

Diseño del Viaducto 2 de la línea de tren interurbano México-Toluca

Design of the Viaduct 2 in the railway Mexico-Toluca

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

Jesús MARTÍN SUAREZ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Director de Asistencias Técnicas

jesus.martin@ideam.es

Carlos GORDO MONSÓ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyecto

carlos.gordo@ideam.es

Jorge Miguel MONTERO BORJA

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Ingeniero proyectista

jorgemiguel.montero@ideam.es

Luis MATUTE RUBIO

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Director General

luis.matute@ideam.es

Pablo SOLERA PÉREZ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyecto

pablo.solera@ideam.es

David ALCAÑIZ JIMÉNEZ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Ingeniero proyectista

david.alcaniz@ideam.es

RESUMEN

El Viaducto 2 de la línea de tren interurbano México-Toluca es una estructura de 3.865,40 metros de longitud, dividido en cinco tramos continuos de longitudes respectivas comprendidas entre los 690 y los 850 metros. Se trata de un viaducto conformado con un tablero de sección cajón de hormigón pretensado y luz tipo de 55 m, cuya construcción se realizará con autocimbra. Del diseño del mismo destacan fundamentalmente la estrategia sismorresistente basada en el uso de dispositivos antisísmicos, y la influencia que esta tiene en el diseño del proceso constructivo, así como los exigentes plazos de ejecución.

ABSTRACT

The Viaduct 2 of the railway México-Toluca is a structure 3865 meters long, divided in 5 continuous stretches whose lengths range between 690 and 850 meters. The deck of the viaduct is a prestressed concrete box girder, with a typical span 55 m long, and built with a mobile scaffolding system. The most salient aspects of the viaduct design are the earthquake-resistant strategy, which relies on the use of anti-seismic devices, and how this influences the erection process, and the stringent construction schedule.

PALABRAS CLAVE: Autocimbra, amortiguadores, sismo, puntos fijos, cajón pretensado,

KEYWORDS: Mobile scaffolding system, dampers, seism, fixed points, prestressed box girder.

1. Introducción. Condicionantes de trazado

El Viaducto 2 es, por su magnitud y condicionantes constructivos y de diseño, una de las principales actuaciones dentro de la construcción de la línea de tren interurbano México-Toluca, proyecto fundamental para fomentar la movilidad en la región y descongestionar la autopista ya existente que conecta ambas ciudades.

La estructura tiene una longitud total de 3.865,40 metros, dividido en cinco tramos continuos, separados por juntas, con longitudes respectivas entre 690 m y 850 m, aproximadamente. Previamente al diseño final con una solución de tablero en sección cajón de hormigón pretensado ejecutado con autocimbra, se estudiaron otros diseños finalmente descartados como la solución de viaducto de vigas prefabricadas, o una solución en tablero cajón mixto hormigón-acero.

El Viaducto 2, debido a su gran longitud, afecta numerosos servicios adyacentes al trazado, como son la autopista México-Toluca ya que ambas vías discurren aproximadamente paralelas, gasoductos, líneas de alta tensión, o vías de ferrocarril. A la hora de determinar la ubicación de las pilas de la estructura se ha procurado reducir al mínimo las afecciones a los citados servicios, mientras que a la vez se ha intentado mantener la máxima regularidad posible en el reparto de luces.

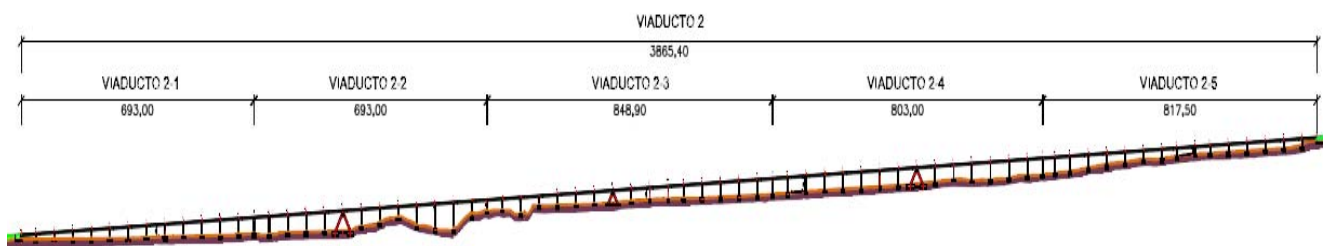


Figura 1. Alzado longitudinal del Viaducto 2.

