los modelos numéricos

A fin de utilizar los modelos numéricos dinámicos bidimensionales, debido al consiguiente ahorro en tiempo de computación, es necesario proceder al ajuste de los mismos con respecto a los resultados de los modelos estáticos tridimensionales.

Para esto se determinaron los desplazamientos en los puntos en los que se dispusieron los acelerómetros para una carga uniforme unitaria sobre la plataforma en los dos modelos de cada transición, y se ajustaron los parámetros de dos modelos de Winkler de forma que éstos que resultaran en las mismas deformaciones que los modelos numéricos habiendo aplicado las mismas cargas.

De esta forma, a través de un sencillo modelo de Winkler, se consigue reproducir en una sección bidimensional el comportamiento de la vía, de carácter estrictamente tridimensional, ante una carga estática. Siendo esto así, y conociendo que el método de los elementos finitos integra las ecuaciones de movimiento suponiendo el equilibrio estático de las fuerzas en diferentes momentos temporales, los modelos bidimensionales ajustados serán capaces de calcular de manera precisa el comportamiento dinámico en el tiempo de la vía ante el paso de un tren.

4.2 Determinación de las cargas dinámicas introducidas por el paso del tren

Una vez que se ajustan los modelos de Winkler, y tras la caracterización geotécnica de la plataforma y el subsuelo, el siguiente paso en el desarrollo del presente trabajo de investigación consiste en la determinación de las fuerzas dinámicas provocadas por el paso del tren a cada instante de tiempo.

Estas fuerzas pueden conocerse, de manera sencilla y directa, a través de la relación de Winkler:

$$F_i(t) = k_i \cdot y_i(t) \tag{1}$$

Ya que se han medido los desplazamientos en cada punto, y que se conoce el módulo de balasto de la transición, es posible inferir las fuerzas producidas por el tren a cada instante de tiempo mediante el producto de ambas.

4.3 Resultados

El presente estudio conlleva la necesidad de elaborar dos modelos numéricos diferentes: uno tridimensional, más preciso pero inviable computacionalmente para análisis dinámicos, y otro bidimensional, menos preciso pero con un coste computacional asumible para cálculos dinámicos. Por ello ambos modelos fueron elaborados para cada una de las transiciones analizadas.

El hecho de que los modelos bidimensionales incorporen hipótesis que pueden alejar los resultados de la realidad hace necesario su ajuste o calibración con los precisos modelos tridimensionales. A este efecto se empleó un sencillo modelo de comportamiento bidimensional con las hipótesis de Winkler.

Un modelo de Winkler supone una viga, con sus características de rigidez, sobre un suelo que se comporta como una serie de muelles verticales. Esta suposición es correcta siempre que los suelos se comporten de manera elástica, como ocurre en una línea de ferrocarril, ya que de lo

contrario estaríamos hablando de que la plataforma habría colapsado. Entonces, asimilar los modelos numéricos de las transiciones a modelos de placa sobre cimiento elástico o de Winkler permite respetar las hipótesis de dicho modelo, y por tanto no se introducen errores de modelización.

Tras haber completado el proceso de elaboración y calibración de modelos descritos se ha procedido a su validación. Para ello se ha comprobado si, al aplicar a los modelos bidimensionales de las transiciones monitorizadas, las cargas dinámicas calculadas, que corresponden a las cargas determinadas para los modelos tridimensionales, afectadas por los cocientes de los módulos de balasto, los desplazamientos resultantes coinciden con los registrados experimentalmente.

Como se comprueba en la Figura 15 y la Figura 16, los valores de los desplazamientos son muy parecidos en valor absoluto, y el ajuste se considera suficiente a efectos de modelo dinámico, y dado el propósito que se persigue con ellos, que no es más que proponer mejoras de la calidad de las transiciones.



Figura 15. Comparativa de los desplazamientos medidos experimentalmente con los obtenidos en PLAXIS2D para la pareja de sensores 19-21 (Sensor 3 de la transición terraplén-estructura)



Figura 16. Comparativa de los desplazamientos medidos experimentalmente con los obtenidos en PLAXIS2D para la pareja de sensores 8-15 (Sensor 7 de la transición balasto-vía en placa)

Así, queda validada la metodología de cálculo descrita, que consiste en elaborar y calibrar mediante modelos de Winkler dos modelos numéricos, uno tridimensional y otro bidimensional, siendo éste último el utilizado para efectuar los cálculos dinámicos. La validación se asume debido a que los resultados obtenidos para el caso de las transiciones construidas simulan de forma muy precisa las medidas experimentales, y por ello se presupone que, para cualquier otra configuración en los modelos 3D y 2D de las transiciones ocurrirá lo mismo si se sigue de manera correcta el algoritmo de calibración descrito.

