

Experiencias en el cálculo de Interacción vía-estructura en viaductos de trenes ligeros urbanos

Experiences in RSI Analysis for Urban Light Rail Viaducts

Luis Carrillo Alonso^{*a}, Mariano Martín Cañueto^b, Pedro de Dios Barrau^c,
Cristina García Cambrón^d, Diego Romagosa Sanchez-Monge^e

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Dpto de Estructuras de Obra Civil-Puentes. Acciona Ingeniería

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable Area de Proyectos. Acciona Ingeniería

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Gerente departamento de Estructuras. Acciona Ingeniería

^d Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniera de Proyectos. Dpto de Estructuras de O.C.-Puentes. Acciona Ingeniería

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Dpto. de Estructuras de O.C.-Puentes. Acciona Ingeniería

Recibido el 8 de enero de 2023; revisado el 5 de marzo de 2023; aceptado el 4 de abril de 2023

RESUMEN

Acciona Ingeniería ha participado en distintas fases del proceso de diseño de los viaductos del Metro de Dubai y Vancouver, ambas obras adjudicadas a Acciona Construcción. Los dos proyectos implican el diseño de largos viaductos para trenes ligeros en los que el análisis de la interacción vía estructura es fundamental para verificar el diseño de la vía y de la subestructura. Este documento pretende mostrar las particularidades de dicho análisis en este tipo de estructuras y las dificultades en la aplicación de la normativa vigente UIC 774-3, dado que ésta se enfocó a su aplicación a viaductos de ferrocarril convencional.

PALABRAS CLAVE: Viaducto elevado, fijaciones para el carril, carril continuo soldado, interacción vía-tablero, rotura de carril.

©2023 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ABSTRACT

Acciona Engineering has participated in different phases of the design process for the Dubai and Vancouver Metro viaducts, both projects were awarded to Acciona Construction. These projects involve the design of long viaducts for light rail, being essential the analysis of the track structure interaction in order to carry out the design of the track and the substructure. This document shows the special features of the RSI analysis for this type of structure and the issues found when the UIC 774-3 leaflet approach is considered, because this code is focused on the design of conventional railway viaducts.

KEYWORDS: Urban rail viaduct, rail fastener, CWR, rail-structure interaction, rail break.

©2023 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

1. INTRODUCCIÓN

La utilización prácticamente en exclusiva del carril continuo soldado en las nuevas líneas ferroviarias que se han venido proyectando desde hace unas décadas, ha llevado a la necesidad de considerar una serie de problemáticas relativas al cálculo de la interacción generada entre la vía y las estructu-

ras sobre las que se dispone. Es por este motivo que, desde la década de los años 80 se desarrollaran numerosos estudios, en concreto por diferentes comités ERRI, que dieron lugar a la ficha UIC-774-3 [1] y a la posterior inclusión de lo referido en ella en el Eurocódigo EN1991-1-2 de octubre de 2004 [3]. De esta forma quedó establecida una metodología para el análisis de la interacción vía-estructura.

* Persona de contacto / Corresponding author:
Correo-e / e-mail: luis.carrillo.alonso@acciona.com (Luis Carrillo)

Sin embargo, dado que el procedimiento que establece la ficha UIC-774-3 para el análisis de este problema, en relación a los parámetros y verificaciones a desarrollar en el cálculo, está orientado básicamente al diseño de viaductos para ferrocarril convencional, resulta que, las particularidades que se presentan en el caso de los largos viaductos de los ferrocarriles ligeros urbanos no quedan explícitamente recogidas en esta normativa.

En este sentido, se presenta en este documento la experiencia de Acciona Ingeniería en dos proyectos internacionales (Metro Dubai y Metro Vancouver), en relación a la problemática anteriormente expuesta.

2. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN EN EL CASO DE VIADUCTOS DE TREN LIGERO

2.1. Objetivo del análisis y estrategias de diseño.

El denominado fenómeno de interacción engloba todos aquellos efectos que son causados por la conexión entre la vía y una estructura. En concreto incluye tanto los esfuerzos generados por esta conexión, que deberán quedar en equilibrio entre la vía y el tablero, como las deformaciones inducidas, que igualmente se deben compatibilizar entre ambos elementos. Es decir, que la configuración y el comportamiento del tablero influye sobre el estado tensional del carril y a su vez el tablero debe ser capaz de redirigir los efectos de la interacción hacia las pilas y estribos.

Sabiendo que la metodología para el análisis de la interacción vía-estructura quedó recogida en la ficha UIC 774-3, hay que puntualizar que dicha normativa se orientó a solventar los problemas que se planteaban en los viaductos de las nuevas líneas de Alta Velocidad, que desde los años 90 del pasado siglo se construyeron en Europa, y en las que los requisitos de trazado son muy exigentes.

De forma general las indicaciones de la metodología UIC buscan principalmente:

- Comprobar las tensiones y deformaciones generadas en los carriles dispuestos sobre la estructura, de tal forma que se garantice la adecuada circulación de los trenes.

En principio, esta consideración podría llevar, en el caso de tableros continuos a partir de cierta longitud (aproximadamente 120 m para tableros de hormigón), a la necesidad de la instalación de aparatos de dilatación de vía para limitar las tensiones del carril. En cambio, dado que las administraciones ferroviarias prefieren limitar la disposición de juntas en carril por motivos de mantenimiento y comodidad del servicio, mediante el análisis de la interacción y la disposición de aparatos de vía de gran capacidad ha sido posible validar la ejecución de grandes longitudes de viaductos continuos con la mínima afección al carril. De esta forma se ha conseguido llegar a longitudes de tramo continuo de más de 3000 m, tanto en experiencias en la Alta Velocidad en Francia como en Alemania y España¹.

¹ En concreto en España se han construido tableros continuos como el viaducto del río Huerva (1147m), del Barbantiños (1176m) y del Arentejo

- Plantear de forma adecuada el diseño frente a las acciones horizontales longitudinales.

Este aspecto está relacionado con la disposición de puntos fijos de conexión entre tablero y pilas, que permitan absorber las importantes fuerzas de frenado y arranque, así como las debidas a los efectos térmicos y reológicos. A su vez, la configuración de apoyos del tablero definirá las longitudes dilatables de la estructura.

En base a las dos cuestiones anteriores, tradicionalmente se han adoptado dos estrategias diferentes para la configuración de un viaducto ferroviario:

- Una primera, que podríamos denominar solución “francesa” [7], consistente en disponer un tablero continuo sobre un conjunto de apoyos deslizantes, planteando el punto fijo sobre aquella pila o estribo donde se disponga de la mayor rigidez frente al desplazamiento longitudinal. Así, las fuerzas horizontales se concentrarían sobre dicho elemento, liberando al resto de pilas y estribos de esta acción. Es decir, que se propone penalizar el diseño de un elemento de la subestructura de forma muy importante, con la intención de aligerar el diseño del resto. Con esta solución, el análisis de la interacción no aportará ninguna optimización del mecanismo resistente frente a esfuerzos horizontales, ya que para todas ellas se establece un “camino” previamente determinado. En cambio, sí que será necesario confirmar que las tensiones en el carril son admisibles.
- En el caso de la segunda estrategia, que se podría denominar solución “alemana”, el tablero se conformaría por una sucesión de vanos isostáticos apoyados sobre pilas, mediante pares de apoyos POT fijos y deslizantes. Será con esta solución donde el análisis de la interacción puede permitir optimizar el mecanismo de reparto de los esfuerzos longitudinales entre los distintos elementos de la subestructura, respecto de la consideración de un reparto isostático de dichas acciones, dada la gran capacidad del carril para movilizar el trabajo resistente de los distintos componentes de la subestructura. En cambio, al ser las longitudes dilatables de tablero pequeñas, las comprobaciones de las tensiones en los carriles no deberían suponer ningún problema, ya que teóricamente podría plantearse una sucesión de vanos sin limitación de la longitud total.

Sin embargo, en las últimas décadas, y sobre todo en ámbito no europeo (Norteamérica, Sudamérica, en Oriente Medio y en Asia)², se han proyectado y ejecutado un gran número de trenes ligeros y tranvías elevados interurbanos. Estas infraestructuras necesitan de la ejecución de viaductos de mucha longitud pero no gran altura, con requerimientos tanto de cargas como de trazado mucho menos exigentes que en el caso de las líneas de Alta Velocidad, y los cuales normalmente se resuelven con sucesiones de vanos isostáticos de entre 30 y 40 m de luz. Estas nuevas estructuras por lo tanto han que-

(1444m) donde se dispuso una sola junta de dilatación, mientras que con 2 juntas de dilatación se han alcanzado longitudes de tablero continuo de 1485m en el Viaducto del Sárano, 1620m en el Viaducto del Ulla, 1755m en el A° del valle y de 3200m en el Viaducto de Archidona.

² Como ejemplos podría mencionarse el caso del Metro de Vancouver en Canadá, el de Denver en USA, el de Santiago de Chile, el Metro de Monterrey en México, el Metro de Panamá, el Metro de Delhi en India, el Metro de Dubai, el Metro de Doha, el de Guangzhou en China y el de Nieuwen en Taiwan.

dado fuera del foco del análisis contemplado en la ficha UIC-774 y han requerido de estudios sobre aspectos particulares que se han reflejado en recomendaciones y diferentes guías internacionales [9][10][12] [15].

2.2. *Condicionantes y metodología de cálculo establecidos en la UIC-774-3.*

El cálculo de la interacción vía-tablero establecido en la UIC 774-3, y posteriormente recogido en el Eurocódigo y en la IAPF-07, describe el análisis exclusivamente frente a las acciones térmicas, reológicas, de frenado y arranque, y al efecto longitudinal de la aplicación de las cargas verticales. Es decir, que este análisis plantea determinar el efecto particular generado por la disposición del carril sobre una estructura, en comparación con la situación en la que el carril se apoya directamente sobre el terreno.

Con ese objetivo, la ficha UIC establece los límites de los incrementos de tensiones normales que puede producir la interacción, en relación a las que soportaría el carril fuera de la estructura, así como las deformaciones máximas que pueden a su vez generarse en este elemento. Los valores límite de estas tensiones normales adicionales son de +92 y -72 N/mm², para las tensiones de tracción y compresión respectivamente. Los valores anteriores se establecieron al descontar al límite elástico del acero del carril las tensiones debidas a la flexión de éste³, las tensiones debidas a la aplicación en el carril de una temperatura de ±50° y las tensiones residuales generadas durante su fabricación. El límite de la tensión de tracción se introduce para acotar los efectos de la fatiga y minimizar la posibilidad de rotura frágil del carril, mientras que la limitación de la tensión mínima de compresión se establece para garantizar que no se produce la inestabilidad del carril por pandeo.

La disposición de la vía sobre balasto o sobre placa marca una diferencia fundamental en esta última consideración, en lo que a la seguridad frente a la inestabilidad del carril se refiere, dada la mucho mayor restricción al desplazamiento lateral ejercida por las fijaciones de la vía en placa. Es por ello, que en diversas normativas, guías y pliegos⁴, dicho condicionante se ha ampliado hasta unos valores límite de +/-92 N/mm² tanto para tracción como para compresión.

Es importante incidir en que estos límites se establecen para acotar las tensiones normales provocadas por los esfuerzos axiales, aplicados en el centro de gravedad de los carriles, debidos a 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 él⁵. Esta cuestión, es importante tenerla siempre presente cuando se trabaje fuera del ámbito estricto de comprobaciones establecido por la ficha UIC.

Por otra parte, la ficha UIC plantea la modelización del conjunto vía estructura (tanto tableros como apoyos, pilas y

estribos) de tal manera que la conexión entre vía y tablero se realice mediante unos muelles que representen el comportamiento no-lineal de las fijaciones del carril. Es decir, que se ha de contemplar que dichas fijaciones tienen un comportamiento elástico-lineal hasta que se supera la fuerza de rozamiento máxima que es posible movilizar en dicha conexión, momento a partir del cual se produce el deslizamiento del carril sin incremento de la fuerza en la fijación. Este comportamiento se representará mediante un elemento de conexión estructura-carril caracterizado por una función bilineal que relacione fuerza y desplazamiento. Los valores para estos muelles establecidos en la UIC 774-3 para vía en placa son de 40 kN/m y 60 kN/m para vía cargada y descargada, con deformación máxima antes del deslizamiento de 0.5 mm.

