

Metro Dubai. Estudio interacción vía-tablero

Dubai Metro. Rail – structure interaction analysis

Luis Carrillo Alonso ^a, Mariano Martín Cañueto ^b, Manuel Biedma García ^c,
Diego Romagosa Sanchez-Monge ^d, Javier Carrascal Pérez ^e, Cristina García
Cambrón ^f

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Departamento de Estructuras de Obra Civil-Hormigón. Acciona Ingeniería.

luis.carrillo.alonso@acciona.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Gerente de Estructuras. Acciona Ingeniería.

mariano.martin.canueto@acciona.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Departamento de Estructuras de Metálicas. Acciona Ingeniería.

manuel.biedma.garcia@acciona.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Dptmto. de Estructuras de O.C.-Hormigón. Acciona Ingeniería.

diego.romagosa.sanchezmonge@acciona.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Dptmto de Estructuras de O.C.-Hormigón. Acciona- Ingeniería.

franciscojavier.carrascal.perez@acciona.com

^fIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniera de Proyectos. Dptmto de Estructuras de O.C.-Hormigón. Acciona Ingeniería.

cristina.garcia.cambron@acciona.com

RESUMEN

Acciona Construcción en consorcio resultó adjudicataria de la extensión del Metro de Dubai hasta la Expo 2020. En este tramo se prevé la ejecución de un viaducto elevado de más de 10 Km de longitud sobre el que se dispone carril continuo. El análisis de la interacción vía-estructura se hace por lo tanto completamente necesario, estando Acciona Ingeniería involucrada en este estudio. Así, se detallan en esta ponencia aquellos aspectos desarrollados siguiendo las indicaciones de la ficha UIC 774-3 y aquellos otros específicos de las tipologías de viaductos como la analizada en este caso. De este estudio se deducirá la validez de la configuración estructural adoptada y de las características de la vía a utilizar.

ABSTRACT

Acciona as a member of a joint venture was awarded for the extension of Dubai Metro to the Expo2020. In this project long elevated viaduct of more than 10 Km is going to be built using a CWR rail all over the stretch. Therefore, a RSI analysis is completely necessary, and Acciona Engineering was involved in these studies. In this paper, RSI topics related to the UIC leaflet are commented, but some aspects with regard of an elevated guideway, that are not included in that document, are also studied. Finally an analysis was carried out in order to assess the structural tipology used and rail parameters adopted.

PALABRAS CLAVE: Viaducto elevado, tablero prefabricado, carril continuo, interacción vía-tablero, llave de cortante

KEYWORDS: Elevated guideway, precast deck, CWR, rail-structure interaction, shear key

1. Introducción

El fenómeno de la interacción supone la introducción sobre el carril y el tablero de todos aquellos efectos causados por la conexión entre ambos, produciéndose así unos esfuerzos que deberán quedar en ellos en equilibrio, a la par que se deben compatibilizar las deformaciones entre la vía y el tablero.

La metodología del análisis del efecto de la interacción quedó recogida en la ficha UIC 774-3[1], pero hay que puntualizar que esta normativa se redactó para solventar los problemas que se planteaban en los viaductos que eran necesarios ejecutar en las nuevas líneas de Alta Velocidad[5].

Las indicaciones de esta ficha UIC buscan verificar los siguientes aspectos:

- Comprobar las deformaciones y tensiones generadas sobre los carriles en el tramo sobre la estructura, de tal forma que se garantice la adecuada circulación de los trenes. Esta consideración será problemática en el caso de tableros continuos a partir de cierta longitud, aproximadamente 120 m en el caso de tableros de hormigón, momento en el cual puede ser necesaria la instalación de juntas en el carril en uno o en ambos extremos de la estructura, que alivien las tensiones del carril. Por el contrario, las administraciones ferroviarias prefieren en general la no disposición de ninguna junta de carril por motivos de mantenimiento y comodidad del servicio, por lo que deberá intentarse siempre la disposición del menor número de discontinuidades para la circulación.
- Caracterizar de forma adecuada el diseño frente a las acciones de frenado y aceleración. Este aspecto queda vinculado con la disposición de puntos fijos de conexión entre tablero y pilas, que sirvieran para absorber las importantes fuerzas de frenado y arranque que genera la circulación ferroviaria. A su vez la disposición de estas vinculaciones entre pilas y tablero llevarán a delimitar las longitudes dilatables de la estructura.