En definitiva, se puede afirmar que se ha llegado a la obtención de unos modelos numéricos y un procedimiento de cálculo que son capaces de simular el comportamiento real de las transiciones objetivo de línea ferroviaria, pudiéndose con dichos modelos realizar estudios encaminados a la mejora de dichas transiciones de manera confiable.

5 MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL VEHÍCULO

En este apartado se modela el vehículo como un sistema de dos masas unidas por una amortiguación elasto-viscosa, y que presenta esta misma interacción con el carril. Este modelo se denomina comúnmente "cuarto de bogie". De esta forma, la suspensión primaria del vehículo, que es la que se halla en contacto directo con la vía, transmite unos movimientos a la masa no suspendida, que a su vez traslada estos movimientos a través de la suspensión secundaria a la caja. Estos últimos movimientos son los que experimentarán los pasajeros.

Tradicionalmente la dinámica de la vía se estudia mediante modelos de masas, resortes y amortiguadores. Uno de esos modelos es el modelo de dos masas, empleado para este trabajo.

En el caso del presente estudio se han utilizado los desplazamientos medidos en los diferentes puntos monitorizados de las transiciones para determinar en cada momento del tiempo el perfil longitudinal de movimientos en vertical de la vía. Conocida la velocidad a la que los trenes circulan por las zonas monitorizadas, se puede calcular, para cada sección del tren, el perfil del carril que se encontrará una llanta que hipotéticamente estuviera contenida en la sección.

Si se supone que la cabeza de la locomotora pasa por el primer sensor a tiempo cero con una velocidad de 110 km/h, se conoce a qué tiempo se produce la llegada del tren a cada uno de los demás sensores. Como se han medido los desplazamientos en cada instante de tiempo en cada sensor, se sabe por tanto los desplazamientos en cada punto monitorizado al llegar el tren, y por tanto se pueden construir perfiles de desplazamientos verticales del carril que sirven como excitación del modelo de dos masas supuesto para el vehículo.

Se optó por la creación de un perfil del carril para todas las secciones del tren, separadas 30 cm entre ellas, los que corresponde a una diferencia de 0.01 s en el paso por un mismo punto unas de otras. Cada uno de los perfiles se introdujo en el modelo de dos masas y se calcularon las aceleraciones verticales en la caja.

Posteriormente se determinó, para cada instante de tiempo, la máxima aceleración experimentada en todas las secciones de tren estudiadas, pudiéndose determinar si en el vehículo se garantizan las condiciones mínimas de confort exigidas en normativa.

El modelo seleccionado para simular el comportamiento del vehículo es uno de los más sencillos. Si bien es cierto que la interacción vía-vehículo se puede modelizar con sistemas matemáticos y ecuaciones mucho más sofisticadas y precisas, lo cierto es que dichos modelos requieren tal cantidad de datos para ser resolubles que los descartan por completo como útiles en el caso de proyecto en curso. Los fabricantes de maquinaria ferroviaria son muy reacios a divulgar datos específicos de la mecánica de sus prototipos, y por tanto resulta complicado obtener valores representativos de las propiedades necesarias para la elaboración de modelos del vehículo más complejos que el utilizado. Queda de esta forma justificada la elección del modelo de cuarto de bogie para el estudio del comportamiento del vehículo a su paso por las transiciones ferroviarias monitorizadas.

Los resultados obtenidos, presentados en la Figura 17 y la Figura 18, corresponden a las aceleraciones máximas en cualquier sección de la caja del tren para cada instante de tiempo que dura el paso por la transición. Estas aceleraciones son las que sufren los pasajeros al pasar por los tramos monitorizados, y por consiguiente indicarán el confort de estos al paso de las zonas de transición estudiadas.



Figura 17. Aceleraciones máximas en la caja del vehículo para la situación actual de la transición terraplén-estructura en placa.



Figura 18. Aceleraciones máximas en la caja del vehículo para la situación actual de la transición balasto-vía en placa.