Además, la metodología de cálculo establecida en la ficha UIC 774-3 permite analizar y cuantificar el efecto de la interacción vía-estructura desde tres enfoques diferentes: un primer método simplificado basado en el uso de las soluciones tabuladas en la propia ficha, un siguiente nivel consistente en el uso de un cálculo no lineal de cada una de las hipótesis de carga a considerar, para después combinar todas ellas y obtener una envolvente de todo el conjunto. Por último, se propone un cálculo no lineal paso a paso, con el cual se obtienen los resultados totales al considerar todas las cargas mediante un proceso incremental de aplicación de éstas. En todos los casos la metodología que plantea la ficha UIC es un análisis bidimensional mediante modelos de cálculo planos, dado que, como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal de esta ficha era el estudio de la interacción en los viaductos de alta velocidad, cuya curvatura en planta y alzado es mínima. El segundo método basado en la superposición de los efectos individuales de cada una de las cargas producirá resultados del lado de la seguridad de cara a esfuerzos y tensiones en el carril, mientras que el tercer método llevará a resultados más ajustados en esfuerzos y tensiones, pero a mayores deformaciones.⁶

2.3. *Otros requisitos y consideraciones en el diseño.*

El proyecto en los últimos años de numerosas líneas de trenes ligeros elevados, ha llevado a la aparición de problemáticas específicas en su diseño, asociadas a la utilización de la vía continua sobre placa, instalada en estructuras de gran longitud y relativa flexibilidad. Hasta lo que conocen los autores, estas problemáticas ni se encuentran recogidas de forma completa, ni se han desarrollado metodologías específicas en ninguna normativa actual, existiendo hoy en día en este sentido un cierto vacío normativo⁷.

2.3.1. *Hipótesis de rotura de carril (rail break).*

En base a la experiencia principalmente en Estados Unidos y Canadá, y en general 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 asocia a

3 Tensiones causadas por la flexión del carril debido al paso del tren LM71, que serán mucho mayores que en el caso de trenes de menor peso, lo que llevaría a la conclusión de que el rango límite de tensiones en el carril establecido en la ficha UIC es conservador en el caso de trenes más ligeros.

4 Según Norma Din Fb101, RDSO 3.3.1, [16] y [17].

5 El único efecto de las cargas verticales a tener en cuenta según la ficha UIC 774-3 es el debido a los axiles generados en los carriles, causados por el giro de los tableros por flexión.

6 Ver apartado 4.6.3.3 de RDSO y [11].

7 Tanto en el documento TCRP [10] como en la norma ACI 343-1-R12 estadounidenses, en la guía RDSO [9] india y en la coreana KRC8080, se comentan aspectos relativos a la problemática de los viaductos elevados para trenes ligeros, pero lo indicado en dichos documentos no detalla cómo abordar las problemáticas específicas. Se espera una nueva edición de la ficha UIC 774 donde tal vez se avance en este aspecto.

la generación tracciones por encima de los valores admisibles al someter el carril a un descenso térmico acusado⁸. En el caso de las especificaciones de la UIC 774-3, indirectamente se supone que el uso de las fijaciones de gran rigidez, necesarias para el caso de la circulación de trenes convencionales, lleva a la verificación de este requisito. Es cuando se considera el uso de fijaciones de menor capacidad, como resulta adecuado para la circulación de trenes ligeros, cuando se debe prestar atención a esta verificación. Una situación parecida se indica que 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 tres comprobaciones: la primera de ellas asociada al incremento de tensiones producidas en el resto de carriles existentes en la sección de vía 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 del carril. La tercera de ellas, y tal vez la que se considera más importante en este enfoque, consistente en la determinación del desplazamiento relativo entre extremos del carril roto, debido a la actuación de las cargas actuantes en el instante de la rotura sobre la configuración con el carril colapsado.

Este último aspecto es el que se denomina comúnmente como “*rail-gap*” y se considera que debe acotarse para evitar el descarrilamiento de algún tren que pudiera circular en el instante del fallo. En general esta comprobación se asocia a un “*gap*” máximo, relacionado con las dimensiones de la rueda del vehículo, adoptándose normalmente valores límites de en torno a 2” (o bien 50 mm). Es discutible si esta comprobación tiene sentido efectuarla asociada a situaciones de mantenimiento, ya que se entiende que en ese caso la circulación ferroviaria se encontraría interrumpida.

El cálculo de esta hipótesis se basará en la aplicación sobre la estructura de las cargas térmicas 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 previo a la rotura. De esta forma, la composición de los estados de carga anteriormente indicados permite obtener la configuración después de la rotura con esfuerzos nulos en los extremos del carril cortado. Dicha composición debe realizarse de forma incremental, dado el comportamiento no lineal de las fijaciones del carril.

Como alternativa, en las referencias [9][10][12]⁹ se in-

8 Estrictamente este fenómeno se produce cuando se alcanza un valor elevado de tracción en el carril, el cual, como se mostrará en los resultados que se incluyen en este documento, no sólo se genera bajo la hipótesis de descenso térmico.

9 Tanto en el epígrafe 7.5.6 de TCRP[10], como en el documento [12] y en la RDSO[9]. En concreto en esta última, en su epígrafe 5.1 se comenta que el cálculo de la hipótesis de rail-break debe realizarse con proceso incremental paso a paso, para tener en cuenta de forma adecuada la no linealidad de los “fasteners” de conexión del carril. Igualmente, en este documento se señala la posibilidad de tener que considerar las acciones en el momento de la rotura del carril con carácter impulsivo.

En cambio, no se concreta una metodología para la comprobación en tensiones de los carriles, dado que parecería que el gap sólo debe verificarse para carga térmica.

Habría que indicar que este planteamiento no parecería quedar completamente del lado de la seguridad, dado que, si dicho gap debe limitarse para garantizar la circulación segura de los trenes, habría que tener en cuenta que

cluyen formulaciones simplificadas que permiten establecer un límite mínimo de la resistencia de las fijaciones del carril, para así acotar las deformaciones máximas que se pudieran producir entre extremos del carril roto.

El cálculo de las tensiones producidas en el resto de carriles, después de la rotura del carril, normalmente devolverá valores que, al compararse con el límite elástico del acero del carril, serán de pequeña cuantía. En el caso de estructuras de vía doble, el incremento de tensiones se produce en los tres carriles que permanecen inalterados, mientras que, en el caso de estructuras para vía sencilla, el incremento se producirá sobre el carril que permanece intacto, generándose en él, de forma más o menos localizada, unas tensiones de magnitud doble que las que soportaba inicialmente. Sabiendo que las tensiones generadas en los carriles en las situaciones habituales son muy inferiores al límite elástico del carril, resultará que, incluso en el caso de vía sencilla, esta comprobación no deberá implicar ninguna consecuencia en el diseño, más allá de la verificación de la capacidad de las fijaciones adyacentes a la zona de rotura del carril para controlar el “*gap*” generado.

Del mismo modo, el incremento de esfuerzo cortante en la cabeza de las pilas próximas a la zona de rotura de carril será despreciable frente a los esfuerzos en situación permanente, teniendo en cuenta que la situación de rotura del carril se consideraría como accidental.

2.3.2. 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 gran versatilidad en los diseños. En concreto, para el caso de estructuras continuas de gran longitud, una solución para la reducción de las tensiones en los carriles, que cada vez más habitualmente se está planteando, es la utilización de fijaciones de resistencia reducida (“*low restraint fasteners LRF*”) o bien de fijaciones que permitan el deslizamiento del carril (“*zero restraint fasteners ZRF*”). La disposición de estos elementos de forma localizada, en aquellos tramos donde se producen valores elevados de axiles en el carril, permite la reducción de las tensiones generadas, de forma menos acusada en el primer caso respecto del segundo. Como contrapartida ha de prestarse una especial atención al análisis de las mayores deformaciones que van a producirse, así como a la hipótesis de rotura de carril.

Las principales dificultades en la aplicación de estas soluciones se deben, por un lado a la necesidad de la certificación de los productos de cada fabricante, y por otra parte a la complicación que podría suponer el mantenimiento de estos elementos especiales. Ambas cuestiones pueden llevar a que algunas administraciones sean reacias a su uso, aunque también es cierto que cada vez hay más referencias de casos ya ejecutados usando estos dispositivos.

Además, estos carriles tendrán que compatibilizarse con la disposición de aparatos de vía, siendo normalmente un requisito de los suministradores la necesidad de no disponer

el propio paso de los vehículos generará un incremento de tensiones en los carriles “sanos” el cual que podría llevar a un fallo sucesivo de éstos. Esta consideración no se ha encontrado reflejada en la normativa y bibliografía consultada.

este tipo de fijaciones a menos de unos 50-100 m de un aparato de vía.



Figura 1. "Pandrol Vipa DRS ZLR fastening". Metro Bangkok con marca colores por tipo de fijación.

Una solución aún más novedosa es la que se comenta en las referencias [13] de la administración coreana de ferrocarriles y [18]. En ambas se plantean, en lugar de disponer de una conexión más flexible entre carril y tablero, diseñar una vía en placa sin restricción al desplazamiento relativo longitudinal entre tablero y losa. En este caso el comportamiento de tablero y carriles quedaría casi completamente desvinculado.

2.3.3. Aparatos de vía.

Otro de los aspectos particulares del diseño específico, de este tipo de 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, incluyendo las estaciones, es inevitable la disposición de aparatos de vía (cruces o desvíos) sobre el propio viaducto¹⁰. Normalmente se debería evitar la disposición de estos elementos cercanos a singularidades como juntas de tablero, por lo que requieren de tramos continuos de una cierta longitud.

A su vez, sabiendo que estos elementos tienen una geometría y tipología muy variada, cabría preguntarse de cara al análisis de la interacción, si los carriles mantienen su continuidad a su paso por ellos, o bien deberían considerarse la existencia de discontinuidades. Esta cuestión deberá evaluarse en particular con el suministrador de la vía, incorporándose las características específicas 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 simular de forma adecuada la coacción que produce una sobre otra, lo que tampoco será un análisis sencillo.

2.3.4. Diferencias de temperatura en carril.

Otro aspecto que podría considerarse en el diseño es el efecto de las diferencias de temperatura que se pueden generar en un mismo carril a lo largo de todo un tramo de vía, ya que

¹⁰ Ver referencias [8], en relación a este aspecto

en algunos casos parte de los carriles discurrirán al abrigo del ambiente exterior, como por ejemplo dentro de las estaciones, mientras que sobre otros se producirá un soleamiento directo.

En general, estas hipótesis llevarán a situaciones donde se reducirán los efectos de la interacción en las zonas a cubierto de la intemperie, requiriéndose únicamente una adecuada distribución longitudinal de la resistencia de las fijaciones del carril, con el objetivo de poder canalizar adecuadamente la transición de esfuerzos.

2.3.5. Alineación en planta de la vía.

Aunque la geometría del trazado en planta y alzado se podría considerar íntegramente en un modelo de cálculo, son realmente los pequeños radios de curvatura en planta los que implicarán la necesidad de considerar este efecto en un análisis tridimensional. En ellos, la aplicación de cualquier acción en el sentido del eje de la vía generará una fuerza en dirección radial sobre la subestructura que debería considerarse en el diseño de estos elementos.

Hay que recordar que todos los efectos de la interacción planteados por la ficha UIC se indica que quedarán recogidos en modelos planos de 2D, por lo que este aspecto particular no se incluiría en las comprobaciones específicas indicadas en aquella normativa, y se considerará como un efecto adicional debido a la presencia del carril continuo. Es decir, que la repercusión en tensiones causada en el carril por este efecto no debería sumarse a las debidas por el resto de acciones contempladas en la ficha UIC, y por lo tanto no se deberían comparar contra los límites de tensiones adicionales establecidas en este documento.¹¹

En las referencias [9][10]¹² se proponen formulaciones simplificadas para el cálculo de las fuerzas en cabeza de pilas provocadas por variaciones de temperatura en un carril curvo. Hay que indicar que estas formulaciones se basan en el planteamiento conservador de considerar el carril como un anillo indeformable con radio igual al de la curvatura en planta. No se tiene en cuenta así la relajación de los esfuerzos que resultaría de la consideración del comportamiento real de la estructura, al introducir en el cálculo la flexibilidad de las pilas y sus cimentaciones.

2.3.6. Efecto del terreno de cimentación.

Aunque en la ficha UIC se indica explícitamente que el modelo de cálculo empleado debe reflejar las características reales de la subestructura, y por lo tanto debería considerar la flexibilidad que pueda aportar tanto el terreno de cimentación como las cimentaciones profundas, en el caso de los

¹¹ Según la norma coreana KRC8080 la forma de abordar esta problemática será la consideración de unos límites de tensiones específicos asociados al radio en planta del trazado.

¹² En las referencias TCRP y RDSO no se considera el efecto de la temperatura sobre un carril en curva estrictamente debido a la interacción vía-estructura, dado que las formulaciones que proponen no tienen en cuenta la influencia de la propia estructura en el cálculo de las fuerzas generadas. En el caso del Metro de Dubai, el cliente impuso la obligación de realizar un análisis con un modelo específico en 3D para evaluar este efecto, considerando las propiedades de la estructura. En cambio, dicho modelo sólo se utilizaba para determinar los cortantes en cabeza de pilas asociados, pero no para verificar los límites de tensiones adicionales en el carril, lo que tampoco parece un análisis completamente coherente.

grandes viaductos de alta velocidad, normalmente cimentados mediante zapatas o encepados, la no consideración de este efecto probablemente no invalidará los resultados obtenidos del análisis de la interacción.