En cambio, en las últimas décadas se ha procedido a proyectar y ejecutar un gran número de trenes ligeros. Estas infraestructuras consisten básicamente en la ejecución de viaductos de mucha longitud, con requerimientos de trazado mucho menos exigentes que en el caso de las líneas de Alta Velocidad. Estas nuevas estructuras por lo tanto han quedado fuera del foco del análisis contemplado en la ficha UIC y han requerido de estudios sobre aspectos particulares que se han reflejado en recomendaciones y guías básicamente estadounidenses.

2. Metodología y condicionantes establecidos en la UIC-774-3

El cálculo de la interacción vía-tablero establecido en la ficha UIC, y posteriormente recogido en el Eurocódigo[2] y en la IAPF-07, describe el análisis exclusivamente frente a las acciones térmicas, de frenado y arranque, y al efecto de las cargas verticales de tráfico sobre las tensiones normales en los carriles. Así, con este análisis se plantea determinar el efecto particular generado por la disposición del carril sobre una estructura, en relación a la situación en la que el carril queda fuera de ella.

Con ese objetivo, la ficha UIC establece los límites de los incrementos de tensiones máximas que puede producir la interacción, en relación a la situación del carril fuera de la estructura, así como las deformaciones máximas y relativas que pueden a su vez generarse sobre este elemento. Los valores de estas tensiones límites son de +92 y -72 N/mm², respectivamente para las tensiones de tracción y compresión máximas, para una vía sobre balasto de características habituales.

La disposición de la vía en placa establece una diferencia fundamental en lo que se refiere a la inestabilidad del carril, dada la mucho mayor restricción al desplazamiento lateral ejercida por

las fijaciones en este tipo de vía. Es por ello que en diversas normativas, guías y pliegos, se han ampliado las tensiones límite a $\pm 92 \text{ N/mm}^2$.

Hay que recordar que estos límites se establecen para acotar las tensiones normales provocadas por los esfuerzos axiales, aplicados en el centro de gravedad de los carriles, por efecto de la interacción con la estructura. Es decir que estos límites no engloban las tensiones normales generadas por la propia flexión del carril, al aplicar cargas verticales sobre él. Este aspecto, que parece obvio, es importante tenerlo muy presente cuando se trabaje fuera del ámbito estricto de comprobaciones establecido por la ficha UIC.

3. Requisitos adicionales en viaductos elevados para trenes ligeros

Se detallan a continuación algunos aspectos específicos del análisis de la interacción de los viaductos para trenes ligeros que no han quedado recogidos en la ficha UIC.

3.1 Hipótesis de rotura de carril

En base a la experiencia de países con temperaturas muy bajas en invierno, se hace especial incidencia en el fenómeno de rotura frágil del carril (“rail-break”). Esta situación se asociaría a un exceso de tracciones por encima de los valores admisibles al someter el carril a un descenso térmico acusado. Una situación parecida se podría llegar a considerar cuando durante el desarrollo de las operaciones de mantenimiento fuera necesario proceder al corte de algún carril, para su sustitución total o parcial.

Las especificaciones de esta hipótesis de cálculo se enfocan hacia 3 comprobaciones: la primera de ellas asociada al incremento de tensiones producidas en el resto de carriles existentes en una sección determinada donde se ha producido el fallo de uno de ellos. La segunda en relación a la redistribución de esfuerzos que se producen en la subestructura al generarse

fuerzas no equilibradas debidas al fallo de un carril. Por último, y la tal vez la que se considera más importante en este enfoque, la medición del desplazamiento relativo entre extremos del carril roto. Este último aspecto es el que se denomina comúnmente como “rail-gap” y se considera que debe limitarse para evitar el descarrilamiento de algún tren que pudiera circular en el instante del fallo. En general el “gap” máximo está relacionado con las dimensiones de la rueda del material rodante, resultando valores límites de en torno a 2” (o bien 50 mm).

El cálculo de esta hipótesis se basará en la aplicación sobre la estructura de las cargas que se consideren actuantes en el instante de la rotura del carril, para a continuación eliminar el carril dañado en una determinada sección, y proceder a introducir unos esfuerzos sobre éste de signo igual y contrario a los existentes en el instante inmediatamente anterior a la rotura. De esta forma, la composición de los estados de carga anteriormente indicada permite obtener la configuración después de la rotura con esfuerzos nulos en los extremos del carril cortado.