Se observa que, para ambas transiciones, se dan aceleraciones máximas que se hallan cerca de la mitad del valor límite de confort de viajeros definido por ADIF. Este hecho indica que la transición está sujeta a posibles mejoras de su comportamiento, lo que constituye el objeto final del presente trabajo, aunque su desempeño es muy bueno, dados los datos de la monitorización,

por lo que no se espera que se alcance una importante mejora de la calidad de la transición al introducir cambios en la misma.

6 ESTUDIO TEÓRICO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LA TRANSICIÓN

En este apartado se han considerado los parámetros que más pueden afectar al comportamiento mecánico de las transiciones estudiadas, y se han buscado alternativas que favorezcan la disminución de los desplazamientos en el carril, lo que redunda en una reducción de las excitaciones introducidas sobre el vehículo, lo que a su vez supone una reducción en las aceleraciones verticales de la caja, y por tanto una mejora sustancial en el confort de los viajeros.

Se han diferenciado en este epígrafe las dos transiciones estudiadas y los parámetros más importantes de las mismas, que se pasan a describir a continuación.

6.1 Transición balasto-vía en placa

En este tipo de zona de transición se ha tomado como punto de partida el bloque técnico ejecutado a la entrada del túnel de inserción de la vía del AVE bajo la ciudad de Valencia, más concretamente su boca más cercana al río Turia (la más lejana a la ciudad).

Este bloque técnico, según el proyecto "as-built", se compone de una transición desde la vía en balasto convencional hasta la vía en placa mediante una capa de suelo-cemento, que sustituye al subbalasto, y posteriormente una losa con muretes guardabalasto y un tacón que impide los desplazamientos longitudinales.

Los espesores de los materiales son prácticamente fijos, y su geometría continua. Las dificultades de la transición en este caso estriban en la parte anterior de la losa, la que se halla más cerca del balasto, y por ello sufre desgastes y asientos diferenciales, lo que resta calidad a la transición.

Las mejoras propuestas en este bloque técnico van encaminadas a reducir las diferencias de rigidez entre la losa y el terraplén donde se tiende el balasto. Para ellos se ha decidido conservar la geometría del proyecto "as built", pero modificando las propiedades de los materiales, a fin de obtener una transición de rigideces más gradual.

Se definieron de esta forma 3 posibles mejoras, que son:

- 1) Cambio de tacón y losa por suelo-cemento
- 2) Cambio de losa por suelo-cemento
- 3) Cambio de suelo-cemento y capa de forma subyacente por losa

Con todas estas alternativas se pretende determinar cuáles de los cambios propuestos afectan de mayor manera a la calidad de la zona de transición. Para ello se han evaluado, mediante el procedimiento de calibración y cálculo detallado en el apartado anterior, los desplazamientos en los diferentes nodos que se monitorizaron en la transición balasto-vía en placa. A partir de las series temporales de desplazamientos se pueden obtener las aceleraciones máximas en la caja del tren, como ya se explicó anteriormente, y comprobar si la nueva configuración geométrica mejora o no, y en qué grado, el comportamiento de la transición.

Se representarán las aceleraciones máximas frente a cada alternativa, y de esta forma será sencillo realizar el estudio de sensibilidad a la variación de los parámetros geométricos del bloque técnico. Tras esto, se dispondrá de la información necesaria para aconsejar la geometría óptima de este tipo de zona de transición estudiada.

6.2 Transición terraplén-estructura

En esta transición se ha partido del bloque técnico ejecutado en el viaducto sobre el río Turia, concretamente en el estribo más cercano a Valencia.

Este bloque técnico, según el proyecto "as-built", se compone de una transición hecha con trapezoides de tres tipos de material diferente: suelo-cemento para el relleno más cercano al estribo, grava de buena calidad para la parte siguiente y núcleo de terraplén convencional de ahí en adelante.

El espesor de cada material varía según se tome la parte alta del terraplén o su pie, de forma que el ancho en cabeza de suelo-cemento y zahorra es mucho menor que su espesor en la parte baja del relleno. Con esto se consigue una transición mucho más gradual en la rigidez vertical del modelo que si los límites entre los diferentes tipos de relleno fueran verticales.

Dada la dificultad inherente a la construcción de este bloque técnico, donde aparecen muchos problemas de compactación, sobre todo muy cerca del estribo, se ha tenido a bien cambiar la geometría de la zona de transición utilizando los mismos materiales para cada tipo de relleno.