Sin embargo, en los viaductos de luces pequeñas y gran longitud de los trenes ligeros elevados, el efecto de la flexibilidad de la cimentación no será despreciable, dado además que, en muchos casos estos viaductos se cimentarán mediante pilas-pilote. En éstos, desde un punto de vista teórico, debería implementarse en el análisis el comportamiento no lineal del terreno, pero la complicación del análisis hace poco práctica esta consideración. Es por ello que, una forma razonable de proceder sería realizar el cálculo bajo dos escenarios distintos, en los que se linealice el comportamiento del terreno: uno considerando rigidez cuasi-infinita de la cimentación a partir de cierta profundidad y otro en el que se suponga una situación opuesta, es decir que la cimentación sea especialmente flexible. De esta forma se podría obtener un rango de variabilidad de los resultados que nos permitiría acotar el alcance de este parámetro. El caso de elevada rigidez será conservador al analizar tensiones en carril, mientras que el caso de rigidez reducida será conservador al evaluar las deformaciones generadas. Este enfoque es el que se propone tanto en [1] como en [10] y [9].

3. ANÁLISIS REALIZADO PARA EL VIADUCTO ELEVADO DEL METRO DE DUBAI

En junio de 2016, Acciona Construcción, formando parte del consorcio denominado Expolink2020, resultó adjudicataria del proyecto y obra de la nueva línea del Metro de Dubai que daría acceso a la futura ubicación de la Expo2020. Dicha nueva línea tiene una longitud total de 15 Km, de los cuales 10.0 Km discurren como viaducto elevado¹³ y 5 en túnel. Además, se ejecutaron 7 estaciones: 2 de ellas soterradas y el resto elevadas ubicadas sobre el propio viaducto.

Dado que era un requisito fundamental del cliente utilizar una vía sin juntas a lo largo de todo el tramo, resultaba entonces que se debían diseñar tramos de más de 5 km de longitud de viaducto donde se debía instalar carril continuo, siendo por ello fundamental el análisis de la interacción vía-estructura.

Acciona Ingeniería, se vio implicada tanto en el proyecto de Licitación como posteriormente dando asistencia técnica al consorcio constructor, en diferentes fases del proyecto de detalle, especialmente en el desarrollo del análisis de la interacción vía-estructura.

3.1. Descripción de las estructuras del proyecto.

La estructura tipo del viaducto replica en sus líneas básicas la ya existente en el resto de líneas construidas en Dubai. Esta 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. Desde el punto de vista estructural, se conforma entonces un esquema resistente formado por una losa sobre la que se disponen las dos vías, la cual, mediante flexión transversal, transmite las cargas hasta las vigas de borde laterales, que finalmente se apoyan en 4 aparatos de apoyo de neopreno zunchado.

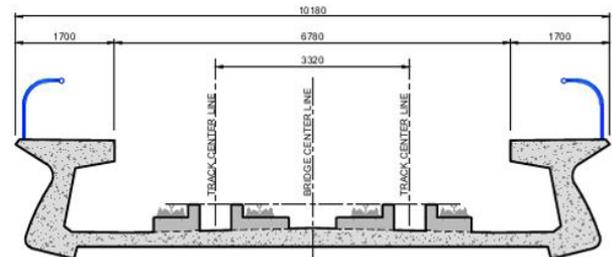


Figura 2. Sección del vano isostático tipo de 36m.

Este último elemento es el que resulta diferenciador en el diseño planteado, y tiene una serie de implicaciones estructurales muy importantes. Así, en base a conseguir la reducción de los esfuerzos debidos a la acción sísmica mediante el aislamiento del tablero, se decidió emplear como apoyo de los tramos isostáticos, en lugar de los más habituales en puentes de FFCC aparatos tipo POT, apoyos de neopreno zunchado.

Esta decisión, 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. Es decir que, debido a la tipología de apoyos elegida, los carriles en cierta medida contribuyen a realizar una función de llave de cortante entre tableros adyacentes. En consecuencia, la validación de los carriles se complica mucho, dado que, a la multitud de factores que intervienen en su diseño, hay que sumar adicionalmente este nuevo efecto. Para evitar esta acción sobre los carriles, finalmente se propuso, en los tramos en curva, el uso de llaves de cortante entre tableros que compatibilizaban los movimientos entre vanos adyacentes, impidiendo el movimiento relativo entre ellos y por lo tanto evitando la afeción al carril.



Figura 3. Proceso constructivo con viga lanzadora.

El proceso constructivo de estos viaductos fue la ejecución mediante dovelas prefabricadas y su colocación mediante viga lanzadora. Esta metodología buscaba industrializar la

¹³ Curiosamente, en una zona desértica y sin urbanizar se adoptó una configuración no en superficie para este tren ligero. En este caso la justificación técnica del viaducto venía más condicionada por limitar la posible acumulación de arena sobre la vía y el coste de mantenimiento asociado por ello.

construcción en la mayor medida posible, para optimizar los plazos de obra.

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 pilas-pilote.

Adicionalmente a los tramos tipo isostáticos anteriores, se ejecutaron varios tipos de estructuras continuas. Son las denominadas “2span”, “3span” y “4span”. La primera de ellas se diseñó para alojar los aparatos de vía, cuya longitud excede de los 36 m del tramo isostático, dado que estos elementos necesitan de la continuidad del soporte. Por este motivo se hacía 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 la salvedad de que el canto del tablero sobre el apoyo central se incrementa 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 proyectaron una serie de viaductos continuos de 3 y 4 vanos de canto variable, con luces máximas de hasta 72 m, ejecutándose todos ellos con 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.

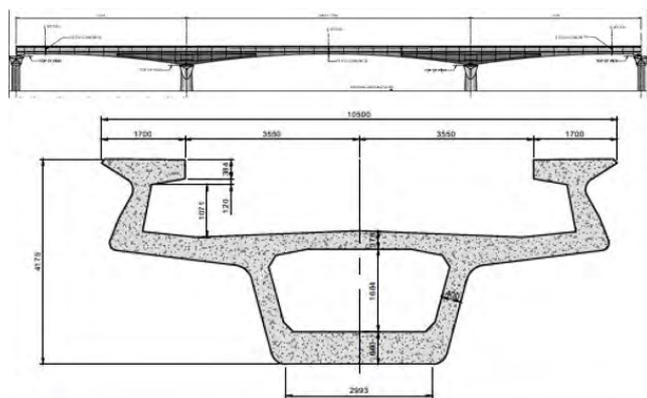


Figura 4. Alzado y sección sobre apoyos del 3span. Colocación de dovelas prefabricadas mediante ejecución por voladizos.

3.2. Interacción vía-estructura.

El estudio realizado por Acciona Ingeniería se desarrolló en dos fases: En una primera se estudió un “esquema tipo isostático”, con el que se pudiera evaluar el efecto del carril continuo sobre un tramo intermedio del viaducto, tanto en cortantes en cabeza de pilas, como los niveles de tensiones alcanzados en los carriles. Posteriormente, se procedió a analizar un

tramo concreto de especial complejidad, que correspondía al tramo final de la línea, donde se ubicaba la estación para la Expo2020. En dicho tramo existían varios tableros continuos, correspondientes a la estación y a los dos cambiavías a disponer en ambos extremos de la primera. En este último análisis se tuvieron en cuenta todas las singularidades del tramo, procediéndose a realizar un estudio que permitió decidir la mejor solución técnica a adoptar en esta zona.

Para los estudios anteriores fueron desarrollados modelos de cálculo utilizando el programa de elementos finitos SAP2000, donde se incorporó el comportamiento no-lineal de la conexión carril-estructura. Todos los modelos eran planos.

3.2.1. Resultados en el 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. En este modelo las pilas se modelizaron todas ellas de igual altura (15 m) y diámetro del fuste (2.00m). Sobre este modelo se procedió a aplicar las acciones debidas a temperatura, reológicas, así como las cargas verticales de tráfico y de frenado y arranque correspondientes al vehículo específico del proyecto¹⁴. El carril se suponía cortado en ambos extremos del modelo, y en consecuencia se planteó la aplicación de temperatura en carril y tablero. Los valores de las rigideces de las fijaciones adoptados eran los indicados en la ficha UIC, quedando las cimentaciones modelizadas hasta la profundidad en que se consideró que se producía el empotramiento de la pila-pilote.

Es importante destacar que en el caso de que el carril sea continuo sobre la estructura, la variación de temperatura del carril no provoca efecto de interacción, y es sólo la variación de temperatura del tablero la que genera este efecto, dado que el carril no se desplaza. Por otra parte, 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 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ para el caso de carril con junta.

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

Respecto de esta última acción, dado que su aplicación supone imponer un giro en cada sección del tablero, y al disponerse el carril casi a la misma profundidad que el centro de gravedad de aquel, su repercusión resultaba mínima y por lo tanto se decidió no tener en cuenta su efecto. En cualquier caso, las referencias [9][14] aportan información interesante en relación a la consideración del gradiente térmico y en qué casos si puede ser necesario tenerlo en cuenta.

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 y cuantificando el efecto favorable introducido por la pérdida de rigidez de las pilas, debido a su

14 Es importante tener en cuenta que, dado que en la Licitación la consideración del efecto de interacción debido a la temperatura se había evaluado de forma simplificada con un valor de 8KN/ml/vía, y el frenado se había aplicado en cada vano sin considerar reparto mediante los carriles, era de esperar que el análisis de la interacción de forma detallada permitiera optimizar el diseño de la subestructura.

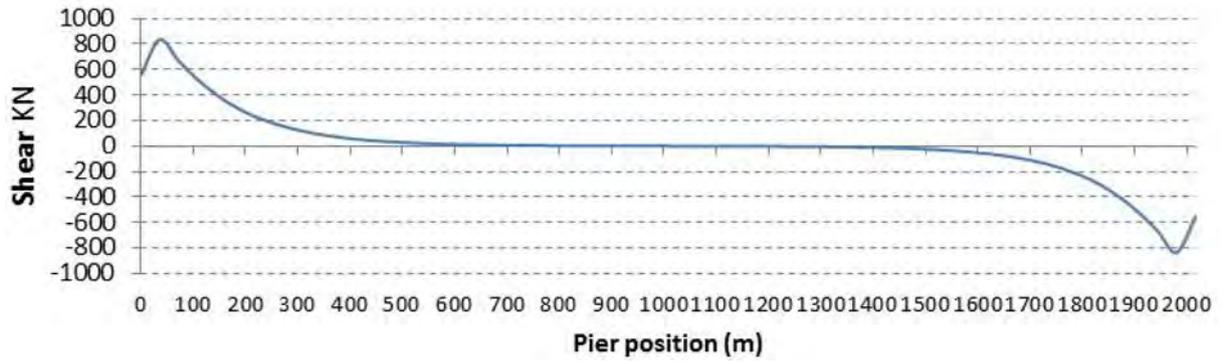


Figura 5. Cortantes en cabeza de pilas. Hipótesis incremento de temperatura en carril y tablero.

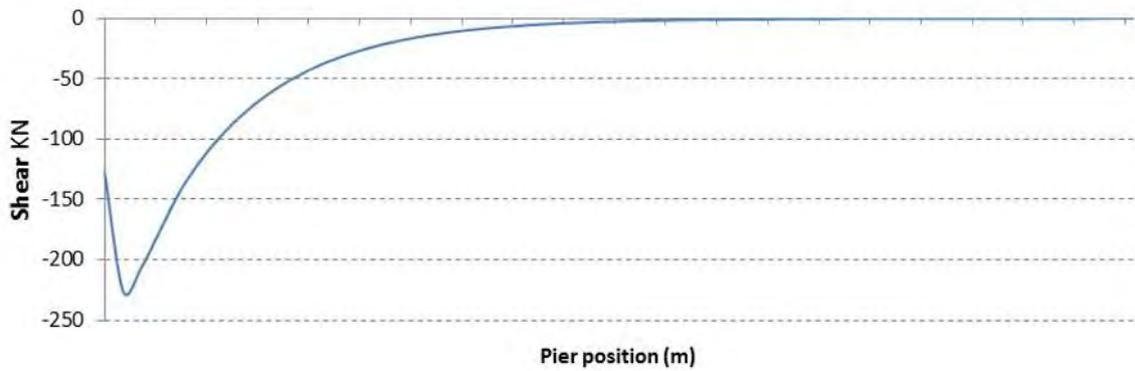


Figura 6. Cortantes en cabeza de pilas para la hipótesis de frenado en pila extrema.

