

Estudio del aislamiento sísmico y diseño del tablero del Viaducto 4 del Tren Interurbano México-Toluca

Study of the seismic isolation system and design of the deck of the Viaduct 4, belonging to Interurban Railway Mexico-Toluca

Luis Matute Rubio ^a, Daniel Martínez Agromayor ^b, Maria João Dos Santos Freitas ^c
y David Alcañiz Jiménez ^d

^a Máster Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Director General. IDEAM, S.A

^b Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Departamento de Puentes. IDEAM, S.A

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM, S.A

RESUMEN

El Viaducto 4 de la línea de tren interurbano México-Toluca es un viaducto continuo de hormigón postesado, de 1.448 m de longitud total, con una luz tipo de 64 m, cuyo tablero se ejecuta mediante dos autocimbras que avanzan desde ambos estribos. De esta estructura destaca, principalmente, la estrategia antisísmica singular empleada, basada en el empleo de amortiguadores viscosos y neoprenos de recentrado para absorber el sismo longitudinal, habiéndose analizado el comportamiento sísmico mediante análisis paso a paso en el tiempo (time-history).

ABSTRACT

Viaduct 4 of the interurban railway Mexico-Toluca is a continuous bridge with a prestressed concrete girder box deck. Its total length is 1.448 m and it has a typical span of 64 m. Its deck is executed by two movable scaffolding systems (MSS), moving from both abutments of the viaduct. One of the most remarkable aspects of this structure is the antiseismic strategy developed, based on the use of hydraulic dampers combined with elastomeric bearings to absorb the longitudinal forces from the seismic action. The behavior of the bridge in earthquake situation has been analyzed using time-history analysis.

PALABRAS CLAVE: sismo, amortiguadores, recentrado, autocimbra, cajón pretensado.

KEYWORDS: seism, dampers, restoring capability, movable scaffolding system, prestressed box girder.

1. Introducción. Descripción de la estructura

El Viaducto 4 de la línea de tren interurbano México-Toluca es un viaducto continuo con una longitud total de 1.448 m, con la siguiente distribución de luces: 52+21×64+52 (figura 1).

El trazado de la estructura en planta es recto, mientras que en alzado tiene una pendiente longitudinal constante del 1,53%, ascendente desde el estribo 1 hasta el estribo 2.

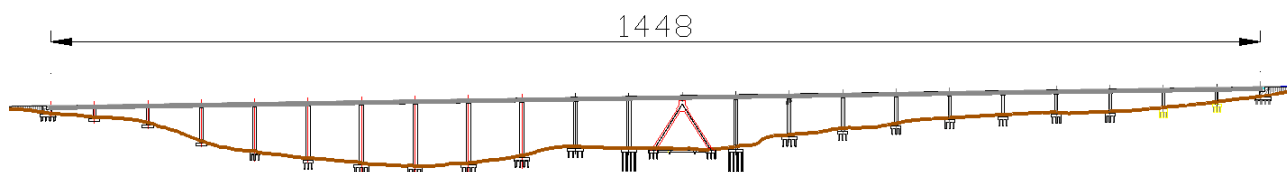


Figura 1. Alzado general del V4

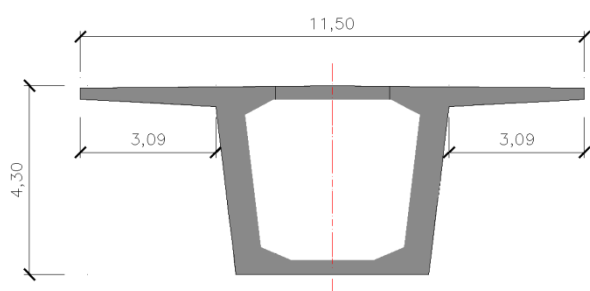


Figura 2. Sección transversal tipo del tablero del V4

El tablero del viaducto es un cajón de hormigón postesado, con un ancho constante de 11,50 m, lo que permite alojar dos vías de tren (vía en placa). El canto del tablero es constante de 4,30 metros, lo que supone una relación canto/luz de 1/14,88 (figura 2). La ejecución del tablero se realiza vano a vano, empleando para ello dos autocimbras, ambas inferiores.