Hay que indicar que esta comprobación no suele implicar ninguna otra consecuencia en el diseño más allá de la verificación de la capacidad de las fijaciones dispuestas en la zona donde de rotura del carril, para controlar el “gap” generado.

3.2 Fijaciones especiales

Un aspecto de la tecnología ferroviaria que se ha desarrollado especialmente en los últimos años es la relacionada con las fijaciones del carril (“fasteners”). Hoy en día los diferentes suministradores de sistemas de vía disponen de una muy amplia gama de productos que permiten una versatilidad en el diseño que hace años era impensable. En concreto, para el caso de estructuras continuas de gran longitud, una solución, que cada vez más habitualmente se está planteando para la reducción de las tensiones en los carriles, es la utilización de fijaciones de resistencia reducida LRF (“low restraint

fasteners”) o bien de fijaciones que permitan el deslizamiento del carril ZRF (“zero restraint fasteners”). La disposición de estos elementos de forma localizada, en aquellos tramos donde se producen picos de axiles en el carril, permite la reducción de las tensiones, de forma menos acusada en el primer caso respecto del segundo.

La principal dificultad en la aplicación de estas soluciones es causada por la necesidad de la certificación de los productos de cada fabricante, así como por las posibles dificultades de mantenimiento que estos elementos especiales implicarían. Ambas cuestiones pueden llevar a que algunas administraciones sean reacias a su uso, aunque también es cierto que cada vez hay más referencias de ejemplos ya ejecutados usando estos dispositivos.

3.3 Aparatos de vía

Otro de los aspectos particulares del diseño de los viaductos para trenes ligeros elevados, es que, dado que en muchos casos la totalidad o la casi totalidad de la longitud de la línea discurre sobre estructura, incluyéndose en ellos estaciones, es inevitable la disposición de aparatos de vía (cruces o desvíos) sobre el propio viaducto.

Estos elementos tienen una geometría y tipología muy variada, debiendo incorporarse las características particulares de cada sistema en el modelo de cálculo, de tal forma que el análisis de la interacción sea lo más realista posible. Como práctica general, puede pensarse que el carril tendrá continuidad sobre estos aparatos de vía.

Por otra parte, si la presencia de estos aparatos de vía implica la conexión del viaducto a otras estructuras donde se dispongan una o varias vías adicionales, habría que considerar el efecto conjunto de interacción de ambas estructuras, bien mediante el análisis con un modelo 3D, el cual tendrá una gran complejidad al tener que incorporar las características no sólo longitudinales si no también transversales de la vía, bien mediante alguna simplificación que permita componer los esfuerzos de ambas estructuras en los elementos comunes,

simulándose de forma adecuada el efecto de una sobre otra, lo que tampoco será sencillo.

3.4 Alineación en planta de la vía

Los pequeños radios de curvatura que se pueden adoptar en el trazado en planta de los trenes ligeros llevan a tener que considerar que la aplicación de cualquier acción en sentido tangencial a la vía generará una fuerza en dirección radial sobre la subestructura, la cual debería considerarse en el diseño.

Hay que recordar que todos los efectos de la interacción planteados por la ficha UIC se indica que quedarán recogidos en modelos de cálculo 2D, por lo que este efecto no se incluiría en las comprobaciones específicas indicadas en aquella normativa.

Existen publicaciones como el TCRP[4] estadounidense o la guía RDSO[3] india en las que se proponen formulaciones simplificadas para el cálculo de las fuerzas en cabeza de pilas, provocadas por las variaciones de temperatura que puede sufrir el carril curvo.

4. Viaducto del Metro de Dubai

Esta nueva línea de 15 Km de longitud permite el enlace de la línea existente con la futura ubicación de la Expo2020. De la longitud total del tramo, 4’8 Km discurren soterrados, mientras que el resto discurre como viaducto elevado. Además se ejecutarán 7 estaciones: 2 de ellas soterradas y el resto elevadas ubicadas sobre el propio viaducto.

Dado que el requisito establecido por el Cliente era utilizar una vía sin juntas a lo largo de todo el tramo, resultó así que se debían diseñar tramos de más de 5Km de longitud de viaducto donde se debía instalar carril continuo. Es por ello que se consideró un análisis fundamental para el diseño del viaducto el estudio sobre la interacción con el carril.

La estructura tipo del viaducto replica en sus líneas básicas la ya existente en el resto de

líneas construidas en Dubai. Así, ésta consiste en su mayor parte en una secuencia de tramos isostáticos de luces de hasta 36 m. La sección tipo del tablero proyectado es una sección en U de hormigón pretensado, de 10'20 m de ancho, con canto de las vigas laterales de 2'00 m y espesor de la losa inferior variable, mínimo de 25 cm.