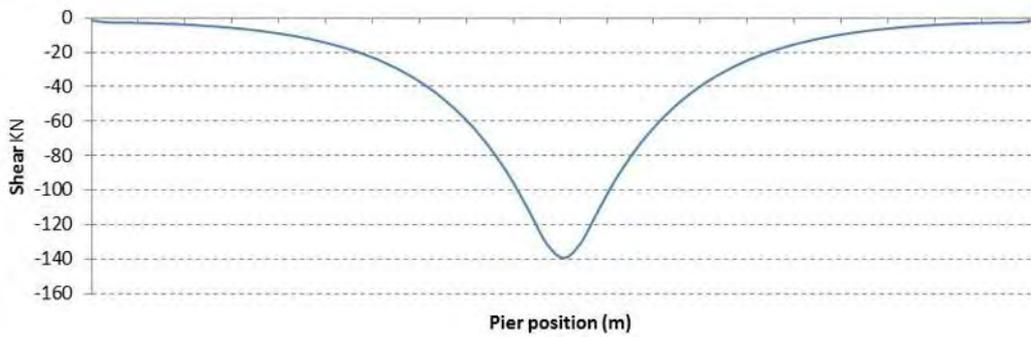


Figura 7. Cortantes en cabeza de pilas para la hipótesis de frenado en pila intermedia.

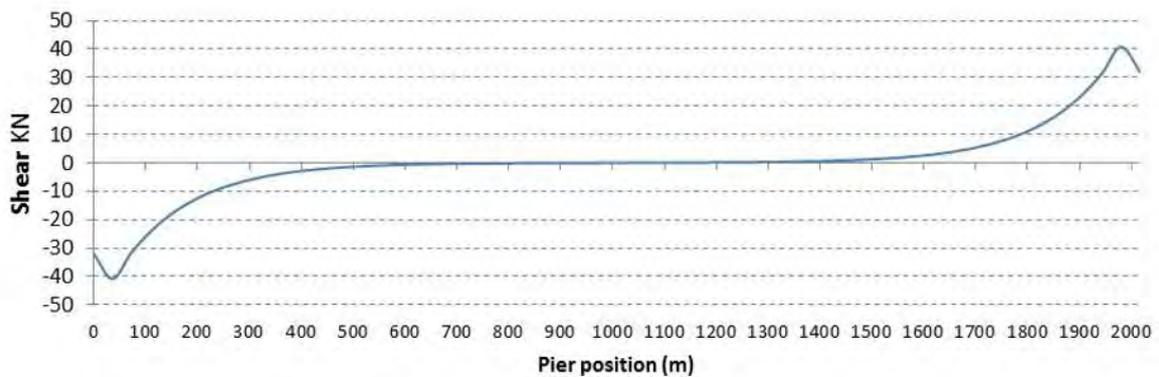


Figura 8. Cortantes en cabeza de pilas para la hipótesis de retracción y fluencia.

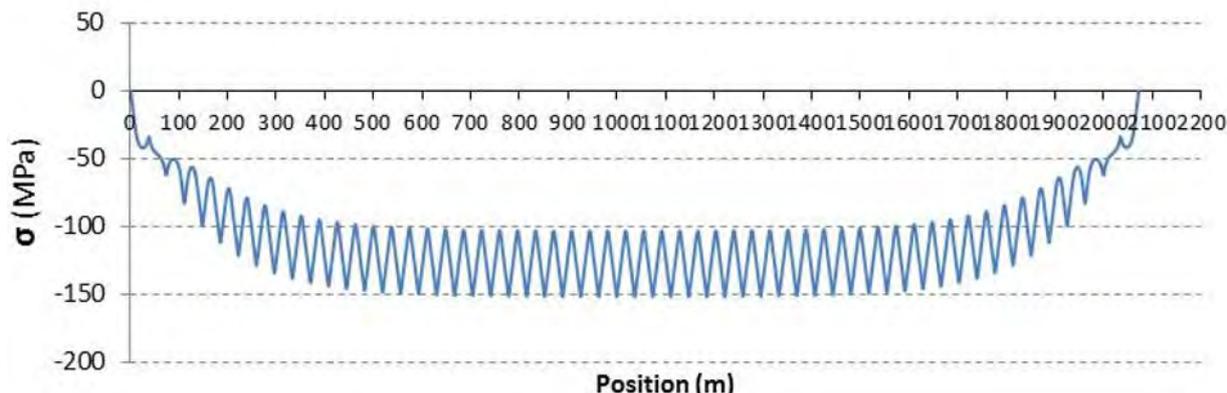


Figura 9. Tensiones en carril. Hipótesis de incremento de temperatura en carril y tablero.

vez al efecto de la fluencia¹⁵. Adicionalmente cabría considerar una cuestión que no queda clara en la bibliografía consultada, como es el hecho de que, al ser la retracción una deformación impuesta de acortamiento, ésta podría cuantificarse como efecto favorable si se sumara a los incrementos de temperatura y desfavorable si se aplicara de forma simultánea al descenso de temperatura.

Por otra parte, es importante tener presente que en la mayoría de la documentación consultada [6][7][9] se señala que estas acciones podrían no considerarse o reducir su cuantía, dado que las operaciones de mantenimiento periódicas del carril aliviarían y en la práctica eliminarían en gran medida su efecto.

Finalmente, el cliente decidió su aplicación con un valor reducido en un 50%, al estimar que existiría un cierto margen de tiempo entre el hormigonado de las dovelas y el instante en el que se colocara el carril, 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.

Dada la arbitrariedad de los anteriores criterios, habría que señalar que, en ningún caso, habría sido razonable llevarlos al extremo de que hubieran podido llegar a condicionar los tiempos y plazos del proceso constructivo.

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. Una cuestión no clara en este sentido era la consideración del coeficiente de impacto, dado que según la normativa o bibliografía que se consulte se pueden encontrar planteamientos contradictorios¹⁶.

Con los parámetros anteriormente establecidos, se procedió a desarrollar varios estudios de sensibilidad sobre este modelo, en función de la rigidez de las cimentaciones y apoyos. Hay que señalar que, dado que todos los vanos descansaban sobre neoprenos, resultaba que la rigidez de este elemento gobernaba el comportamiento del conjunto pila-neopreno, por encima de la propia rigidez de la pila-pilote.

Se adjuntan los principales resultados obtenidos para después proceder a comentar las conclusiones más importantes de todos ellos:

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

- El efecto de las acciones de tipo térmico y reológicas es despreciable en las pilas intermedias y sólo es de consideración en las pilas extremas (figura 5), siendo el cortante máximo obtenido de valor 820 kN. Solo en el extremo del tablero se produce el desplazamiento relativo entre carril y tablero, al no existir coacción al movimiento del primero nada más que por un extremo. En cambio, en las pilas intermedias las fuerzas debidas a la acción térmica quedan compensadas, al ser todos los vanos iguales.
- Que el frenado se reparte en un número de pilas suficiente como para que en ningún caso esta acción suponga más de 250 kN en cabeza de la pila más cargada y de menos de 200 kN en las pilas intermedias (figura 6 y figura 7). Es decir, que la pila más cargada deberá soportar un cortante que es, como máximo, el 30% de la fuerza total de frenado y arranque sobre un vano, lo que supone un valor bastante más bajo que el correspondiente a realizar un reparto isostático entre todas las pilas.¹⁷

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

- En las tensiones en el carril se observa claramente una figura en “acordeón” (figura 9) que viene a representar el efecto de los tableros isostáticos sobre el carril.
- Las acciones térmicas provocan unas tensiones debidas a la interacción que son 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 puede ser del orden de 25 N/mm².
- El efecto de las hipótesis de frenado y aceleración produce unos incrementos de tensiones en el carril de menos de 35 N/mm² (figura 11 y figura 11).
- Siendo el efecto de la retracción de menos de 10 N/mm² (figura 12) y el de las cargas verticales de menos de 5 N/mm²,

¹⁵ En este sentido igualmente se alinea la referencia [6], aunque no fue considerado en los diseños de las líneas construidas anteriormente del Metro de Dubai.

¹⁶ En la UIC 774-3 se indica que hay que considerar la aplicación del coeficiente de impacto sólo sobre las cargas verticales, al igual que señalan [3] y [9].

¹⁷ De esta conclusión se deducía que el cálculo simplificado efectuado en la fase de licitación con respecto a las acciones horizontales de temperatura y frenado quedaba del lado de la seguridad.

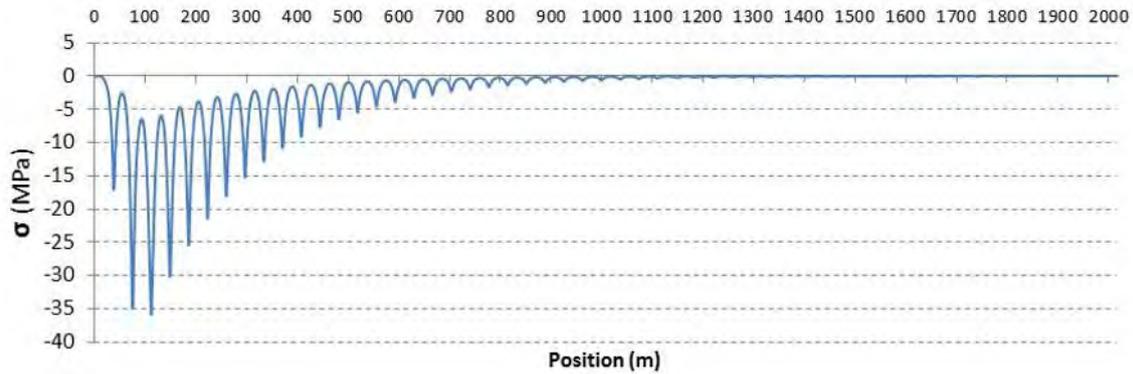


Figura 10. Tensiones en carril para hipótesis de frenado en pila extrema.

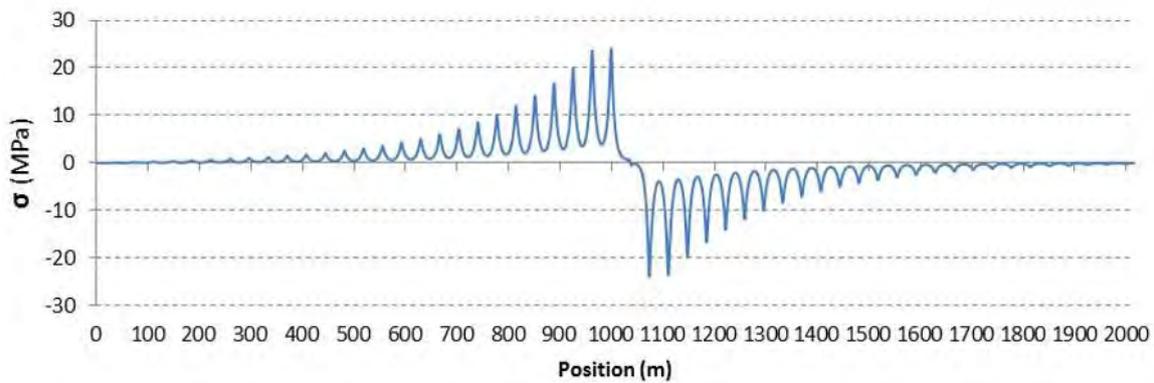


Figura 11. Tensiones en carril para hipótesis de frenado en pila intermedia.

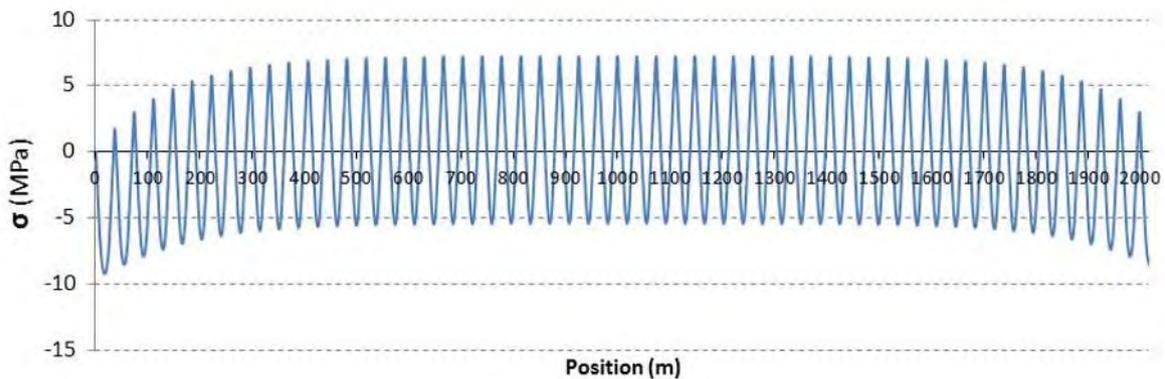


Figura 12. Tensiones en carril para hipótesis de retracción y fluencia.