A priori podría resultar más fácil definir una nueva geometría para el bloque técnico que utilizar nuevos materiales, que serían mucho menos usuales que los actualmente empleados, o que incluir sistemas de refuerzo geotécnico, tales como geomallas, ya que no es la práctica habitual, y además generarían muchos más problemas de índole constructiva.

Por todo esto, se han definido como parámetros más importantes de la transición las diferentes posiciones longitudinales de los límites de las distintas clases de materiales presentes en el terraplén. Más concretamente, se ha variado la inclinación de la parte de suelo-cemento y su anchura, así como la forma en que se construye, bien con inclinación descendente, bien con inclinación ascendente.

Se definieron así 7 posibles configuraciones geométricas a tener en cuenta en el estudio, y mediante las que se podrán dilucidar los cambios en la geometría del bloque técnico que más influyen en el comportamiento mecánico de la plataforma ante el paso de un tren. Éstas son:

- 1) Suelo-cemento con talud descendente 1,25H:1V
- 2) Suelo-cemento con talud descendente 1,5H:1V
- 3) Suelo-cemento con talud descendente 2H:1V
- 4) Suelo-cemento con talud descendente 2,5H:1V
- 5) Suelo-cemento con un espesor adicional de 3 m
- 6) Suelo-cemento con un espesor adicional de 8 m
- 7) Suelo-cemento con un talud ascendente de 1,25H:1V

Con todas estas alternativas se pretende determinar cuáles de los cambios propuestos afectan de mayor manera a la calidad de la zona de transición. Para ello se han evaluado, mediante el procedimiento de calibración y cálculo previamente detallado, los desplazamientos en los diferentes nodos que se monitorizaron en la transición terraplén-estructura. A partir de las series temporales de desplazamientos se pueden obtener las aceleraciones máximas en la caja del tren, y comprobar si la nueva configuración geométrica mejora o no, y en qué grado, el comportamiento de la transición.

Se representarán las aceleraciones máximas frente a cada alternativa, y de esta forma será sencillo realizar el estudio de sensibilidad a la variación de los parámetros geométricos del bloque técnico. Tras esto, se dispondrá de la información necesaria para aconsejar la geometría óptima de este tipo de zona de transición estudiada.

6.3 Resultados

6.3.1 Transición balasto-vía en placa

En el caso de la transición balasto-vía en placa se han comprobado las diferentes geometrías propuestas, y se ha llegado a la conclusión de que, si bien las diferentes configuraciones mejoran el comportamiento de la transición, lo cierto es que la mejora no es muy significativa, en comparación con el incremento de coste que supondría una actuación del calibre de las propuestas, que implican la extensión de la losa de transición en una longitud del orden de la decena de metros.

Los coeficientes que consiguen ajustar los modelos de Winkler de los modelos bidimensional y tridimensional se presentan en la Tabla 1.

Alternativa	Modelo	Posición X [m]								
		-20	-10	-5	-2	-1	0	1	10	
Alternativa	1	0,44487	0,42846	0,4235	0,21093	0,52776	0,02182	0,3388	0,33856	
	2	0,44479	0,43322	0,45426	0,29772	0,28038	0,63409	0,31171	0,23561	
	3	0,3864	0,37213	0,39746	0,24422	0,71687	0,018634	0,39228	0,41611	

Tabla 1. Coeficientes de ajuste del modelo bidimensional al tridimensional para la transición balasto-vía en placa

Se presenta en la Figura 19 el gráfico de las aceleraciones máximas obtenidas para cada geometría estudiada. Para la situación actual se cumple que las máximas aceleraciones verticales, que son menores al 1 m/s^2 aconsejado para confort de los pasajeros. De esta forma, todas las diferentes geometrías de las transiciones tenidas en cuenta en el análisis se podrían considerar como adecuadas.

Se observa cómo, a medida que la plataforma se hace más rígida, cambiando suelo-cemento por losa de transición, las aceleraciones máximas sufridas por los pasajeros disminuyen. De la gráfica se infiere que la situación actual de la transición es buena, y que la sustitución de la losa de transición por suelo-cemento no conllevaría problemas en cuanto a aceleraciones verticales. Así mismo, el cambio de la capa de suelo-cemento y la capa de forma adyacente por la continuación de la losa de transición mejora, aunque no significativamente, la calidad de la transición.