La elevada altura del Viaducto 4 respecto del terreno natural (de más de 70 metros), así como la ejecución con autocimbra del tablero, son los factores que definen la tipología de las pilas del puente. Todas las pilas, salvo la pila 4-13, tienen una sección transversal rectangular hueca, con una dimensión transversal constante

de 6 m. En longitudinal, el canto de las pilas es variable, entre 3,50 y 5,40 m, en función de la altura de la pila.

El apoyo 4-13 del Viaducto es una pila en forma de delta, con dos fustes inclinados 60° respecto de la horizontal, de una altura total de 57 metros. Los dos fustes, de estructura metálica, se ensamblaron en posición horizontal sobre el terreno, siendo, posteriormente, izados sobre el terreno, siendo, posteriormente, izados hasta su posición definitiva. Para ello, se empleó un sistema de gatos ubicados en las cabezas de las pilas adyacentes, junto con los correspondientes cables de tiro y retenida (figura 3).

Los estribos de la estructura tienen una tipología en caja, como es habitual en este tipo de viaductos.

Las cimentaciones del Viaducto 4 son pilotadas, en todos los apoyos, con pilotes de un diámetro de 1,50 metros, en todos los casos (figura 4). En particular, para el caso de la pila 4-13 (figura 5), su cimentación está constituida por dos encepados independientes, uno por fuste, unidos entre sí por medio de unas vigas de atado pretensadas.



Figura 3. Imagen general del Viaducto 4 durante el izado de uno de los fustes del apoyo 4-13

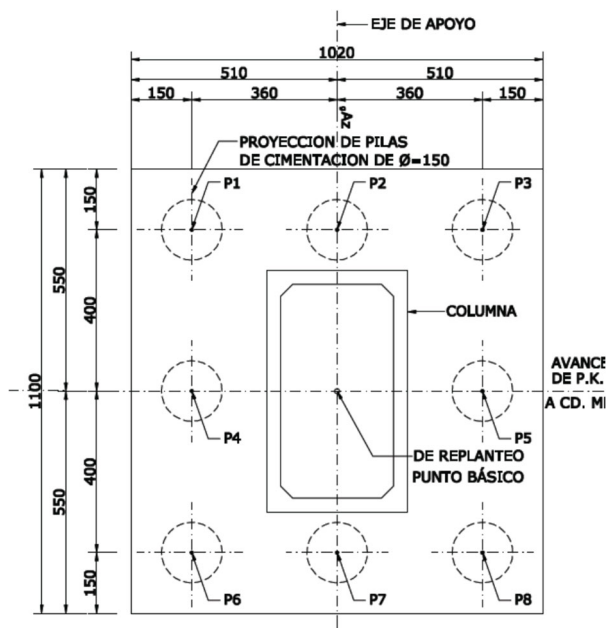


Figura 4. Planta de una cimentación tipo



Figura 5. Imagen general de la ejecución de la cimentación de la pila 4-13

2. Estrategia antisísmica desarrollada. Análisis realizados

Por su ubicación geográfica, en las proximidades del Valle de México, el Viaducto 4 se encuentra sometido a una acción sísmica de una relevancia muy considerable. Este hecho hace que la concepción antisísmica de la estructura sea uno de sus aspectos esenciales.

Para ilustrar la importancia de los esfuerzos sísmicos existentes, se muestra, a continuación, el espectro sísmico (figura 6) considerado en el cálculo del V4. Este espectro sísmico fue facilitado por el II-UNAM (Instituto de Ingeniería de la Universidad

Nacional Autónoma de México), quien ha desarrollado estudios geotécnicos específicos sobre el comportamiento sísmico del terreno en el que se ubica el Viaducto 4.

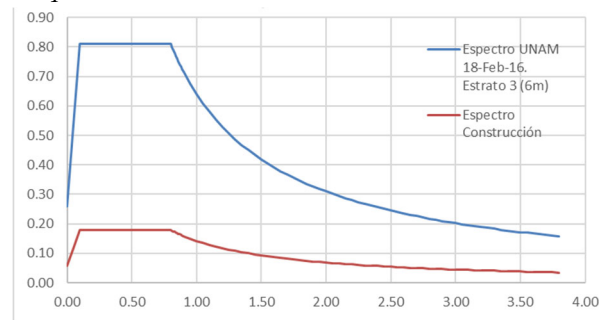


Figura 6. Espectros sísmicos de cálculo y de construcción considerados en el Viaducto 4

Como puede comprobarse, el espectro sísmico tiene una aceleración de meseta muy elevada (0,81g), manteniéndose la meseta hasta periodos de vibración de, aproximadamente, 0,80 s.