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 ($\pm 92 \text{ N/mm}^2$).

Finalmente, hay que señalar que este modelo sirvió también para verificar que la rotura de uno de los 4 carriles, en el caso de producirse sobre una junta de dilatación entre tableros, no supondría ningún problema para la verificación de las tensiones en el carril respecto del límite elástico. En el caso de los cortantes en las pilas, al ser esta hipótesis accidental, no llevaron a ningún esfuerzo que resultara dimensionante.

3.2.2. Tramo real analizado.

El tramo real analizado consta de 82 pilas y una longitud total de aproximadamente 2700 m e incluye 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.
- La conexión de ambas estructuras mediante 2 estructuras (transiciones) "in situ" y con tableros continuos de 120 m de longitud.

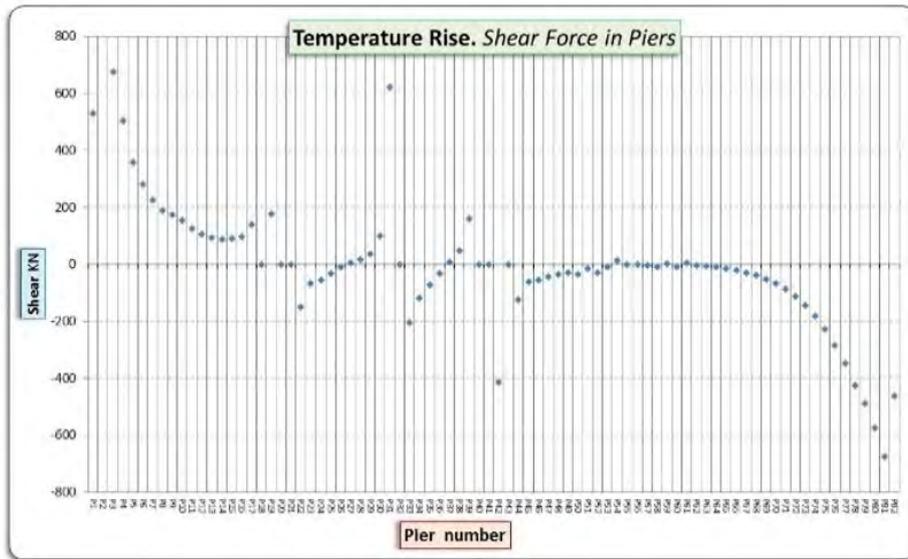


Figura 13. Cortantes en cabeza de pilas para hipótesis de ascenso de temperatura.

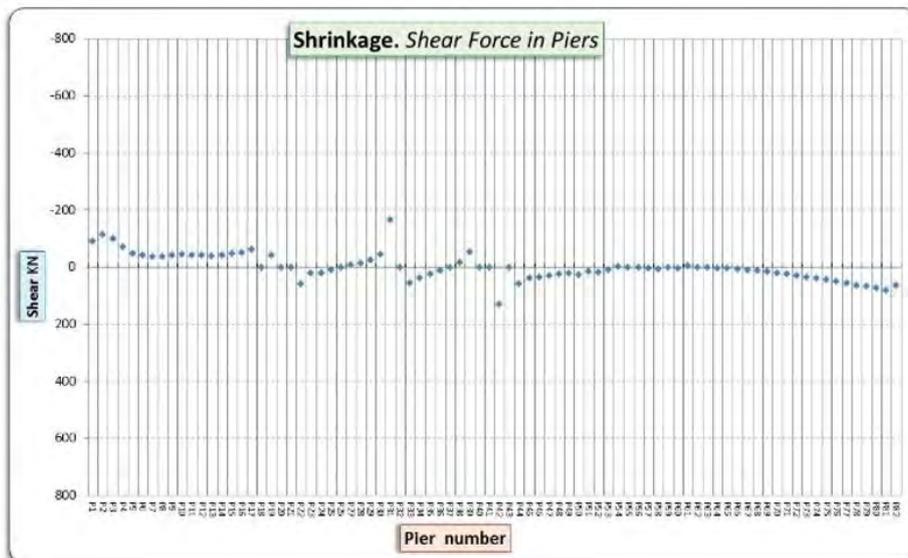


Figura 14. Cortantes en cabeza de pilas para hipótesis de retracción.

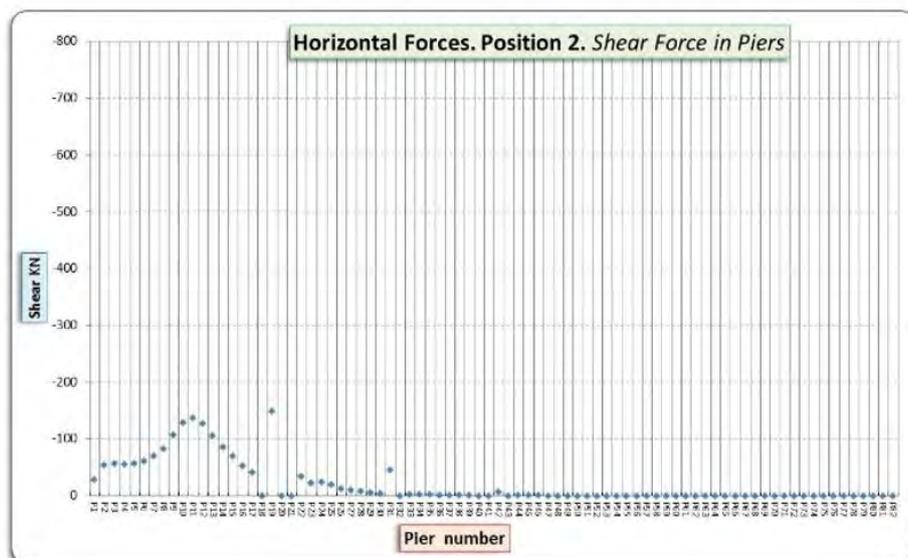


Figura 15. Cortantes en cabeza de pilas para frenado y arranque sobre pila intermedia.

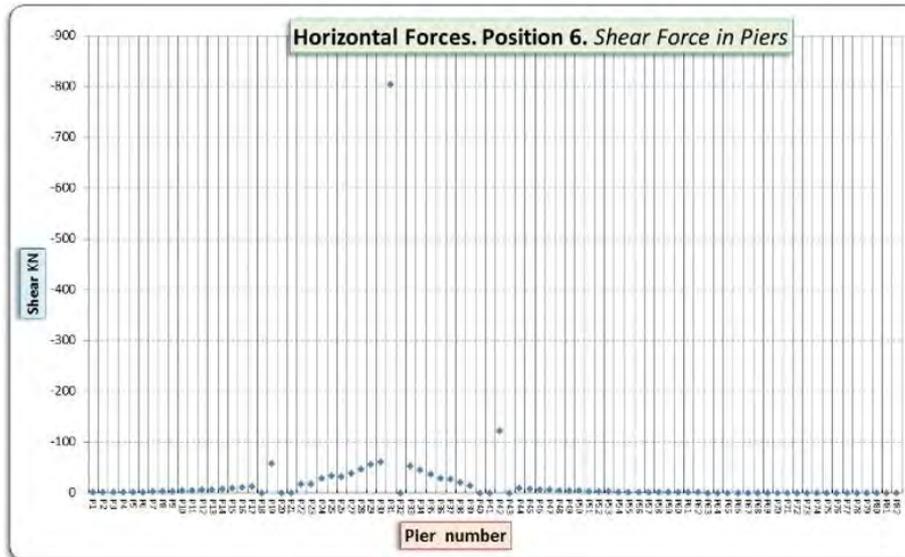


Figura 16. Cortantes en cabeza de pilas para frenado y arranque sobre tramo central.

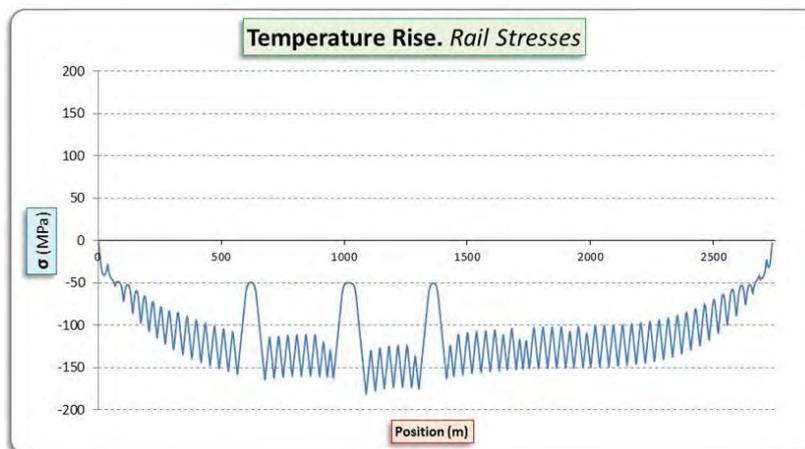


Figura 17. Tensiones en carril para hipótesis de ascenso de temperatura.

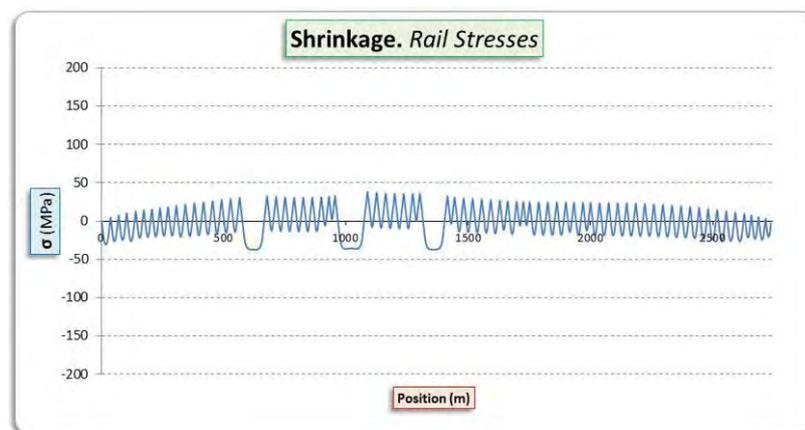


Figura 18. Tensiones en carril para hipótesis de retracción.

Se tuvieron en cuenta las características geométricas de las cimentaciones y los apoyos particulares de cada pila. No se consideraron las vinculaciones que generaba el tramo adyacente, dado que el análisis se quería focalizar en la zona central de la Expo, y al quedar esta zona suficientemente alejada,

los resultados obtenidos no se veían afectados.¹⁸

¹⁸ En RDSO se propone desarrollar los cálculos para los tramos comprendidos entre estaciones, siempre que dichos tramos incluyan los elementos singulares lo suficientemente centrados, como para que no se vean afectados por el efecto borde.

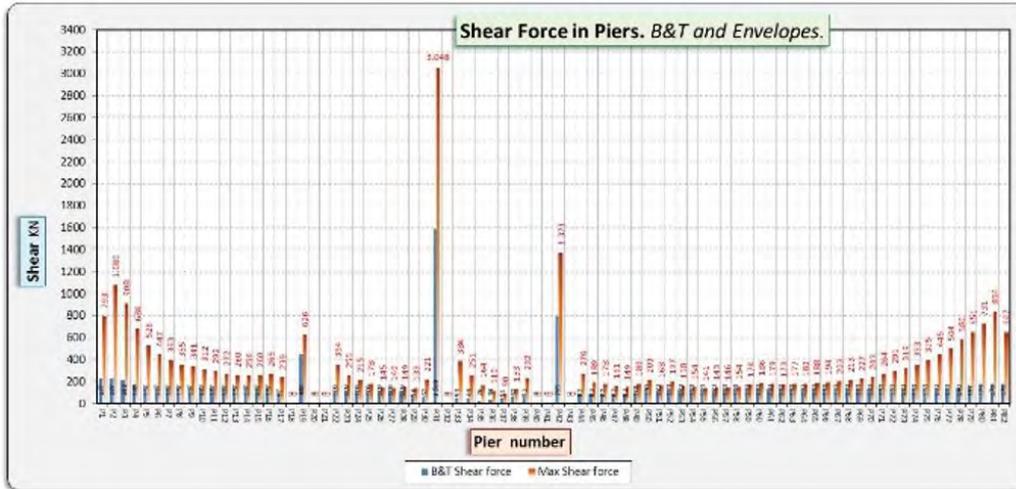


Figura 19. Envolvente de frenado y arranque (azul) y envolvente total (naranja), de los cortantes máximos en cabeza de las pilas.