2. Proceso constructivo e influencia en el diseño

La construcción del tablero se realiza mediante cimbra autolanzable, lo cual convierte al Viaducto 2 en el primer puente de México construido mediante este procedimiento. La ejecución del tablero mediante autocimbra permite independizar la ejecución del tablero del terreno, lo que resulta idóneo para este viaducto, ya que se trata de una zona de difícil acceso, con tramos muy abruptos, numerosos servicios afectados, y con una altura de rasante sobre el terreno del orden de los 40 m.

Con objeto de minimizar el número de pilas, pero permitir el empleo de las autocimbras más usuales del mercado, se dispuso una luz máxima de 55 m, en el rango de luces habitual en este tipo de puentes. El viaducto proyectado presenta 5 subviaductos donde la mayoría de los vanos son de 55 m, a excepción de ciertos pasos especiales, y de los vanos extremos que son de 44m.

Dada la gran longitud del viaducto, para disminuir el plazo de construcción, se emplean 3 autocimbras que parten, respectivamente, del estribo 1, del estribo 2, y de un punto intermedio ubicado en la pila 26 que sirve de junta entre tramos de tablero. Estos puntos de arranque han tenido que diseñarse específicamente para que actuaran como puntos fijos del tablero en fase constructiva, anclando el tablero a los mismos hasta que se materialicen los puntos fijos definitivos del tablero. Aunque en fase definitiva cada tramo del viaducto esté constituido por un tablero

independiente, en fase constructiva los tableros ejecutados con una misma autocimbra se unen provisionalmente entre sí.

Para la construcción del Viaducto 2 se emplean autocimbras superiores e inferiores. Las autocimbras inferiores condicionan la geometría de las columnas, pues se apoyará sobre las mismas, debiendo tener todas un ancho exterior constante (5,20 metros) para permitir el apoyo y el paso de la cimbra. Asimismo, para permitir el apoyo de la autocimbra en las pilas, se han dispuesto unas ventanas en la parte superior del fuste.

3. Concepción sismorresistente del viaducto

El viaducto 2 está situado en una zona de sismicidad muy elevada, lo que hace que la concepción sismorresistente del viaducto sea uno de los aspectos más relevantes del diseño.

El espectro sísmico de diseño se determinó a partir de estudios realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en colaboración con IDEAM. Dada la gran importancia de la estructura, se ha considerado un periodo de retorno para la determinación del espectro de diseño de 1475 años. El espectro de diseño tiene una aceleración de meseta de aceleración constante muy elevada (0.77g) y, abarca un rango de periodos de oscilación que alcanza $T=1s$. Para definir la acción sísmica en fase constructiva se ha considerado en base a lo establecido en la normativa mexicana un espectro sísmico con un periodo de retorno de 9 años.

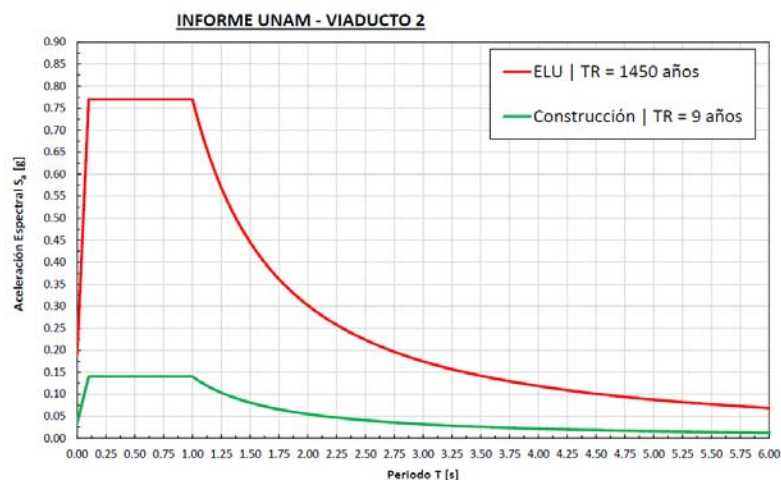


Figura 2. Espectros de diseño empleados en el Viaducto 2.