Para conseguir la reducción de los esfuerzos debidos a la acción sísmica mediante el aislamiento del tablero, se decidió emplear como

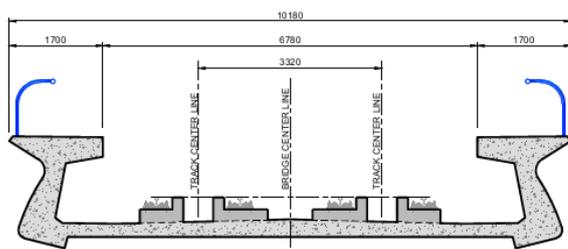


Figura 1. Sección tablero e imagen del proceso constructivo de un tramo isostático tipo.

Las pilas son monofuste circulares, con una altura máxima de 15'0 m y un diámetro de 2'00 m, descansando sobre ellas un capitel postesado que recibe las cargas del tablero. La cimentación de las pilas es en general mediante un pilote sencillo, salvo en los casos en los que se necesita incrementar su capacidad, donde se recurre al empleo de encepados de 4 pilotes.

El proceso constructivo previsto para la ejecución de estos viaductos es mediante dovelas prefabricadas colocadas con viga lanzadora.

Adicionalmente a los tramos isostáticos tipo anteriores, se proyecta ejecutar varios tipos de estructuras continuas. Son las denominadas 2span, 3span y 4span. La primera se diseña para alojar sobre ella los aparatos de vía, cuya longitud excede de los 36 m del tramo isostático. Dado que estos elementos necesitan de la continuidad

apoyo de los tramos isostáticos, en lugar de los más habituales en puentes de FFCC aparatos tipo POT, apoyos de neopreno zunchado. Esta solución, que efectivamente mitiga las fuerzas de inercia debidas al sismo, introduce en cambio sobre los carriles continuos entre tableros unos esfuerzos debidos a las cargas transversales desequilibradas entre vanos (centrífuga, viento sobre vehículo, lazo) para las que inicialmente no están proyectados.



del soporte, se hace necesario conformar una estructura de 2 vanos continua de luces 44+44 m, utilizando la misma sección tipo en U que en los tramos isostáticos, con el canto sobre el apoyo central incrementada hasta los 2'33 m.

Por otra parte, para dar cabida a las estaciones elevadas, y para servir de paso sobre diferentes viales existentes a nivel de superficie, se ejecutarán una serie de viaductos continuos de 3 y 4 vanos de canto variable, con luces máximas de hasta 72 m, ejecutándose todos ellos mediante dovelas prefabricadas colocadas mediante viga lanzadora por el método de avance en voladizo desde las pilas centrales.

Tanto los apoyos centrales de las estructuras 2span, como los de las estructuras 3span y 4span, se materializarán mediante aparatos tipo POT.

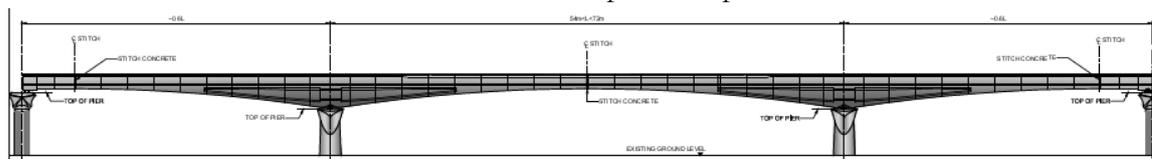


Figura 2. Alzado tipo de un viaducto 3span

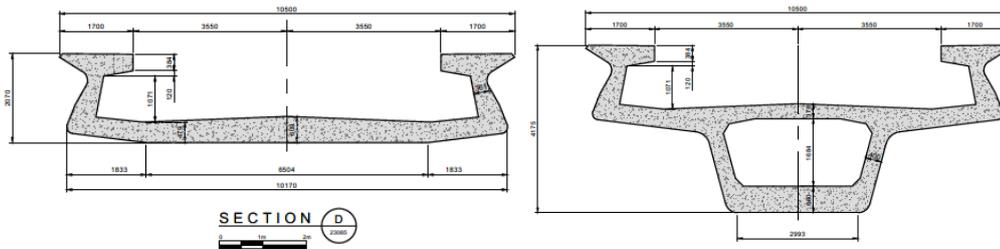


Figura 3. Sección tablero e imágenes del proceso constructivo de un viaducto 3span