La estrategia sísmica adoptada ha sido gracias a la gran experiencia acumulada por Ideam en los proyectos desarrollados hasta la fecha. Entre esa experiencia, en relación a la solución adoptada, destacan el Viaducto del Piedras [1], Viaducto de Archidona [2] y la experiencia adquirida en relación a la estrategia antisísmica de los Viaductos de Alta Velocidad en zona sísmica [3].

2.1 Descripción de la estrategia antisísmica del Viaducto 4

En este apartado se van a comentar los mecanismos resistentes que se han dispuesto para resistir los efectos del sismo longitudinal y transversal. En primer lugar, se comenta que ambos mecanismos resistentes son prácticamente independientes, por lo que se describirán por separado.

2.1.1. Sismo longitudinal

Frente al sismo longitudinal, dada la elevada longitud del viaducto sin juntas intermedias y su masa, se ha optado por un esquema resistente constituido por el empleo de amortiguadores viscosos combinado con un sistema de recentrado. Esta solución se ha implementado

en otras estructuras de la línea como el Viaducto 2 [4]

Los amortiguadores viscosos (figura 7) tienen por finalidad permitir la disipación de la energía del sismo. Se ha optado por amortiguadores con una ley de comportamiento $F = C * V^\alpha$, disponiéndose un total de 6 amortiguadores de 3.000 kN de capacidad máxima en cada uno de los estribos. La ubicación de los amortiguadores solamente en los estribos del viaducto se debe a la mayor facilidad de colocación de los mismos, comparándolo con la problemática de colocar los amortiguadores en cabeza de pila.

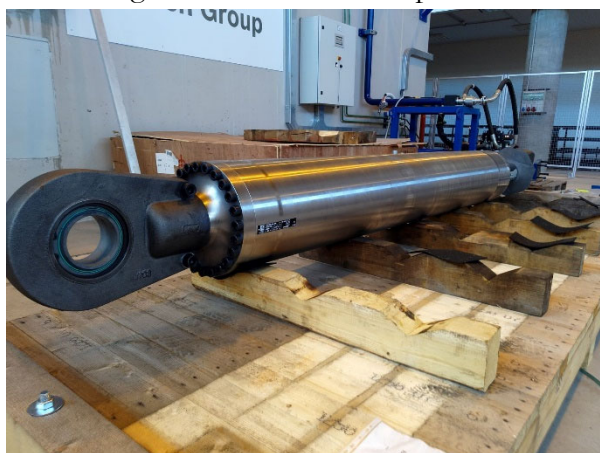


Figura 7. Imagen de uno de los amortiguadores usados en el Viaducto 4

La función de los elementos de recentrado es permitir que el tablero del viaducto no quede, tras el sismo, con unos desplazamientos excesivos respecto de su posición inicial. En el diseño del Viaducto 4 se han considerado dos elementos que permiten desarrollar la función de recentrado.

En primer lugar, se ha considerado el empleo de unos neoprenos zunchados (figura 8), dispuestos en vertical (no recogen fuerzas verticales, solo funciona para recoger fuerzas en longitudinal y transversal) que se encuentran anclados, por un lado, al tablero y, por otro lado, a la cabeza de la pila 4-13, la cual, por su forma en delta, tiene una mayor capacidad para absorber los esfuerzos longitudinales que transmiten los neoprenos de recentrado. Se han dispuesto un total de 6 neoprenos (3 por lado)

de dimensiones 1200×1200 y 180 mm de espesor de goma.

En segundo lugar, para el caso de las pilas centrales de la estructura (apoyos 4-5 a 4-15, exceptuando la pila en delta 4-13), cuya altura, en todos los casos, se encuentra entre 50 y 70 metros, se ha optado por disponer unos aparatos de apoyo fijos en dirección longitudinal, lo que ha permitido considerar la rigidez de las citadas pilas para el sistema de recentrado de la estructura.