3.1. Estrategia frente al sismo longitudinal

A efectos de la acción en dirección longitudinal del sismo cada uno de los cinco tramos continuos en los que se divide el viaducto 2 se comporta como un elemento independiente. Como es propio de esta tipología de viaducto de ferrocarril, la mayor parte de las pilas se aísla de los movimientos del tablero mediante aparatos de apoyo deslizantes, y se requiere al menos un punto de retenida por tramo en el que se resistan las fuerzas de frenado, reológicas, etc. En el Viaducto 2, dichos puntos fijos se han diseñado de manera que recojan además la totalidad de las fuerzas longitudinales debidas a la acción del sismo.

Para los tramos de viaducto extremos (de aquí en adelante designados como V2-1 y V2-5), los puntos fijos se han situado en los estribos, mientras que en los tramos intermedios (tramos V2-2, V2-3 y V2-4) se han ubicado en unas pilas en forma de *delta*, correspondientes a los apoyos PA-18, PA-33 y PA-50. Estas pilas en *delta* se han ubicado de manera que estuviesen lo más

centradas posible en cada uno de los tramos, en función de las características de la topografía y de los posibles servicios afectados, a fin de disminuir los movimientos térmicos e higrométricos en las juntas entre tableros, permitiendo con ello utilizar unas juntas de dilatación y aparatos de vía convencionales.

Con objeto de limitar la fuerza debida a la acción sísmica transmitida a la subestructura, y para limitar los desplazamientos correspondientes, se ha provisto a cada punto de retenida amortiguadores hidráulicos no lineales (Figura 3a), capaces de proporcionar una fuerza de retenida prácticamente constante en un rango de movimientos del orden de $\pm 500\text{mm}$. Con el propósito de limitar los desplazamientos longitudinales residuales del tablero tras la ocurrencia del sismo, así como para limitar la incertidumbre en la respuesta sísmica en términos de desplazamientos, este sistema se complementa con unos apoyos elastoméricos de recentrado (Figura 3b) que, se colocan también en los puntos de retenida y que, sin estar solicitados por el peso vertical de la estructura, se anclan tanto al tablero como a la pila en una pareja de topes transversales.



Figura 3a, 3b. Amortiguadores del Viaducto 2. Aparatos de apoyo de recentrado del Viaducto 2

El número y la capacidad amortiguadores viscosos empleados dependen de las longitudes respectivas de cada uno de los tramos de viaducto, y el número y rigidez de los aparatos de apoyo elastoméricos de recentrado, tanto de la longitud del tramo como de la ubicación relativa del punto de retenida con respecto al tablero (en un extremo, o sensiblemente centrado).

Tramo	Longitud tramo [m]	Punto fijo	Nº de amortiguadores	Capacidad amortiguador [kN]	Nº de neopreno	Dimensiones neopreno (anchoxlargo \times e _{neop})
2.1	693	E-1	8	3000	6	1100x1100x260
2.2	693	PA-18	8	3000	6	1100x1100x200
2.3	849	PA-33	12	2500	6	1100x1100x200
2.4	803	PA-50	12	2500	6	1100x1100x200
2.5	818	E-2	12	2500	8	1150x1150x300

Tabla 1. Definición amortiguadores sísmicos y neoprenos de recentrado del Viaducto 2.

El sistema sismorresistente descrito es el empleado para resistir el sismo longitudinal en fase definitiva. No obstante, dados los exigentes plazos de ejecución existentes en la construcción de la estructura, y la imposibilidad de disponer de los amortiguadores desde el inicio de la obra, el sismo longitudinal de fase constructiva se resiste exclusivamente mediante los neoprenos de recentrado.