5. Interacción vía-estructura en el viaducto elevado del Metro de Dubai

El estudio realizado se desarrolló en dos fases: En una primera se modelizó un “esquema tipo isostático”, con el que se pretendía evaluar el efecto del carril continuo sobre un tramo intermedio del viaducto. Posteriormente se procedió a analizar un tramo concreto de especial complejidad, que correspondía al tramo final de la línea, donde se ubica la estación para la Expo2020. En este último análisis se tuvieron en cuenta todas las singularidades del tramo, procediéndose a realizar un estudio para determinar la mejor solución a adoptar en esta zona.

Para el desarrollo de los estudios anteriores fueron desarrollados modelos de cálculo 2D de elementos tipo barra, mediante el programa de elementos finitos SAP2000, donde se incorporaba el comportamiento no-lineal de la conexión carril-estructura.

5.1 Tramo tipo isostático

El tramo tipo analizado consistió en una secuencia de 56 vanos isostáticos, todos ellos de 36 m de luz, es decir una longitud total de tablero

de más de 2000 m. Las pilas se modelizaron todas ellas de igual altura (15 m) y diámetro del fuste (2'00m), quedando todas las cimentaciones empotradas a la profundidad en que se consideró que se producía éste en el pilote. Los valores de las rigideces de las fijaciones adoptados eran los indicados en la ficha UIC.

Sobre este modelo se procedió a aplicar las acciones debidas a temperatura, así como las cargas verticales de tráfico y de frenado y arranque correspondientes al vehículo específico del proyecto. El carril se suponía cortado en ambos extremos del modelo, y en consecuencia se planteó la aplicación de temperatura en carril y tablero. Los rangos para las variaciones de temperatura se establecieron $\pm 50^{\circ}\text{C}$ para el carril y $\pm 35^{\circ}\text{C}$ para el tablero, limitando la diferencia entre ambos elementos a $\pm 20^{\circ}\text{C}$.

Adicionalmente a estas cargas, tanto EC1 como la IAPF-07 señalan que debería incluirse el efecto de cualquier carga que provocase una deformación impuesta sobre el tablero, como podría ser el caso de la retracción y fluencia, así como el gradiente térmico.

Respecto de esta última acción, dado que su aplicación supone imponer un giro en cada sección del tablero, y al encontrarse la posición del carril casi a la misma profundidad que el centro de gravedad de aquel, se decidió no tener en cuenta su efecto. La referencias [7] aporta

información interesante en relación a la consideración del gradiente térmico.

En cambio, sí se incluyeron en los cálculos desarrollados las acciones reológicas, evaluándolas a partir de la fecha en la que se instala el carril. Es interesante tener presente que en la bibliografía consultada [6] se señala que estas acciones podrían no considerarse o reducirse en gran medida, basándose en que las operaciones de mantenimiento periódicas del carril implicarán la eliminación de estos efectos. En nuestro caso, Metro de Dubai decidió su

aplicación con un valor reducido en un 50%, a la vez que planteó considerar su efecto sólo en la determinación de los cortantes en pilas, pero no para la estimación de las tensiones en los carriles.

En relación a las acciones de tráfico correspondientes al caso de un tren real, suponían aplicar un peso total 2920 KN, lo que era equivalente a aplicar 44 KN/m/vía. A su vez la fuerza de frenado resultaba un 25% del anterior valor, es decir 11 KN/m/vía.

Se adjuntan a continuación algunos de los resultados más significativos obtenidos:

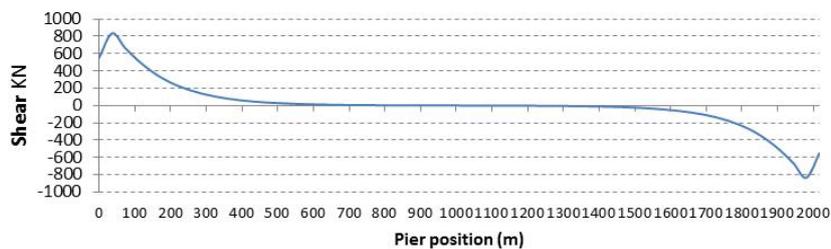


Figura 4. Cortantes en cabeza de pilas para la hipótesis de temperatura.