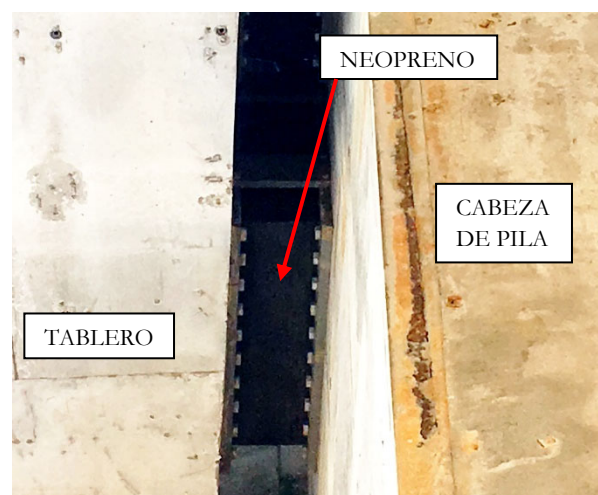


Figura 8. Neopreno de recentrado semejante al dispuesto en el V4

Disponiendo aparatos de apoyo fijos tipo Esféricos en longitudinal, se ha conseguido además eliminar los movimientos relativos entre tablero y pila, que, en estos casos, eran de una magnitud muy elevada, debido, principalmente, a la propia vibración de las pilas.

En todas las demás pilas del viaducto, los apoyos dispuestos tipo Esféricos deslizantes en longitudinal, quedando, por ello, dichas pilas aisladas longitudinalmente del sismo del tablero.

Cabe destacar que los amortiguadores solo son capaces de absorber los esfuerzos longitudinales provenientes de esfuerzos que ocurren rápidamente en el tiempo (sismo y frenado). Por ello, para los demás esfuerzos longitudinales (reológicos y térmicos), el esquema resistente dispuesto consiste únicamente en los elementos de recentrado.

Todo lo que se ha comentado hasta ahora se refiere al esquema resistente para la situación

definitiva de la estructura. En fase constructiva, por la dificultad de disponer a tiempo en obra de los amortiguadores necesarios, así como por la necesidad de disponer un punto fijo provisional en los estribos hasta que, al menos, se alcance la primera pila fija en longitudinal (se recuerda que los amortiguadores no trabajan ante acciones reológicas o térmicas, por lo que solo con ellos el tablero no tendría fijación longitudinal), se ha optado por disponer un punto fijo provisional en los estribos. Dicho punto fijo provisional se ha materializado mediante perfiles metálicos que unen el tablero con los estribos, los cuales, además, han sido diseñados para resistir la totalidad de los esfuerzos longitudinales del tablero en construcción. Gracias a ello, se puede retrasar la disposición de los puntos fijos definitivos (pilas fijas, neoprenos de recentrado y amortiguadores) hasta concluir la ejecución del tablero, con lo que se reducen los esfuerzos debidos a los movimientos reológicos del tablero que deben soportar las pilas, pues una parte importante ya se habrá producido, debido a la presencia de más de un punto fijo longitudinal.

2.1.2. Sismo transversal

En sentido transversal, los esfuerzos sísmicos se resisten pila a pila, permitiendo, llegado el caso, la formación de rótulas plásticas en la base de los fustes.

De las diferentes opciones para garantizar la transmisión de los esfuerzos sísmicos del tablero a las pilas, se ha optado por la ejecución de unos topes transversales (figura 9) a modo de orejetas laterales. De esta manera, al disponerse el tope por encima de los aparatos de apoyo verticales se reduce la posibilidad de vuelco del tablero, como podría ocurrir en otras alternativas de ejecución basadas en elementos bajo el tablero como son, por ejemplo, los tetones inferiores.