Como se ha indicado en el apartado anterior, el esquema resistente en fase constructiva debe complementarse con una serie de retenidas provisionales del tablero. Para los tramos de tablero con autocimbras que arrancan desde los estribos, debido a las interferencias entre la propia autocimbra y los topes laterales en los que se situarán los neoprenos de recentrado (Figura 5), éstos últimos no pueden estar presentes desde el comienzo de la construcción del tablero, siendo necesario establecer una fijación provisional hasta que la autocimbra avance lo suficiente como para poder ejecutar los topes y colocar y anclar los neoprenos de recentrado.

No obstante, la fijación provisional de mayor entidad en la estructura se sitúa en la pila de arranque de la autocimbra intermedia. En este caso, dada la mayor longitud que se debe construir hasta que el tablero alcance el punto de retenida definitivo situado en la pila *delta* más próxima, la fuerza del sismo longitudinal es demasiado alta como para que la pila de arranque la resista como pila exenta. Por este motivo, se han dispuesto unos tirantes provisionales que anclan la pila de arranque a las cimentaciones de las pilas adyacentes (Figura 4).

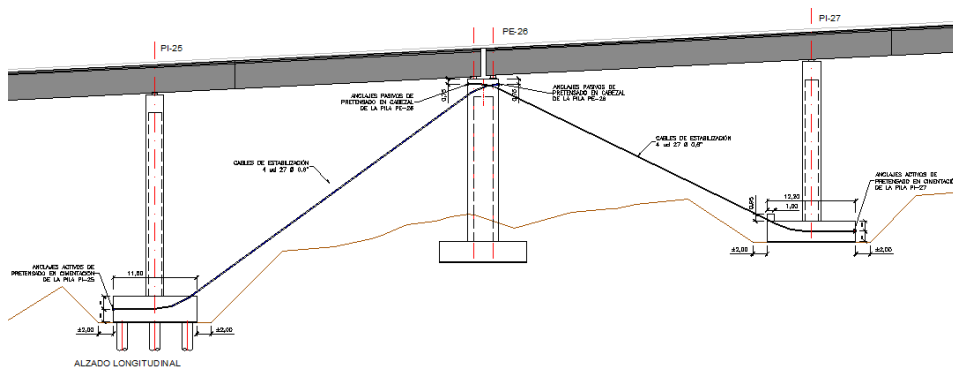


Figura 4. Alzado del atirantamiento provisional en PE-26

3.2. Estrategia frente a sismo transversal

Los esfuerzos del sismo transversal son resistidos por todos los apoyos del viaducto. A tal efecto, se han dispuesto en todas las pilas de la estructura unos topes transversales (elementos laterales fijos al fuste de las pilas) que recogen la fuerza sísmica. Con el fin de agilizar la construcción del viaducto y de dejar paso para la autocimbra, el tope transversal se ha diseñado en forma de unas orejetas a ambos lados de cada pila que se ejecutarán en segunda fase tras la construcción del tablero mediante la autocimbra. Otras opciones para la materialización del tope transversal como son la ejecución de un tetón central, supondrían una ejecución más difícil y lenta del tablero, no pudiéndose garantizar los ritmos de ejecución necesarios.