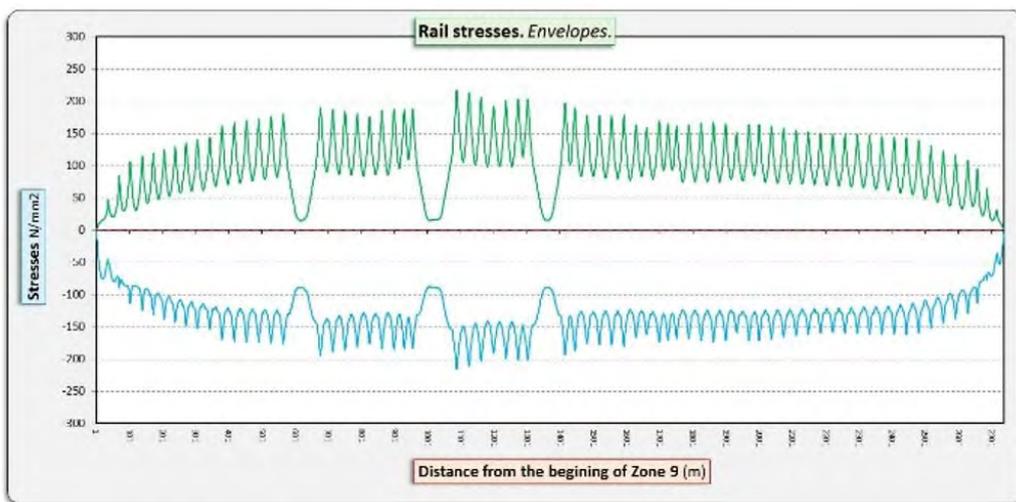


Figura 20. Envolvente de tensiones en el carril.

a) Resultados del análisis inicial desarrollado.

Se procedió 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. Se pretendía así un equilibrio que permitiera la máxima distancia entre puntos fijos y que a su vez pudieran quedar lo más centrados con los tramos continuos, reduciéndose por un lado las interacciones entre pilas fijas y por otro minimizando las longitudes de dilatación de los tableros continuos. Además, los apoyos extremos de los tableros continuos se planteaban de neopreno, mientras que el resto de apoyos de las pilas intermedias se planteaban de tipo POT deslizante.

Con estas premisas se obtuvieron los resultados que se adjuntan a continuación:

De los resultados anteriores se dedujo que:

- Las conclusiones obtenidas relativas al reparto de las acciones de frenado en el modelo simplificado se veían confirmadas en los tramos con vanos isostáticos del inicio

y final del modelo, absorbiéndose, en los tramos continuos, las pilas fijas prácticamente de forma íntegra estos esfuerzos. Las pilas que soportaban los vanos isostáticos confirmaban valores para esta hipótesis de menos de 200 kN (figura 15 y figura 16).

- Los efectos de las acciones térmicas y reológicas en las pilas intermedias de los vanos isostáticos siguen siendo muy pequeños, resultando más acusados estos efectos en el final del tramo y en las pilas fijas intermedias (figura 13 y figura 14).
- Por otra parte, del análisis de las envolventes en tensiones, se deduce que mientras que en los tramos isostáticos los límites de la UIC se cumplen con holgura, como se dedujo del modelo simplificado, la presencia de tableros continuos genera unas sobretensiones muy importantes, que impedían la verificación del carril en esas zonas (figura 20).
- Los criterios de limitaciones en deformaciones se cumplían en todos los casos con margen suficiente.

b) Estudio y justificación de los resultados obtenidos.

Aunque los valores obtenidos en los tramos isostáticos coincidían con lo adelantado en el modelo simplificado, dada la

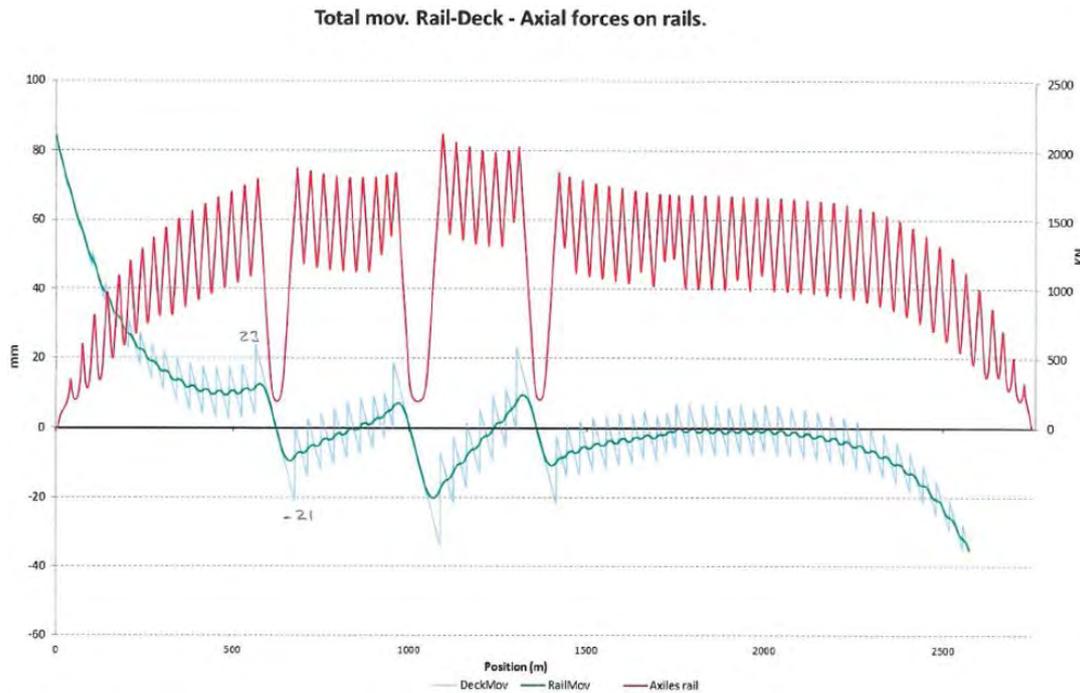


Figura 21. Desplazamientos absolutos de tableros (azul claro) y carril (azul oscuro), y axiles en éste (rojo), para descenso térmico.

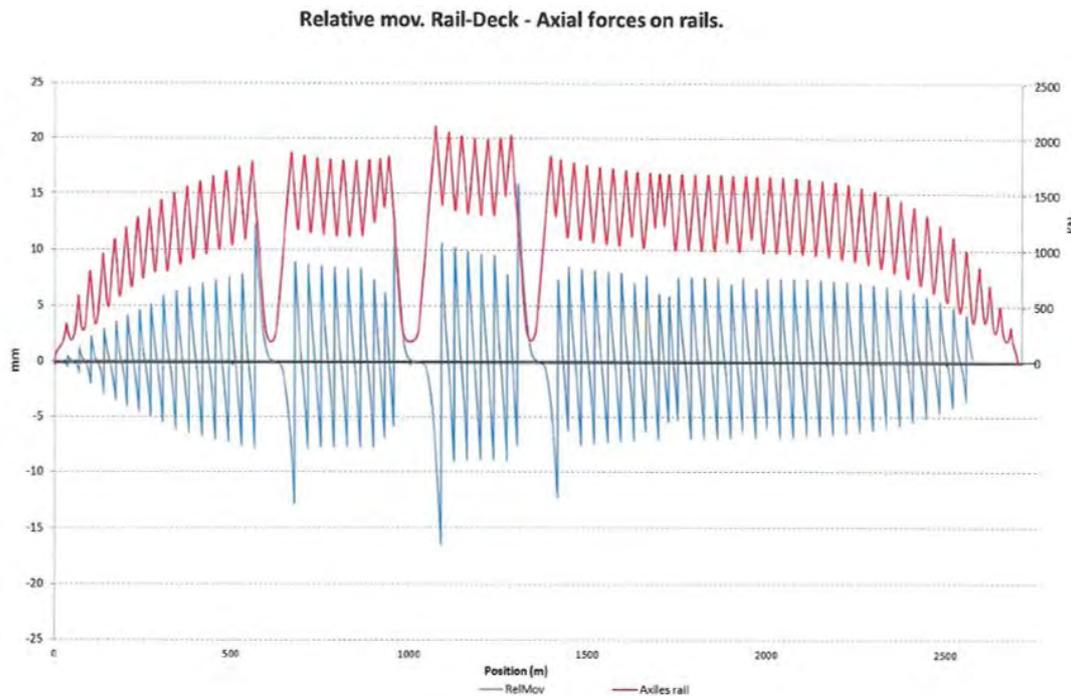


Figura 22. Desplazamientos relativos tablero-carril (azul), y axiles en carril (rojo), para descenso térmico.

complejidad del modelo de cálculo utilizado, se decidió realizar un estudio particular que permitiera confirmar y validar los resultados obtenidos de las zonas singulares.

Así, en primer lugar, se procedió a analizar los desplazamientos absolutos de carril y tableros en relación a los axiles generados en el carril, para a continuación calcular los desplazamientos relativos carril-tablero, en relación igualmente a los axiles del carril. Ambos análisis se realizaron para la hipótesis de descenso térmico, resultando los gráficos siguientes:

De la figura 22 se deduce que, es el movimiento relativo entre carril y tablero el responsable de las oscilaciones locales de los axiles (“acordeón”), es decir, que dicho desplazamiento relativo marca las variaciones de tensiones del carril.

A su vez, de la figura 21, es fácil deducir que, en las proximidades del extremo libre del carril, éste arrastra a los tableros, los cuales sufren una deformación impuesta, en este caso de sentido hacia el centro térmico del conjunto. Igualmente, los tramos continuos distorsionan el “acordeón” de deformaciones de los tableros isostáticos arrastrando a los tableros vecinos.

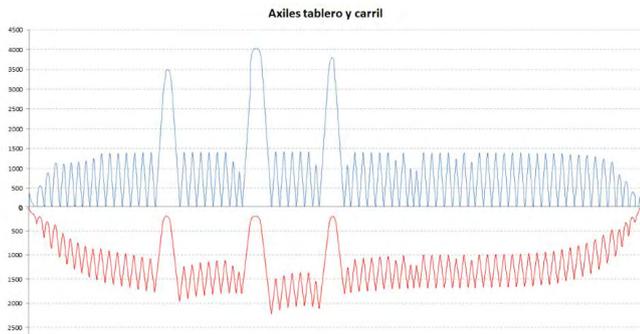
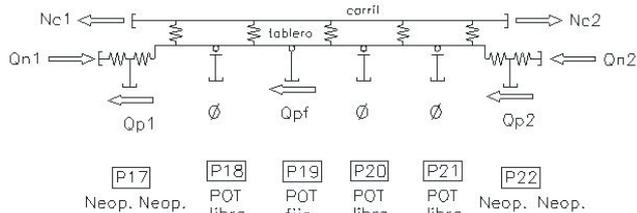


Figura 23. Axiles en tablero (azul) y carril (rojo). para la hipótesis de descenso térmico.

Por otra parte, si se comparan los axiles obtenidos en tablero y carril (figura 23), se observa de nuevo que existen una serie de oscilaciones locales que muestran la transferencia de axiles del carril a cada tablero, siendo los puntos fijos verdaderos sumideros de fuerzas horizontales.

Adicionalmente, para poder comprender el comportamiento local de los tableros continuos de las transiciones, dispuestos antes y después de la estación, se propuso comparar los resultados obtenidos en el cálculo de la interacción con los que se obtendrían en un modelo simplificado en el que el tablero no se viera sometido a la acción del carril y sólo sufriera un decremento térmico. El anterior cálculo permitió comparar, no solo los equilibrios obtenidos, sino también los desplazamientos. Respecto de este último aspecto, se pudo observar que la transición analizada era arrastrada hacia el centro térmico del conjunto situado en la estación.

Analizando el equilibrio estático de la transición, según el esquema adjunto que representa el equilibrio global del modelo de dicha zona:



siendo:

Nc1 y Nc2 – los axiles en los carriles antes y después de la transición

Qn1 y Qn2 – los cortantes en los neoprenos de vanos contiguos a la transición

Qp1, Qp2 y Qpf – los cortantes en cabeza de las pilas

se dedujo entonces que el comportamiento global era suma de los siguientes efectos individuales:

- El efecto de la temperatura aplicada sobre el tablero continuo sin carril, obteniéndose para este caso que el cortante en la pila central fija era de:
 $Q_{pf}(1) = 29 \text{ kN} \leftarrow$
- El “efecto global de la interacción”, como la deformación impuesta por el carril sobre el conjunto del viaducto hacia o desde el centro térmico global. Resultando que en la pila central fija de la transición supone un cortante:
 $Q_{pf}(2) = 76 \text{ kN} \leftarrow$

- El “efecto local de la interacción”, debida a la deformación impuesta por cada tablero sobre el tramo de carril situado sobre él. Resultando que en este caso supone un cortante de valor:

$$Q_{pf}(3) = 72 \text{ kN} \leftarrow$$

La suma de estos tres efectos, teniendo en cuenta la no-linealidad de la vinculación vía-tablero justificó y validó los resultados del modelo global:

$$Q_{\text{modelo}} = 168 \text{ kN} \approx Q_{pf}(1) + Q_{pf}(2) + Q_{pf}(3) = 177 \text{ kN}$$

c) Estudio de sensibilidad realizado.