En definitiva, los cambios tipológicos estudiados en la transición son capaces de mejorar su comportamiento, como era de esperar, pero no se de una manera apreciable.

De esta forma, se puede concluir que la transición balasto-vía en placa tiene un diseño satisfactorio, y tendente al óptimo en cuanto a la relación comportamiento/coste, ya que incrementos grandes en el presupuesto de la transición, por adición de longitud de losa, conllevan pequeños incrementos en la respuesta del sistema, y por tanto no se aconseja el acometimiento de ninguna de las geometrías propuestas, antes bien, se amina a continuar con el uso de la geometría presentada en el proyecto "as-built".



Figura 19. Aceleraciones verticales máximas para todas las geometrías consideradas de la transición balasto-vía en placa.

6.3.2 Transición terraplén-estructura

En el caso de la transición terraplén-estructura se han comprobado las diferentes geometrías propuestas, y se ha llegado a la conclusión de que, si bien las diferentes configuraciones mejoran el comportamiento de la transición, lo cierto es que la mejora no es apreciable, en comparación con el incremento de coste que supondría una actuación del calibre de las propuestas, que por lo general implican la existencia de un mayor volumen de suelo-cemento. Los coeficientes que consiguen ajustar los modelos de Winkler de los modelos bidimensional y tridimensional se presentan en la Tabla 2.

Alternativa	Modelo	Posición X [m]								
		-20	-10	-5	-2	-1	0	1	10	
Alternativa	1.25H:1V	1	1	1	1	1	0,62811	1,1239	0,61419	
	1.50H:1V	1	1	1	1	1	1,7895	0,76368	0,8211	
	2.00H:1V	1	1	1	1	1	0,5004	1,1461	0,80151	
	2.50H:1V	1	1	1	1	1	3,6179	0,82412	0,43597	
	$\Delta L=3m$	1	1	1	1	1	4,8917	0,66569	0,56013	
	$\Delta L=8m$	1	1	1	1	1	1,2594	0,88181	0,98669	
	Invertido	1	1	1	1	1	0,66633	1,2515	6,3404	

Tabla 2. Coeficientes de ajuste del modelo bidimensional al tridimensional para la transición terraplén-estructura

Se presenta en la Figura 20 el gráfico las aceleraciones máximas obtenidas para cada geometría estudiada. Para la situación actual se tienen las máximas aceleraciones verticales, que son menores al 1m/s² aconsejado para confort de los pasajeros. De esta forma, todas las diferentes geometrías de las transiciones tenidas en cuenta en el análisis se podrían considerar como adecuadas.

Se observa cómo a medida que se tiende a mayor ángulo el relleno de suelo-cemento se obtienen aceleraciones máximas en la caja cada vez menores, aunque la variación máxima entre el estado actual y el ángulo máximo de inclinación no excede los 0,02 m/s². Estas variaciones son aproximadamente las mismas para las hipótesis de ampliación de la longitud del relleno, aunque se reduzca la aceleración sufrida por los pasajeros a medida que se aumenta el ancho del relleno con material tratado con ligante. Nótese que la opción de invertir la forma del relleno de suelo-cemento se ha contemplado como una hipótesis de aumento de longitud a la hora de presentar los resultados.

De esta forma, se puede concluir que la transición terraplén-estructura tiene un diseño muy bueno, y tendente al óptimo en cuanto a la relación comportamiento/coste, ya que incrementos grandes en el presupuesto de la transición, por adición de volumen de suelo-cemento, conllevan muy pequeños incrementos en la respuesta del sistema, y por tanto no se aconseja el acometimiento de ninguna de las geometrías propuestas, antes bien, se anima a continuar con el uso de la geometría presentada en el proyecto "as-built".



Figura 20. Aceleraciones verticales máximas para todas las geometrías consideradas de la transición terraplén-estructura

7 Recomendaciones para la adaptación de las zonas de transición existentes al nuevo sistema de vía en placa

Tal y como se expuso en apartados anteriores, uno de los principales objetivos del presente documento es la obtención de una serie de recomendaciones de diseño que permitan adaptar las zonas de transición que se emplean en la actualidad, y cuyo comportamiento ha sido analizado, al nuevo sistema de vía en placa.