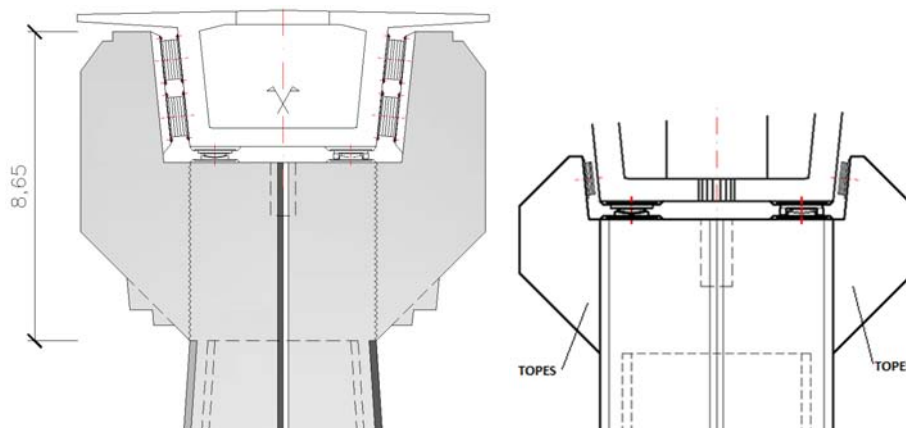


Figura 5a, 5b. Tope transversal en pila delta. Topes transversales en pilas tipo.

Puesto que los topes transversales se construyen en segunda fase, se necesita definir un sistema provisional para resistir el sismo transversal durante la construcción. Se ha previsto que el sismo de construcción se resista mediante las guideras de los aparatos de apoyo deslizantes en longitudinal y fijos en transversal. Este sistema de guidera se ha previsto fusible, de tal manera que cuando se rebase la fuerza umbral, toda la carga se transfiera a los topes de hormigón.

4. Descripción de la estructura

4.1. Tablero

Como se ha indicado anteriormente, el tablero del Viaducto 2 tiene una sección transversal en forma de cajón de hormigón pretensado. La concepción del mismo, al igual que ocurre con los demás elementos del viaducto, está determinada por la necesidad de una rápida ejecución. Cabe destacar que el plazo previsto para la ejecución de un vano tipo es de 1 semana, plazo que ya resulta exigente en un país con tradición en el empleo de cimbras autolanzables para la construcción de viaductos de ferrocarril, como es España, mucho más en el caso de México, donde este método constructivo resulta novedoso. Este hecho ha obligado a cuidar al máximo el diseño del tablero, orientando todos los elementos a facilitar su ejecución.

Como es habitual en un proceso constructivo mediante autocimbra se parte del vano extremo (44 m de luz en este caso), lo que permite que se ejecute una fase formada por el vano completo más una quinta parte del vano siguiente, ejecutándose en total 55 m. En las siguientes fases de ejecución se construye la parte restante de cada vano más la quinta parte del siguiente, estableciendo en todos los casos la junta en zona de momentos nulos y consiguiendo que todas las fases de ejecución sean de una longitud de 55 m.

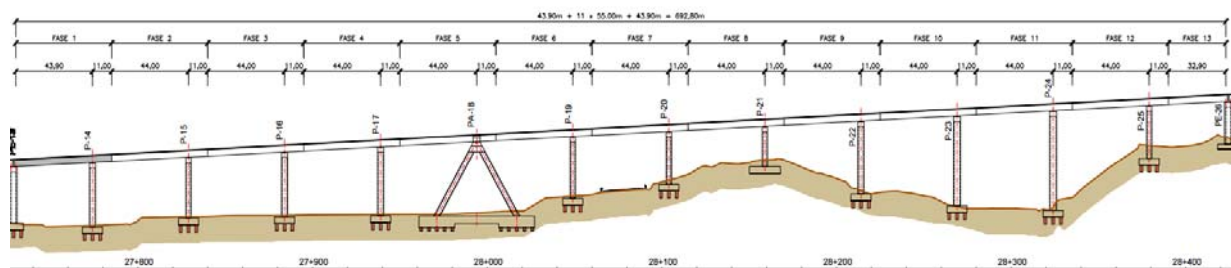


Figura 6. Alzado longitudinal tramo 2-2, con indicación de fases de ejecución del tablero

El tablero tiene un canto constante a lo largo de toda la estructura de 3,80 metros, lo que supone una relación canto/luz de 1/14,5. La anchura total es de 11,50 metros, con dos vías de ferrocarril. La parte inferior del cajón tiene una anchura de 5,20 metros y las almas presentan una ligera inclinación a fin de disminuir la longitud del voladizo, dejándola en 2,80 metros. El canto del voladizo en su extremo es de 0,20 metros, aumentado hasta el empotre con el cajón donde el canto es de 0,42 metros. El espesor de las almas es de 0,50 metros, excepto en la zona próxima a la pila, en la que se aumenta el espesor del alma hasta los 0,60 metros.