A la vista de los resultados de la configuración inicial del modelo, y para poder validar el diseño propuesto según los criterios de la UIC, se decidió realizar un estudio de las diferentes alternativas técnicas que se podrían plantear para solucionar el exceso de tensiones que se producían en el carril. Las opciones que se proponían analizar eran las siguientes, ordenadas según se pensaba sería más sencillo implementarlas:

- I. Modificación de la configuración y tipo de apoyos: tanteando las posiciones de los puntos fijos (apoyos POT fijos) y del número de éstos por tablero, así como analizando la posibilidad de ampliar el número de pilas con apoyos deslizantes.
- II. Rigidización de las pilas fijas de los tableros continuos.
- III. Utilización de fijaciones de los carriles de características especiales.
- IV. Reducción de las longitudes de los tableros continuos de las transiciones “in situ” introduciendo juntas de dilatación en ellos.

En ningún caso se planteó la modificación de la posición de las pilas, dada la dificultad para su encaje en planta al tener que verificar multitud de condicionantes de todo tipo. Tampoco se planteó reducir la longitud del tramo continuo de la estación por su especial tipología.

De este estudio se decidió que:

- Las alternativas con más de un punto fijo por tramo continuo no aportaban mejoras sustanciales al nivel de tensiones en los carriles.
- Las soluciones verdaderamente válidas serían, por orden de eficacia:
 - 1) Disminuir las longitudes de los tramos continuos, alternativas que se pensaba era complicada de implementar en las estaciones.
 - 2) Uso de carriles de características especiales.
 - 3) Ajuste de las configuraciones de los apoyos, opción que se considera que podrá aportar únicamente mejoras de pequeña entidad y de forma puntual.

d) Soluciones finalmente propuestas.

A partir de los estudios anteriores, se ajustó una solución definitiva que permitía verificar todos los requisitos de la ficha UIC 774-3. Para ello se procedió a:

- Apoyo de todos los extremos de los tableros continuos sobre aparatos POT deslizantes.
- Uso de carriles de resistencia longitudinal reducida sobre los tramos continuos, en concreto se utilizaron carriles de resistencia reducida de valor 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.

4. ANÁLISIS DEL VIADUCTO ELEVATED GUIDEWAY DEL METRO DE VANCOUVER

El siguiente caso corresponde al proyecto de ejecución del Metro de Broadway en Vancouver (Canadá) con una extensión de 5.7 Km, adjudicado a las empresas Acciona Construcción y Ghella en el año 2019, en el que se incluye el diseño y cálculo del viaducto Elevated Guideway que desarrolló Acciona Ingeniería.

4.1. Descripción de la estructura.

El viaducto Elevated Guideway tiene una longitud de 677.4 m, distribuidos en vanos de 30.5 metros, excepto en la zona denominada Earl Finning Way, donde se disponen vanos de 32 metros. El trazado en planta incluye curvas de pequeño diámetro.

Las pilas son monofustes, cimentadas sobre un único pilote, y quedan conectadas al tablero de forma integral, excepto en aquellas pilas sobre las que se dispone junta de dilatación en el tablero (cada tres o cuatro vanos), llegando a una longitud máxima de tramos continuos de 122 m.

El tablero está formado por 4 vigas pretensadas doble T, excepto en la zona de "pocket track", en la que el número de vigas es de 6, y losa de 0.225 m de espesor. El ancho del tablero es variable de 7.6 m hasta 10.8 m.

En las pilas que no son integrales las vigas apoyan sobre apoyos de neopreno zunchado.

4.2. Requisitos del cliente para la interacción vía-estructura.

El principal requisito establecido por el Cliente en el Project Agreement (en adelante PA) era el uso de carril soldado

continuo para la vía. Es por ello que resultaba imprescindible tener en cuenta los efectos de interacción vía estructura, no sólo para garantizar la validez del carril, sino también para el control de los esfuerzos transmitidos de la vía a la estructura.

Es importante destacar que en el ámbito norteamericano/canadiense la forma de abordar el análisis de la interacción difiere completamente del planteamiento de la ficha UIC, y así resultó en este proyecto. De hecho, en este caso el análisis de la interacción se centra en determinar la influencia de la variación de temperatura y en cálculo de la rotura del carril, no considerándose otros aspectos como la fuerza de frenado y la retracción.

Según el PA, suponiendo que el carril soldado continuo fuese instalado a la temperatura de referencia de $T_0=20^{\circ}\text{C}$, bajo la cual el carril se encuentra libre de tensiones, se debe plantear el análisis de la interacción para una temperatura máxima $T_{R,max}=55^{\circ}\text{C}$ y una mínima del carril $T_{R,min}=-20^{\circ}\text{C}$.

Las cargas que se indicaba en el PA que se deben tener en cuenta a partir del análisis de la interacción eran:

- *Fuerzas de interacción longitudinales (LR1 y LR2) en la zona recta del Elevated Guideway.*

Para la hipótesis de variación de temperatura, si se empleaba la rigidez correspondiente a funcionamiento normal de los *fasteners*, $K_1=25\text{ kN/vía}$, se obtenían las fuerzas LR1, que intervenían en los ELS. Empleando la rigidez correspondiente a mal funcionamiento de los *fasteners*, $k_2=37.5\text{ kN/vía}$, se obtenían las fuerzas LR2, que intervenirían en los ELU.

- *Fuerzas de interacción tangenciales y radiales (LR1, RT1, RT2) en la zona curva del Elevated Guideway.*

De nuevo exclusivamente para la hipótesis de temperatura, se determinaban las fuerzas radiales RT1 empleando las rigideces correspondientes a funcionamiento normal de los *fasteners*, mientras que, las fuerzas radiales RT2, se obtenían empleando las rigideces correspondientes a mal funcionamiento, considerando la temperatura máxima del carril $T_{R,max}=55^{\circ}\text{C}$.

- *Fuerzas debidas a la rotura de carril. (BR)*
Estas eran las fuerzas longitudinales que se transferían cuando ocurría la rotura de un carril. Dichas fuerzas se uti-

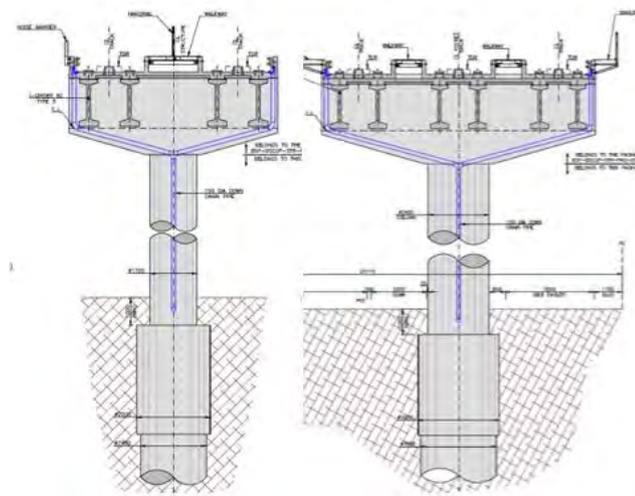


Figura 24. Sección del tablero y pila integral.

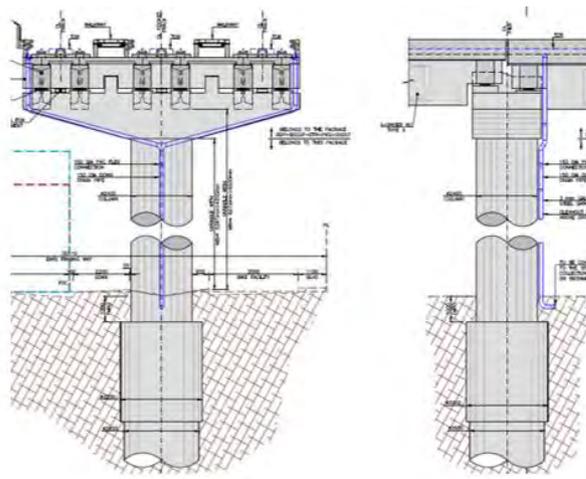


Figura 25. Sección del tablero y pila con apoyos de neopreno zunchado para apoyo de las vigas.

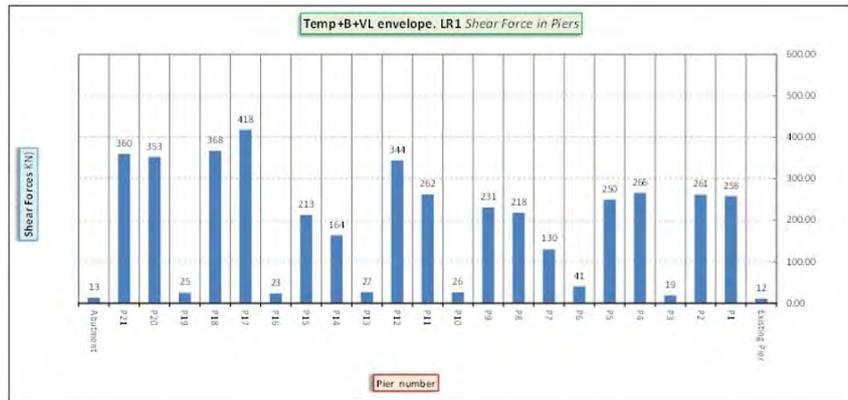


Figura 26. Esfuerzos cortantes LR1 en pilas.

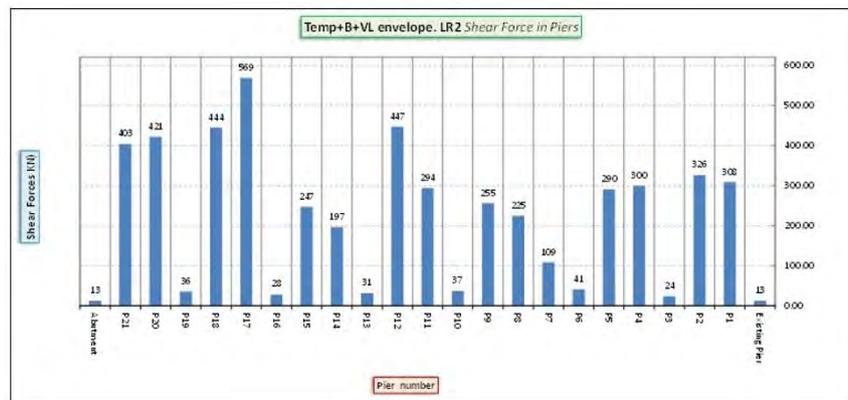


Figura 27. Esfuerzos cortantes LR2 en pilas.

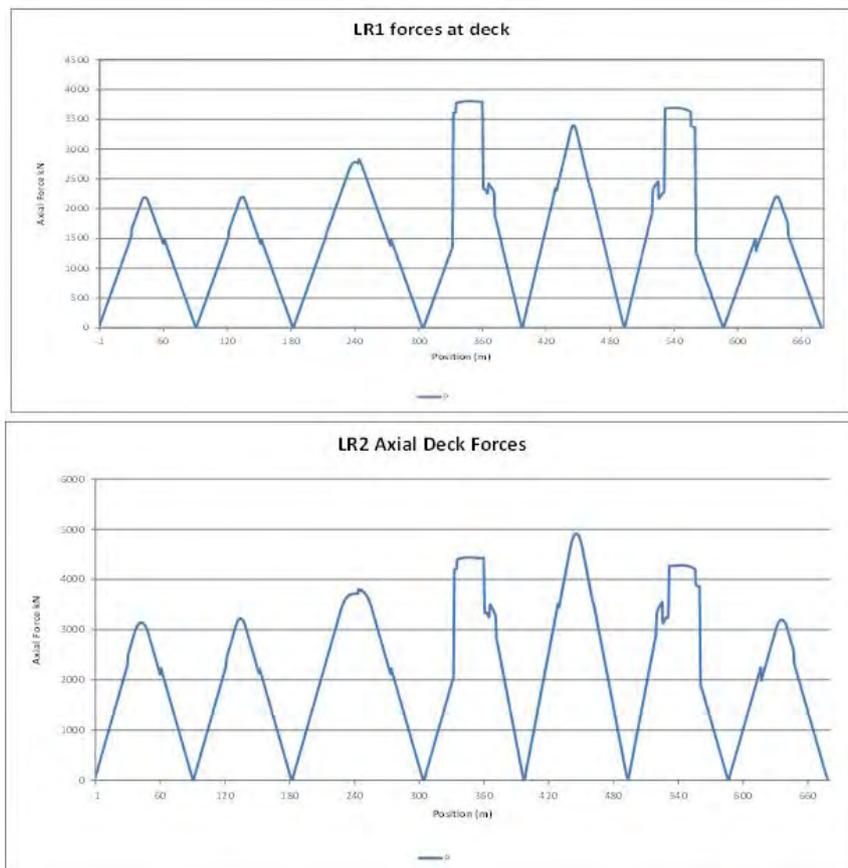


Figura 28. Esfuerzos axiales LR1 y LR2 en tablero.