A este fin se han conducido toda una serie de análisis encaminados a la determinación de la calidad de la transición. Se monitorizaron determinados nodos de dos zonas de transición diferentes, una de tipo terraplén-estructura y otra de tipo balasto-vía en placa. Con los datos de la monitorización se calcularon los desplazamientos de los nodos y, a través del proceso de análisis espectral de ondas superficiales (SASW), los perfiles geotécnicos de las transiciones.

Una vez se tuvieron los perfiles, se elaboraron tres modelos de cálculo deformacional para cada transición. Estos tres modelos son: un modelo estático tridimensional, un modelo dinámico bidimensional y un modelo estático bidimensional con hipótesis de Winkler.

El modelo tridimensional es necesario para ajustar los desplazamientos obtenidos mediante la resolución del modelo bidimensional, ya que los resultados de ambos difieren por efectos inherentes a la formulación matemática de ambos. El ajuste se hace a través de un modelo de

viga sobre semiespacio elástico de Winkler, que permite determinar de manera sencilla las diferencias de rigidez en cada punto de los dos modelos, con lo que se pueden ajustar las fuerzas a introducir en cada uno de ellos para conseguir los desplazamientos medidos experimentalmente.

Mediante los modelos de Winkler y los desplazamientos obtenidos del análisis de los acelerogramas se obtuvieron las cargas dinámicas que el tren ejerce sobre cada transición a su paso por las mismas. Estas fuerzas pueden ser aplicadas directamente a modelos de zonas de transición que presentan variaciones con respecto a las construidas y monitorizadas, de manera que es posible determinar la respuesta mecánica de nuevas tipologías de transiciones ante el paso del ferrocarril.

Tras proponer diversas tipologías diferentes para cada tipo de zona de transición estudiada se decidió estudiar las aceleraciones verticales sufridas por los pasajeros como indicador de la calidad de la vía. Para ello se empleó un modelo de comportamiento dinámico del vehículo que consiste en dos masas unidas por una suspensión elasto-viscosa, y que están en contacto con el carril mediante una unión de la misma naturaleza.

Una vez analizados los resultados de aceleraciones máximas se puede afirmar que las modificaciones introducidas a las zonas de transición no mejoran de manera significativa el comportamiento de las mismas. Las nuevas tipologías tienen mayores costes que las construidas y monitorizadas, por lo que se aconseja mantener la geometría de las transiciones estudiadas.

El comportamiento de las transiciones estudiadas es lo suficientemente bueno como para afirmar a priori que pueden ser aplicadas al nuevo sistema de vía en placa. No obstante, serían necesarios datos experimentales de este tipo de zonas de transición con los nuevos sistemas de vía en placa instalados para llevar a cabo este mismo estudio, y así validar experimentalmente los resultados numéricos alcanzados en el presente documento.

7.1.1 Notas a pie de página

Deben respetar el margen inferior⁴.

7.1.2 Referencias insertadas en el texto

Se recomienda que las referencias bibliográficas se realicen insertando directamente en el texto el número de la referencia entre corchetes [1], o con el apellido del primer autor y el año y el número de referencia (Wirth 1980,[1]).

Se recomienda que las referencias se presenten, en su apartado correspondiente, ordenadas alfabéticamente por apellido de autor.

7.1.3 Agradecimientos

Este apartado, si se incluye, debe figurar como último apartado o como penúltimo si se incluye uno de "Referencias".

⁴ Como es el caso. Se recomienda utilizar la fuente Times New Roman 10

Referencias

- [1] Eduardo Fortunato y Rui Calcada Andre Paixao, "Design and construction of backfills for railway track transition zones," *Journal of rail and rapid transtit*, 2013.
- [2] P., & Domínguez, J. Galvín, Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Córdoba–Málaga line, 2009, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(4), 641–657. doi:10.1016/j.soildyn.2008.07.001.
- [3] G.J., & C.G. Lai Rix, MATLAB forward solution, 1999, Free Computer Programs in the Website of Civil Engineering Department, Georgia Institute of Technology.
- [4] A. Pratap, S. Agarwal & T. Meyarivan K. Deb, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002.
- [5] I., Sánchez-cambronero, S., & Rivas, A Gallego, Criteria for Improving the Embankment- Structure Transition Design in Railway Lines, 1999.
- [6] M. Melis, Apuntes de introducción a la dinámica vertical de la vía, 2008, Editorial Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] A.K. Chugh & T.D. Stark, An automated procedure for 3-dimensional mesh generation. FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics., 2003.