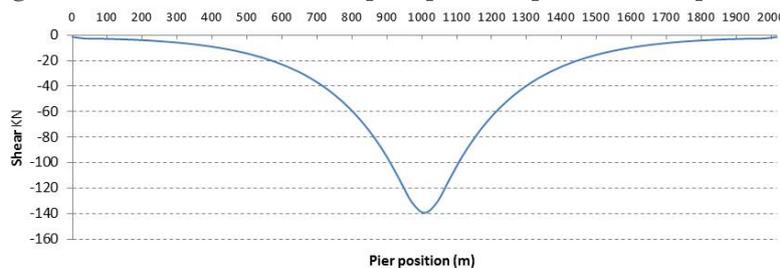


Figura 5. Cortantes en cabeza de pilas para la hipótesis de frenado sobre pila intermedia.

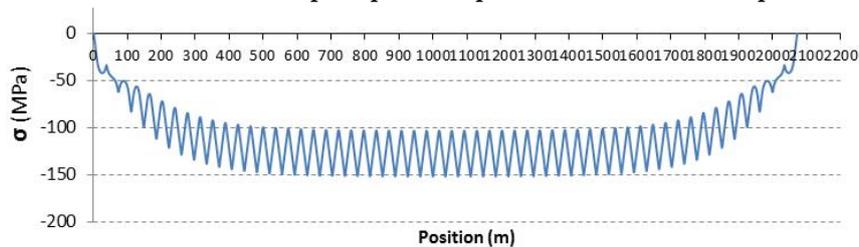


Figura 6. Tensiones en carril. Hipótesis de incremento de temperatura en carril y tablero.

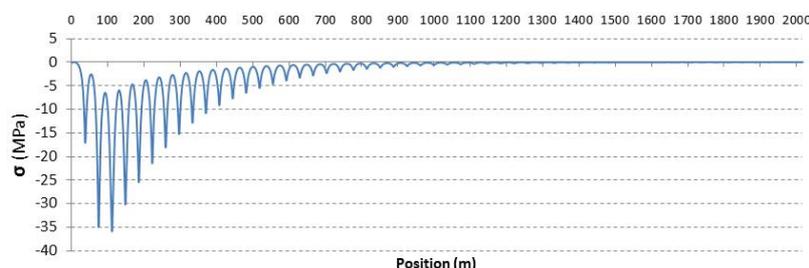


Figura 7. Tensiones en carril para hipótesis de frenado sobre pilas extremas.

A la vista de todos los resultados anteriores se pudo concluir, respecto del efecto sobre la subestructura de la interacción que:

- El efecto de las acciones térmicas era despreciable en las pilas intermedias y sólo era de consideración en las pilas extremas, siendo el

cortante máximo obtenido de valor 820 KN. Es decir, que en las pilas intermedias las fuerzas debidas a la acción térmica quedaban compensadas, al ser todos los vanos iguales. En el extremo del modelo sí se producía el desplazamiento relativo entre carril y tablero, por lo que sobre las pilas extremas si se generaba un cortante, como resultado del desequilibrio de fuerzas horizontales transmitidas por los tableros.

- Que el frenado se repartía en un número de pilas suficiente como para que en ningún caso esta acción supusiera más de 250 KN en cabeza de la pila más cargada. Es decir, que la pila más cargada debía soportar un cortante que era como máximo el 30% de la fuerza total de frenado y arranque.

Por otra parte, respecto de las tensiones en el carril se deducía que:

- En las tensiones en el carril se observaba claramente una figura en “acordeón” que venía a representar el efecto de los tableros isostáticos sobre el carril.

- Las acciones debidas a la temperatura provocaban unas tensiones debidas a la interacción que eran la diferencia entre el valor representado en el gráfico y la tensión que tendría el carril fuera de la estructura cuando se le somete a un incremento de temperatura. Así el efecto de la interacción por las cargas térmicas era del orden de 25 N/mm².

- Igualmente el efecto de las hipótesis de frenado y aceleración producía unos incrementos de tensiones en el carril de menos de 35 N/mm².

- Siendo el efecto de la retracción de menos de 10 N/mm² y el de las cargas verticales de menos de 5 N/mm², resultó entonces que en el caso de los tramos isostáticos el carril cumplía con los requisitos de tensiones marcados por la ficha UIC para vía en placa (± 92 N/mm²).

Hay que señalar que sobre este modelo además se procedió a estudiar la rotura del carril, confirmándose las ideas expresadas en el epígrafe 3.1 de este documento.