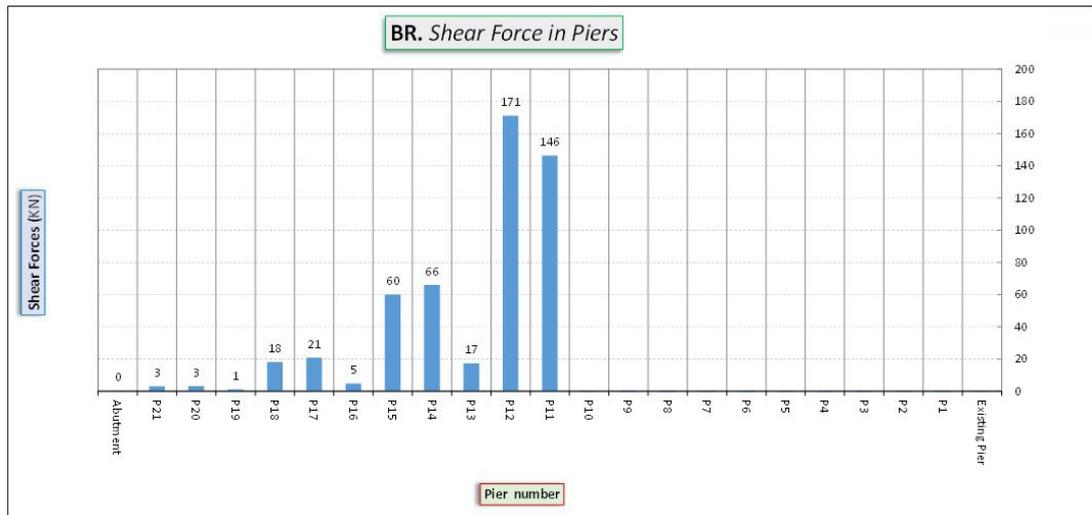


Figura 29. Esfuerzos cortantes BR en pilas.

lizarian en el dimensionamiento en ELU de todos los elementos de la estructura. Además, debía comprobarse que la abertura entre los dos extremos del carril roto (GAP) fuese inferior a 50 mm, suponiendo que la rotura del mismo se producía a la temperatura mínima del carril $T_{R\min} = -55^{\circ}\text{C}$ y con funcionamiento normal de los fasteners.

4.3. Estudio de Interacción vía-estructura.

En base a la experiencia que Acciona Ingeniería en los estudios de interacción vía-estructura, se decidió elaborar un modelo longitudinal no lineal 2D, con el que se podría valorar la importancia de los esfuerzos longitudinales debidos a las fuerzas longitudinales (LR1, LR2 y BR) definidos en el PA, así como su afección tanto a la superestructura como a la subestructura del Elevated Guideway. Este modelo se elaboró con el software comercial SAP 2000.

Para ello se definieron todos los parámetros estructurales: secciones del tablero y pilas, materiales, altura de pilas, rigidez de los apoyos de neopreno, distribución de vanos considerada disponiendo juntas de dilatación del tablero cada tres o cuatro vanos, esto es, en la pila inicial, pilas 3,6,10,13,16,19 y en el estribo final, estableciéndose así una serie de tramos continuos de tres o cuatro vanos, llegando una longitud máxima entre juntas de 122 m.

Para tener en cuenta el comportamiento no lineal de las fijaciones del carril, se asemejó dicho comportamiento a una ley bilineal. Se asumió que en la ley bilineal la rama de plastificación (deslizamiento) del fastener se alcanzaba para una resistencia de valor igual al indicado en el PA para funcionamiento de vía normal o mal funcionamiento, cuando el desplazamiento longitudinal de la vía es de 0.5mm.

Se tuvo en cuenta que la temperatura aplicada sobre el carril no produce efectos de interacción, al ser carril soldado continuo y sólo se ha de considerar el incremento o decremento de temperatura al tablero.

Ante la falta de datos en el PA, se asumió un incremento/decremento de temperatura del tablero de $\pm 35^{\circ}\text{C}$. Además, se consideró que las fuerzas de frenado y arranque, así como la flexión vertical debida a los trenes, producen efectos de interacción.

Se obtuvieron de esta forma los cortantes en pilas LR1 y LR2 debidos a temperatura, frenado y arranque y flexión vertical, que se muestran a continuación. Se observa en las figura 26 y figura 27 que el máximo cortante LR1 en cabeza de pila es de 430 kN y se producía en la pila 17. En el caso de los esfuerzos cortantes LR2, el máximo cortante se producía en la pila 17 y tenía un valor de 570 kN.

Igualmente se determinaron los axiles en el tablero (figura 28) debidos a la interacción para la hipótesis de decremento térmico LR1 y LR2

El *rail-gap* se verificó comprobando que en la sección sobre la pila 10, donde se producía el máximo axil de tracción en la hipótesis de decremento térmico, considerando que en ella se produce la rotura de un carril, considerando a su vez unas rigideces de las fijaciones de valor normal e introduciendo en los extremos del carril roto unas fuerzas iguales y contrarias de valor el del axil existente en el instante antes de la rotura, la deformación relativa entre los extremos del carril era de 11 mm, muy lejos por lo tanto del límite indicado de 50 mm.

Además, se obtuvieron los cortantes en cabeza de pilas debidos a la rotura de carril, siendo el máximo de 170 kN en la pila 12.

A la vista de estos resultados, se pudo concluir que:

- Con el modelo 2D no lineal considerado, teniendo en cuenta los efectos longitudinales que intervienen en la interacción vía-estructura y la configuración de apoyos adoptada, permite una distribución de los cortantes en la cabeza de las pilas fijas que era asumible.
- La abertura de los dos extremos del carril roto es inferior a los 50 mm requeridos en el PA.
- A pesar de que en el PA no se especificaba que hubiera que verificar los incrementos de tensiones en el carril debidas a la interacción vía-estructura, se comprobó que considerando las acciones de temperatura, frenado y arranque y flexión vertical de los trenes, las variaciones máximas de la tensión de tracción en la vía es de 86 MPa a la altura de la pila 10 y la máxima tensión de compresión -86 MPa , valores que están dentro de los límites recomendados para vía en placa.

5. CONCLUSIONES

Se han mostrado en este documento las singularidades del análisis de la interacción vía-estructura para dos casos diferentes de ferrocarriles ligeros urbanos, exponiéndose sus particularidades, debidas a las distintas consideraciones de las normativas y requisitos exigidos en cada caso. En concreto, se han expuesto: por un lado el caso del Metro de Dubai que correspondería a un proyecto desarrollado en un ámbito normativo europeo, pero en el que hubo de tenerse en cuenta ciertas particularidades que no se recogen en la ficha UIC774-3. Por otra parte, el caso del Metro de Vancouver corresponde a un proyecto desarrollado en un ámbito normativo norteamericano, donde el enfoque de la UIC774-3 no se contemplaba por el Cliente.

Así, del estudio realizado para el Metro de Dubai se podría concluir que:

- Modelos de análisis 2D son suficientes para determinar todos aquellos efectos de la interacción longitudinal considerados en la ficha UIC y evaluarlos contra los límites de tensiones establecidos en este documento.
- Ciertos aspectos relativos a las cargas a considerar no quedan completamente definidos en la ficha UIC, como por ejemplo la metodología para la aplicación de la retracción, lo que llevará a que los Clientes podrán hacer interpretaciones particulares en cada proyecto.
- La disposición de neoprenos como apoyo del tablero introduce unas tensiones sobre el carril, debido a la actuación de fuerzas transversales, que no se incluyen en el análisis de la interacción longitudinal y por lo tanto no deben evaluarse contra los límites de tensiones de la UIC. Para evitar este efecto fue necesario disponer llaves de cortante entre vanos.
- Por último, que la medida más eficaz para la reducción de tensiones en los carriles sobre los tramos continuos fue el uso de fijaciones del carril de resistencia inferior a la considerada en la ficha UIC.

Por otra parte, del estudio realizado para el Metro de Vancouver se puede concluir que:

- El análisis de la interacción en ámbito normativo norteamericano es completamente diferente al establecido en la ficha UIC. No se evalúan tensiones en el carril contra un límite prefijado, sino que únicamente se determinan esfuerzos horizontales, longitudinales y transversales, en subestructura debidos a la interacción, así como se verifica la apertura del carril en la hipótesis de su rotura.
- En definitiva, bajo este enfoque la interacción se evalúa en base al uso de unas fijaciones de menor capacidad a las establecidas en la ficha UIC, lo que obliga a realizar el cálculo y comprobación de la rotura del carril.

Finalmente es importante recordar dos aspectos relativos a los análisis longitudinal y transversal de la interacción: en primer lugar, que para trenes ligeros los límites de tensiones en

los carriles fijados en la ficha UIC son conservadores. En segundo lugar, que una forma de tener en cuenta los efectos en dirección transversal de la interacción es reducir los límites de tensiones en función del radio de curvatura en planta del trazado, tal y como se plantea en ciertas normativas.

En definitiva, de estos estudios se deduce que, actualmente, para el estudio de la interacción vía-estructura en viaductos para trenes ligeros no existe un formato normativo completo y adecuado que recoja todas sus singularidades, lo que obliga a la aplicación de forma especial de la ficha UIC y a la consideración de criterios de diseño, en cierta medida subjetivos, que dependen fuertemente del ámbito geográfico del proyecto.

Referencias

- [1] UIC 774-3R "Track-bridge Interaction. Recommendations for calculations". Octubre 2001
- [2] UIC 776-2R "Design requirements for rail bridges based on interaction phenomenon between track and bridge".
- [3] EN1991-2-2003 "Action on structures – Part 2. Traffic loads on bridges"
- [4] Manterola, J., Astiz, M.A., Martínez, A. (2000) Puentes de ferrocarril de Alta Velocidad. ROP 3386.
- [5] Gonzalez, P., Cuadrado, M., Nasarre, J., Romo, E. (2002) Alta velocidad. El fenómeno de la interacción vía-tablero en puentes. ROP 3418.
- [6] Cuadrado, M. (2004) Consideración de las deformaciones por retracción y fluencia en el estudio del fenómeno de interacción vía-tablero en el proyecto de puentes ferroviarios. ROP 3446. Agosto.
- [7] Ramondec, P., Martin, D., Schmidt, P. (2008) Track-bridge interaction. The SNCF experience. Ed Rui Calçada.
- [8] Wen Kuei, H., Weng-Heo, S., Yu-Lin, L. (2007) Railway continuous prestressed concrete bridge design in ballasted track turn out zones. Technologies MDPI.
- [9] RDSO. (2014) Guidelines for carrying out rail-structure interaction studies on metro systems. Lucknow.
- [10] TCRP 71 Transportation Research Board. (2012). Track design handbook for light rail transit. Washington: National Academy of science.
- [11] Yun, K.M., Park, B.H., Dee, H.U., Lin, N.H. (2016) Some thoughts on variation of response according to longitudinal track-bridge interaction analysis methods. International Journal of applied engineering research, 11:3689-3695
- [12] Guide specifications for bridges carrying light rail transit loads. AASHTO. 2018.
- [13] Kyoung-Chan, L., Seun Yup, J., Dong Ki, J. (2015) RSI Analysis of sliding slab track on bridge Proceedings of joint rail conference JRC
- [14] Kumar, R., Uphaday, A. (2012) Effect of temperature gradient on track-bridge interaction. Interaction and multiscale mechanics. <https://doi.org/10.12989/imm.2012.5.1.001>
- [15] Alhbock, D.R., Kish, A., Sluz, A. An assessment of design criteria for continuous welded rail on elevated transit structures. Transportation Research Record 1071. TRB Washington D.C.
- [16] Dutoit, D. (2008) New evolution for high speed rail line bridge design criteria and corresponding design procedure. Ed Rui Calçada.
- [17] Mº Fomento (2014) Documentos complementarios no contradictorios para la aplicación de los Eurocódigos para el cálculo de los puentes de ferrocarril.
- [18] Choi, H.S., Lee, K.C., Lee, S.C., Lee, J. (2019) Interaction analysis of sliding slab track on railway bridge considering behavior of end-supporting anchors. International journal of steel structures. 19(6):1939-1950. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00255-x>