La construcción de la sección transversal del tablero se realiza en dos fases. En la primera se ejecutan la "U" constituida por losa inferior y almas más los voladizos y una parte de la losa superior, de manera que se deja solamente sin hormigonar la parte estrictamente necesaria de la losa superior que permita la retirada de los encofrados interiores. Tras el hormigonado de esta primera fase, se procede al tesado de todos los cables de pretensado, después de lo cual se

puede desplazar la autocimbra y ejecutar los siguientes vanos del tablero. La parte central de la losa superior se ejecuta en una segunda fase.



Figura 7. Secciones transversales del tablero a lo largo del Viaducto

4.2. Subestructura

4.2.1. Aparatos de apoyo

Los aparatos de apoyo del Viaducto 2 son esféricos. Todos los aparatos son libres en sentido longitudinal, mientras que en sentido transversal uno de los aparatos de apoyo existentes en cada pila es libre y el otro es fijo. El apoyo fijo es el encargado de resistir los esfuerzos transversales de viento, tráfico y sismo de construcción y de servicio, pero para esfuerzos superiores (sismo último), dispone de un sistema fusible que permite que sea el tope transversal quien los resista, evitando con ello el posible levantamiento del tablero.

Todos los apoyos se disponen como suele ser habitual, con la bandeja de acero inoxidable sobre la lámina deslizante y nivelada en horizontal. Las únicas excepciones son los aparatos de apoyo situados en los estribos del viaducto y las pilas de junta entre tablero (pilas-estribo), donde la bandeja de acero se dispone según la inclinación del tablero, a fin de que los movimientos longitudinales del tablero no produzcan problemas en las juntas.

4.2.2. Pilas tipo

Las pilas tipo del Viaducto 2 presentan una sección rectangular hueca, con unas dimensiones exteriores de 5,20m x 3,00m y tablas entre 0,35m y 0,70m. Debido a la gran longitud del viaducto y su orografía variable, las pilas presentan una altura variable entre los 10m y los 50m. Se precisa que, para controlar los efectos de segundo orden, en las pilas más altas se requirió aumentar el canto longitudinal de las pilas hasta 4,00m. También se ha variado el canto de las pilas en las pilas-estribo (aquellas situadas en juntas entre distintos tramos de tablero) cuyo canto es de 4,20m, permitiendo así alojar los aparatos de apoyo de ambos tableros y sus respectivas entregas, dejando una junta suficiente para evitar que los tableros topen en situación sísmica. A lo largo del viaducto se alternan cimentaciones superficiales y profundas.



Figura 8. Ejecución de una cimentación del Viaducto 2

Las pilas vienen condicionadas por la hipótesis sísmica, siendo la mayoría de las mismas diseñadas mediante cálculo por capacidad. Todas las pilas reciben el sismo transversal de los topes transversales u “orejeta” que se disponen a ambos lados del fuste. Dichos topes solo se pueden ejecutar en segunda fase tras el paso de la cimbra, lo que unido a la gran fuerza que resisten, ha hecho que se haya diseñado una conexión mediante barras de pretensado que permite la prefabricación de estos elementos y su montaje en segunda fase.

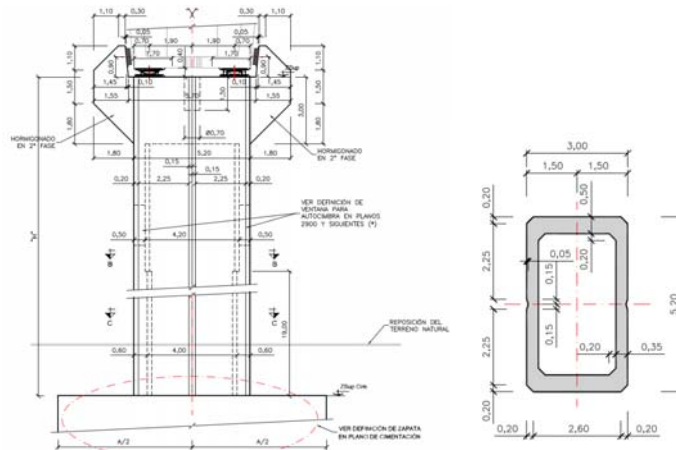


Figura 9a y 9b. Alzado y sección de pila tipo.