5.2 Tramo zona estación Expo 2020

El tramo real analizado era el que se denominaba Zona 9-10, que incluía como elementos singulares:

- El final de la línea y la estación de la Expo2020, conformada por un viaducto continuo de 3 vanos y 132 m de longitud.

- Una duplicación de vía en la zona de la Expo2020, conformando un viaducto adicional en vía sencilla, con la conexión de ambas estructuras, mediante una pareja “transiciones”, ejecutas “in situ” y con tableros continuos de aproximadamente 120 m de longitud.

El tramo analizado constaba de 82 pilas y una longitud total de aproximadamente 2700 m. Inicialmente, en el modelo de cálculo no se consideraron las vinculaciones que genera el tramo 8 adyacente. Esta decisión se adoptó sabiendo que el análisis se quería focalizar sobre la zona central de la Expo, la cual no se vería afectada al estar suficientemente alejada del extremo. Es decir, que mientras que los resultados obtenidos en el modelo en la zona del final de la línea sí eran reales, en el otro extremo del modelo los resultados no serían representativos del comportamiento real que se produciría en esa zona.

Se procedió así a realizar un primer análisis utilizando los parámetros de rigideces de la conexión de la vía establecidos por la UIC, y planteando además un solo apoyo fijo entre pilas y tableros de cada tramo continuo. En el caso de la estación se fijó uno de los dos apoyos centrales, mientras que en el caso de las transiciones se fijaron los apoyos centrales más alejados de la estación. Además, en los tableros continuos, los apoyos de las pilas extremas se planteaban de neopreno, siendo POTs deslizantes el resto de apoyos de las pilas intermedias.

Se presentan a continuación algunos de los resultados más significativos obtenidos:

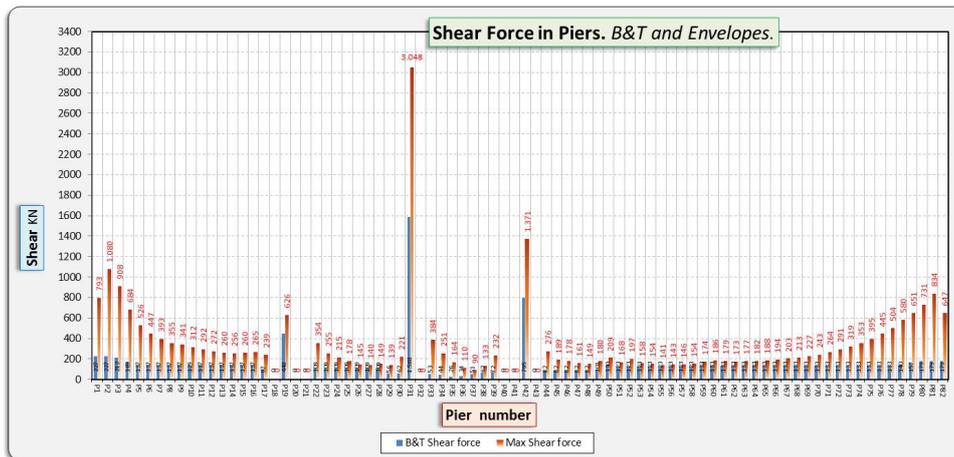


Figura 8. Envoltura de cortante en pilas de frenado y aceleración y para las anteriores más temperatura.

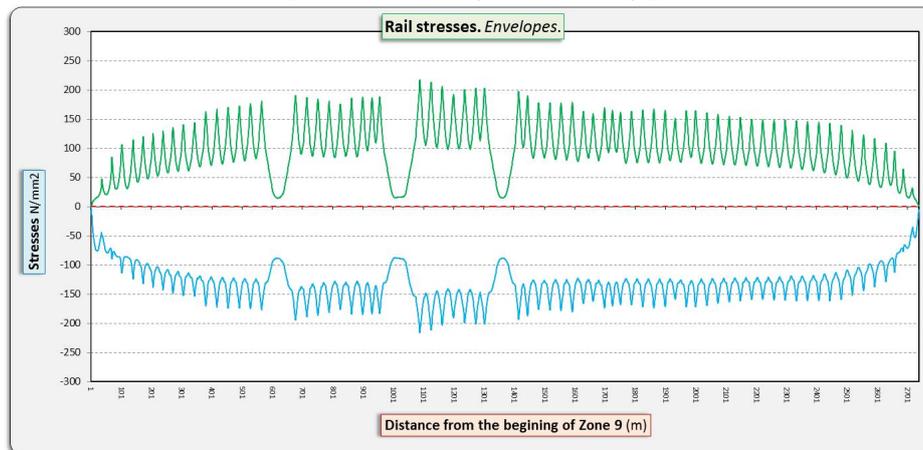


Figura 9. Envoltura de tensiones en carril.