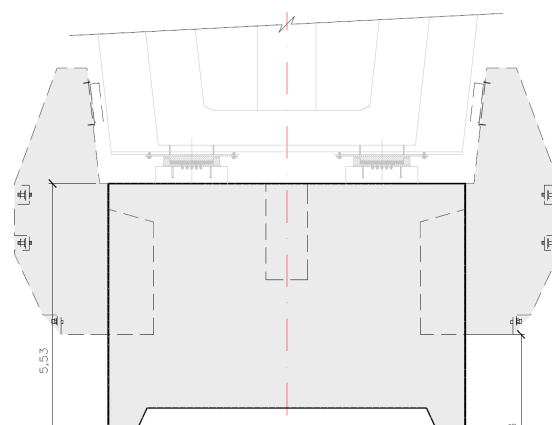


Figura 9. Topes transversales en pilas del V4

Los topes transversales se ejecutan en segunda fase, una vez que se ha concluido la ejecución con autocimbra del tablero en el vano correspondiente, evitando así las interferencias entre tope y autocimbra. La conexión de los topes transversales con el cabecero ya ejecutado se realiza mediante barras de pretensado.

En fase constructiva, al igual que ocurría con el sismo longitudinal, se requiere de un esquema resistente provisional, necesario hasta que se ejecuten los topes transversales. En este caso, el esquema resistente se ha basado en la utilización de las guías de los aparatos de apoyo Esféricos del viaducto, las cuales se han diseñado para resistir los esfuerzos transversales de construcción y de servicio. En cambio, para esfuerzos mayores (sismo de diseño), las guías disponen de un sistema fusible y fácilmente reemplazable que rompe, permitiendo que los topes transversales entren en funcionamiento.

2.2 Estudio realizado del comportamiento sísmico del Viaducto 4

Como se ha comentado hasta ahora la estrategia antisísmica en sentido longitudinal incluye el empleo de amortiguadores viscosos de carácter no lineal, por lo que el análisis detallado de su comportamiento requiere el empleo de análisis en el dominio del tiempo (análisis time-history). En cambio, en sentido transversal, al no haberse dispuesto ningún elemento que tenga un comportamiento no lineal, el análisis realizado se ha basado en modelos lineales más convencionales.

La realización de los análisis en el dominio del tiempo requiere disponer de acelerogramas con los que analizar los desplazamientos de la estructura. En el caso del Viaducto 4, se ha partido de una serie de acelerogramas aportados por el II-UNAM (figura 10), a partir de mediciones de sismógrafos en terrenos de características semejantes a las del Viaducto 4. Adicionalmente, con la finalidad de tener un número más representativo de resultados de la respuesta de la estructura frente al sismo, se han generado una serie de acelerogramas sintéticos (figura 11), en base al espectro de diseño. La metodología seguida para la obtención de los acelerogramas sintéticos es la propuesta en [5].

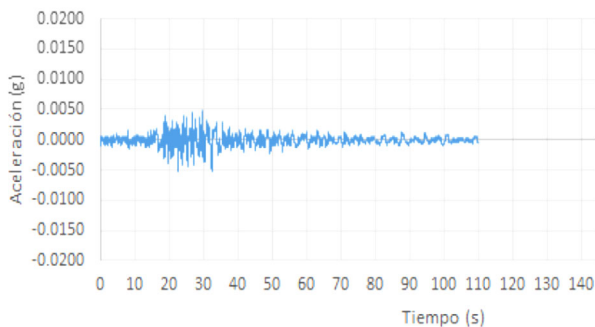


Figura 10. Acelerograma obtenido a partir del sismo registrado el 9 de agosto de 2000 en la estación UI21

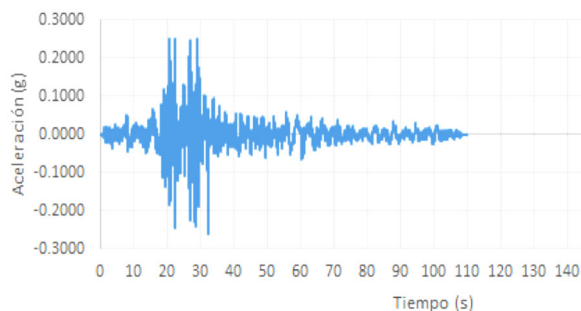


Figura 11. Acelerograma sintético generado a partir del espectro de diseño.

Tomando como partida los acelerogramas anteriores, se ha modelizado la estructura (figura 12), en su totalidad, tanto pilas como tablero, así como las diferentes vinculaciones existentes: amortiguadores, neoprenos de recentrado y apoyos fijos.