4.2.3. Pilas delta

Las pilas en *delta* son los apoyos que materializan los puntos de retenida longitudinal en los tres tableros intermedios del viaducto. Como es habitual en viaductos de ferrocarril, la importancia de las fuerzas longitudinales hace que no se puedan resistir las mismas mediante un único fuste, requiriéndose dos pilas inclinadas en forma de “V” invertida o *delta*, las cuales resistirán las acciones longitudinales del tablero.

En el diseño de sus cimentaciones se ha proyectado una cimentación para cada fuste que se conectan mediante una riostra eliminando los empujes horizontales al terreno para fuerzas verticales. Cada una de las *deltas* presenta 2x25 pilotes de 1,5m de diámetro.

Los fustes presentan una inclinación de 60° con la horizontal, y un ancho variable entre 5,20 m en la parte superior que aumenta con un talud de 1H:15V hasta la base. Para la ejecución de las mismas se ha planteado el empleo de una cimbra cuajada o el empleo de puntales, siendo viables ambas estructuralmente. La altura de la mayor *delta* es de 40m.

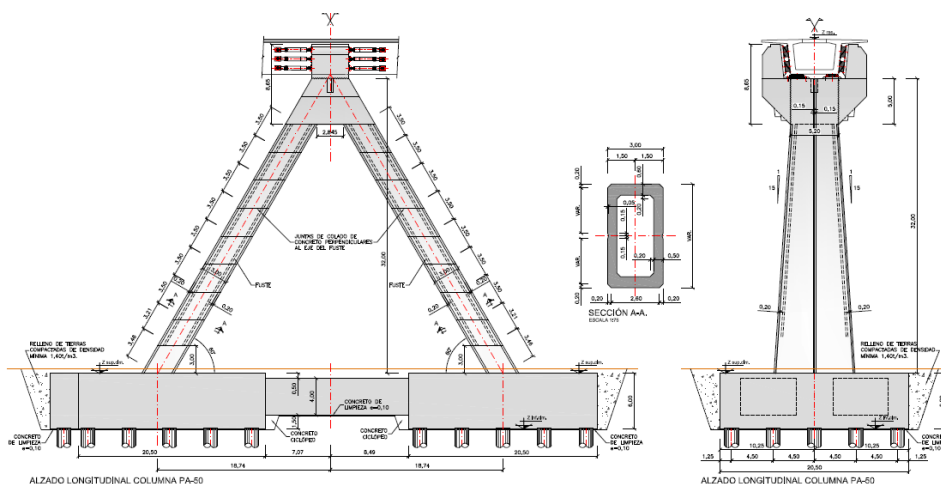


Figura 10. Alzado longitudinal y transversal y sección de pila delta.

La vinculación del tablero a la pila *delta* en cada tramo se realizará mediante los amortiguadores hidráulicos y los aparatos de apoyo de recentrado, conectando las almas del tablero con los topes sísmicos. Debido a estas solicitaciones, los topes de las pilas *delta* son de mayor entidad que en las pilas tipo, llegando a pesar cada tope 240 t.

4.2.4. Pilas Pórtico

Estos apoyos, por su singularidad y magnitud, presentan un “puente” en sí mismos, que debe ser capaz de soportar el peso de un vano de tablero. Estos requerimientos, unidos a las limitaciones de deformaciones que debe tener, obligan a que sea una estructura muy rígida.

Los pórticos se han tenido que emplear en aquellas zonas en donde no resulta viable evitar la afección de los condicionantes físicos existentes (autopista México-Toluca o gaseoductos).