De los resultados anteriores se dedujo que:

- Las conclusiones obtenidas en relación al reparto de las acciones de frenado en el modelo simplificado se veían confirmadas en los tramos isostáticos del inicio y final del modelo. Las pilas que soportaban los vanos isostáticos confirmaban valores para esta hipótesis de menos de 200 KN. En los tramos con tablero continuo, las pilas fijas absorbían prácticamente de forma íntegra estos esfuerzos.
- Los efectos de las acciones térmicas en las pilas intermedias de los vanos isostáticos seguían siendo muy pequeños, siendo más elevado este efecto en el final del tramo y en las pilas fijas intermedias.
- Por otra parte del análisis de las envolturas en tensiones se deducía que mientras que en los tramos isostáticos los límites de la ficha UIC se cumplían con holgura, la presencia de tableros continuos generaba unas

sobretensiones muy importantes, que impedían la verificación del carril en esas zonas.

A la vista de los resultados obtenidos, se decidió proceder a evaluar diferentes alternativas para solucionar el exceso de tensiones. Así, las opciones que se proponía analizar eran las siguientes:

- 1) Modificación de la configuración y tipo de apoyos: tanteando las posiciones de los puntos fijos y del número de éstos por tablero, así como analizando la posibilidad de ampliar el número de pilas con apoyos deslizantes.
- 2) Utilización de fijaciones de los carriles de características reales o especiales (LRF o ZRF).
- 3) Reducción de las longitudes de los tableros continuos de las transiciones “in situ”, introduciendo juntas de dilatación en ellos.

En ningún caso se planteó ni la modificación de la posición de las pilas ni la

reducción de la longitud del tramo continuo de la estación, dada su especial tipología.

La solución 1 no aportaba ninguna ventaja significativa, siendo las medidas más eficaces la disposición de juntas en los tableros continuos y el uso de fijaciones de carril de tipo especial o real.

A partir de los estudios anteriores, se procedió a encajar la solución definitiva que permitiera verificar todos los parámetros de la ficha UIC 774. Para ello se procedió a:

- Se incluyó la zona 8 en los análisis, de tal forma que sobre las zonas 9-10 se tuviera una “imagen” real de su comportamiento.

- Se dispuso el apoyo de todos los extremos de los tableros continuos sobre aparatos POT deslizantes.

- Se usaron fijaciones de los carriles de resistencia longitudinal reducida, en concreto se utilizaron fijaciones con rigidez de 20 KN/m.

Adicionalmente a las cuestiones anteriores, y siguiendo las indicaciones de la Dirección Técnica de la Obra, se modificó la acción de temperatura para que se aplicara sólo sobre el tablero.

Con estas modificaciones en el diseño se obtuvieron los resultados siguientes, los cuales ya cumplían con las limitaciones de la UIC:



Figura 10. Envoltorio de tensiones en carril para solución finalmente adoptada.

Finalmente hay que señalar que para evitar la introducción del efecto señalado en el epígrafe 4 sobre los carriles, debido al uso de aparatos de apoyo de neopreno en los vanos isostáticos, se decidió instalar entre tableros llaves de cortante que permitieran acotar las deformaciones máximas relativas entre éstos a un valor máximo de 2 mm.

Referencias

[1] UIC 774-3R “Track-bridge Interaction. Recom. for calculations”. Oct 2001

[2] EN1991-2-2003 “Action on structures – Part 2. Traffic loads on bridges”

[3] RDSO. (2014). Guidelines for carrying out rail-structure interaction studies on metro systems. Lucknow.

[4] TCRP 71 (2012). Track design handbook for light rail transit. Nat. Academy of science.

[5] Manterola, J.; Astiz, M.A.; Martínez, A. “Puentes de ferrocarril de Alta Velocidad”. ROP 3386. 2000

[6] Cuadrado “Consideración de las deformaciones por retracción y fluencia en el estudio del fenómeno de interacción vía-tablero” ROP 3446. Agosto 2004

[7] Kumar, R. et al. “Effect of temperature gradient on track-bridge interaction”. Interaction&multiscale mechanics. 2012.