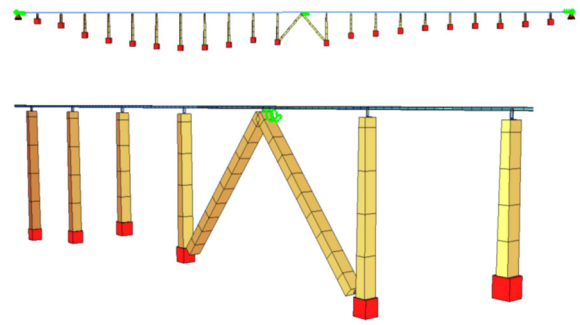


Figura 12. Imagen general y de detalle del modelo realizado.

Adicionalmente, tal y como se indica en la normativa de referencia [6], se han realizado diferentes hipótesis de fisuración de las columnas, de rigidez de los neoprenos y de fuerza máxima desarrollada en los amortiguadores, con la finalidad de obtener las situaciones pésimas de diseño a nivel de fuerzas y desplazamientos del tablero. De esta manera, analizando la respuesta de la estructura ante los diferentes acelerogramas y condiciones de rigidez, se obtienen los desplazamientos máximos esperables (figura 13) y, junto a ellos, los esfuerzos máximos en los elementos de recentrado (fuerza en neoprenos y esfuerzos longitudinales en pilas fijas).

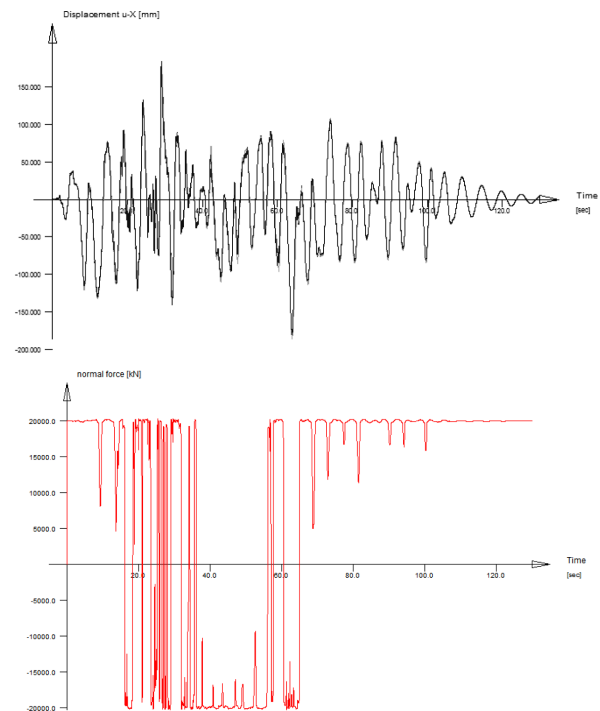


Figura 13. Resultado de desplazamientos y fuerza en amortiguador para un acelerograma particular

3. Adaptación del Viaducto 4 al cambio de secuencia de ejecución

Inicialmente, la ejecución del tablero del Viaducto 4 estaba prevista mediante el empleo de una única autocimbra, que partiendo del estribo 2 de la estructura, avanzaba vano a vano en sentido decreciente de P.K. Durante la ejecución de las obras y, una vez iniciado el tablero, se optó por emplear una segunda autocimbra, que ejecutase el tablero desde el estribo 1 en sentido creciente de P.K.

3.1 Adaptación en la subestructura del Viaducto 4

Las dos autocimbras empleadas en la construcción del tablero son inferiores (figura 14). Como es habitual en este tipo de autocimbras, durante la ejecución de cada vano, tienen dos apoyos: un apoyo delantero en pila, materializado mediante un hueco (ventana) en el fuste, y un apoyo trasero en el voladizo del último vano ejecutado. Tras el cambio del proceso constructivo, como ambas cimbras podían apoyarse sobre la misma pila, dichos detalles de apoyo previstos en las pilas tuvieron que ser adaptados.



Figura 14. Imagen de la primera autocimbra durante la ejecución del tablero.

Esta adaptación afectó solamente a las pilas en las que se podía apoyar la segunda autocimbra (pilas próximas al estribo 1). La actuación se diseñó de dos maneras diferentes. Para las pilas más bajas, se dispusieron unos fustes provisionales (figura 15) a ambos lados del fuste definitivo que permitiesen el apoyo de

la autocimbra y que, una vez hubiese pasado la misma, se demolerían.



Figura 15. Imagen del lanzamiento de la segunda autocimbra, apoyada en los fustes provisionales.

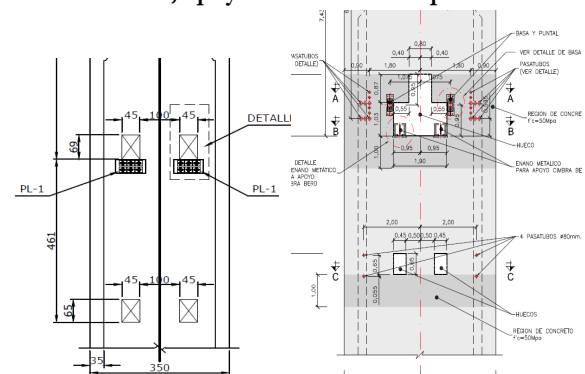


Figura 16. Diseño original y adaptado al paso de dos autocimbras de las ventanas en pilas.

Por otro lado, para las pilas de mayor altura, esta solución no resultaba viable, motivo por el que se optó por realizar una adaptación en la geometría de las ventanas (figura 16) proyectadas para la primera autocimbra, de manera que se permitiese el apoyo de las ménsulas de apoyo de ambas autocimbras.

3.2 Adaptación del tablero del Viaducto 4

Igualmente, el cambio de secuencia constructiva implicó una serie de modificaciones sobre el diseño del tablero de la estructura. En este caso, la finalidad principal de las adaptaciones realizadas fue no afectar, en la medida de lo

posible, al tramo del tablero que se estaba ejecutando con la primera autocimbra, para evitar cambios en el diseño de ese tablero que pudiesen afectar al avance de las obras.

Este motivo, unido a consideraciones estéticas, hizo que se decidiese mantener la geometría externa del tablero, de manera que se garantizase una continuidad formal en la estructura. Respecto de la geometría interior del tablero, sí que se realizaron ciertas adaptaciones de la geometría definida en el proyecto original (esencialmente en el acartelamiento entre alma y losa superior), motivadas, principalmente, por la necesidad de adaptarse al sistema de encofrados de la nueva autocimbra y por las diferencias en la secuencia de ejecución de la sección transversal. Con la segunda autocimbra, la parte central de la losa superior se ejecuta en 2º fase, una vez concluido el hormigonado del vano y desplazada la autocimbra al vano siguiente. En cambio, la primera autocimbra permite ejecutar en una fase la totalidad de la sección transversal del tablero.

En cualquier caso, la geometría de los tramos de tablero (figura 17) ejecutados con las dos autocimbras es muy semejante, pues ambos tienen el mismo canto (4,30 m constante en todo el tablero, salvo el recrecido en pilas), misma anchura del cajón (4,40 m, salvo, nuevamente, en la zona de recrecido en pilas) e, incluso mismos espesores tipo de almas o losa inferior.

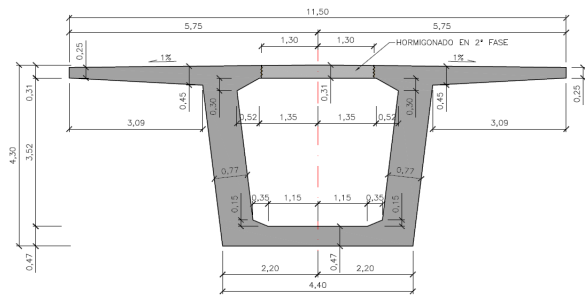
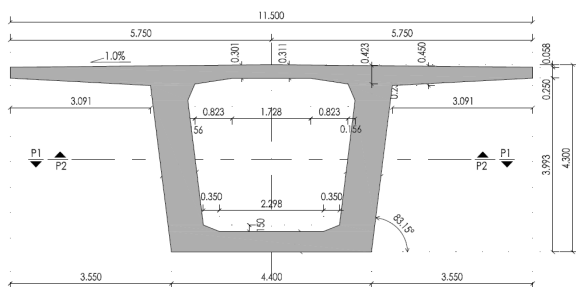


Figura 17. Sección tipo de los dos tramos de tablero

El diseño del pretensado del tramo de tablero ejecutado por la segunda autocimbra es bastante convencional para este tipo de estructuras. Para cada fase de ejecución (vano más un voladizo de 13,5 m), el pretensado está formado por 3 familias: una familia de cables parabólicos; una familia de cables de refuerzo para la flexión negativa en pilas y, en ciertas fases unos cables de refuerzo en losa inferior. La continuidad del pretensado se ha planteado mediante acopladores en frente de fase. La única excepción a este esquema es la fase de cierre en la que se requiere un solape mediante cruce de cables.

4. Trabajos de asistencia técnica especializada durante la ejecución de las obras

En este apartado, se van a comentar los principales trabajos de asistencia técnica y apoyo a la ejecución de las obras realizados por IDEAM, centrándonos solamente en aquellos relacionados con el Viaducto 4, si bien dichos trabajos afectan a un mayor número de estructuras del tren interurbano México-Toluca. Dentro de estos trabajos se destacan especialmente, el apoyo proporcionado durante la ejecución de la delta metálica en el apoyo 4-13 y el chequeo independiente realizado de la segunda autocimbra empleada en la ejecución del tablero, llevando a cabo tanto una revisión documental como un chequeo estructural de contraste de los elementos principales.



Figura 18. Vista de detalle de la rótula de giro.



Figura 19. Vista general de la pila 4-13 tras el izado de ambos fustes.

Respecto de la delta metálica, se quieren destacar los estudios realizados para facilitar el encofrado (figura 19) y hormigonado de la cabeza de la pila, así como el apoyo realizado durante la ejecución de la rótula de giro (figura 18) y su conexión con la cimentación, y, en general, el resto de fases previas al izado de los fustes.

5. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad: Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México (SCT).

Empresa Constructora: Consorcio formado por Constructora de Proyectos Viales de México (Grupo OHL) y La Peninsular

Gerente de obra: Marcos Montané (OHL) -Gilberto Rangel (La Peninsular).

Jefe de oficina técnica: Luis Angel Martínez (OHL) -Eduardo Hjort (La Peninsular).

Proyecto Constructivo: Consorcio Ayesa-Streng: José Vicente Vicens, Bernardo Lima.

Análisis sísmico y Proyecto Constructivo modificado: IDEAM S.A: Luis Matute, Daniel Martínez, Maria João Freitas, David Alcañiz.

Asistencia Técnica especializada a la Propiedad: SENER: Jordi Redó, Jordi Revoltós, José María Perez Casas, Francisco José Fernandez Corzo.

Asistencia Técnica a la Constructora: IDEAM S.A. Luis Matute, Jesús Martín, David Alcañiz, Carlos Blanco.

Referencias

- [1] F. Millanes, J. Pascual – Viaducto Mixto sobre el Arroyo de las Piedras en las L.A.V. Córdoba- Málaga. III Congreso de ACHE en Zaragoza. 2005
- [2] F. Millanes, D. Martínez, Jorge Nebreda, Juan Miguel Cereceda. Experiencia Adquirida en el Diseño, Construcción y Control de Ejecución de Viaductos de Alta Velocidad en Zonas Sísmicas. V Congreso de ACHE en Barcelona. 2015
- [3] F. Millanes, E. Bordó, Jesús Martín- Aspectos Específicos del Diseño Antiísmico del Viaducto Mixto de Alta Velocidad de Archidona. V Congreso de ACHE en Barcelona. 2015
- [4] F. Millanes, L. Matute, J. Martín, P. Solera, C. Gordo, D. Alcañiz, J.M. Montero. Diseño del Viaducto 2 de la línea de tren interurbano México-Toluca. VII Congreso de ACHE. A Coruña 2017.
- [5] D. Gasparini, E. Vanmarcke, Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra, MIT, EE.UU., 1976.
- [6] AASHTO - Guide Specifications for Seismic Isolation Design, Washington DC (EE.UU.), 2010.