La construcción con autocimbra inferior del tablero ha resultado clave en el diseño de los pórticos, dado que para permitir el paso de la cimbra no se podía disponer el tablero directamente apoyado sobre el dintel, como es habitual. En su lugar, sobre el dintel se dispone un tercer fuste, de sección y anchura semejante a la de una pila tipo. La autocimbra se apoya al ejecutar el tablero sobre el dintel.

De entre los distintos pórticos del Viaducto 2 destacan los que evitan la autopista, pues los estrictos condicionantes constructivos y de diseño existentes convierten a los mismos en elementos muy singulares. La necesidad de ubicar fustes y cimentaciones fuera de la calzada hace que la luz efectiva entre fustes sea cercana a los 30 m. Además, la imposibilidad de cimbrar para ejecutar el dintel o de montarlo mediante grúas por su peso, por su gran luz y canto, ha obligado a tener que recurrir a soluciones mediante encofrado colaborante sobre el que se hormigonase y tesase el hormigón que conforma el dintel. En fases previas del diseño, se analizaron opciones de encofrados metálicos y de hormigón, decantándose, finalmente, por la solución de encofrado en forma de viga con sección de “U” de hormigón.

Dicha viga tiene un canto igual al del dintel (4,40 m) y una anchura de 3,0 m. Destaca la gran esbeltez de sus almas (20 cm de espesor) y losa inferior (25 cm de espesor) para reducir al máximo su peso y facilitar con ello su colocación con grúas convencionales. Del mismo modo, se decidió, para optimizar los plazos de ejecución y mejorar la seguridad de la construcción, diseñar el fuste superior como prefabricado.

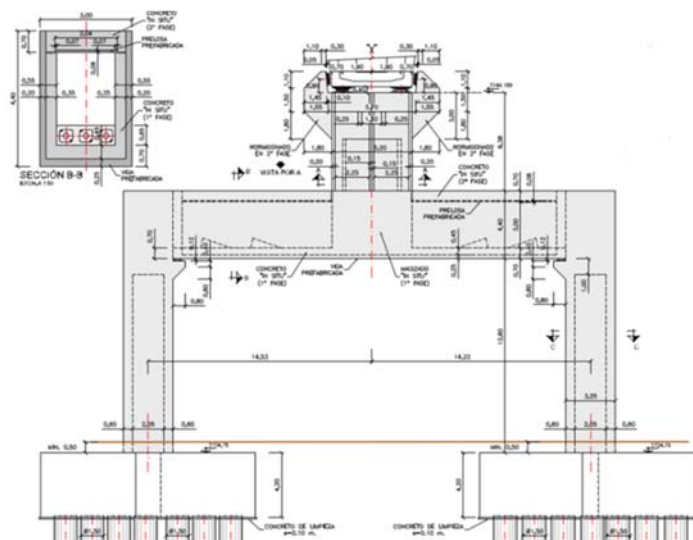


Figura 11. Alzado pila pórtico y sección transversal del dintel.

4.2.5. Estribos

Ambos estribos materializan el punto fijo del tablero en su respectivo tramo, tanto en fase constructiva como en fase de servicio, debiendo soportar grandes fuerzas longitudinales. Para materializar el punto fijo se emplean sendos amortiguadores sísmicos y, provisionalmente durante la construcción, unas ménsulas metálicas embebidas y neoprenos de recentrado. En cuanto a su tipología, ambos estribos son cerrados, teniendo el estribo E1 una cimentación superficial y el estribo E2 una cimentación profunda. El diseño de los estribos se ha adaptado a la construcción con autocimbra, de manera que inicialmente solo se ejecuta la parte central del muro frontal y, una vez que ha pasado la cimbra, se puede ejecutar el resto del muro frontal, la cámara donde se ubican los amortiguadores, los topes donde se ubican los neoprenos de recentrado y los contrafuertes que retienen las tierras.

5. Estado actual de las obras

En la actualidad (enero de 2017), se están ejecutando las cimentaciones y el alzado de los fustes de parte de las pilas del viaducto y se está terminando el montaje de la primera autocimbra. Se prevé que en breve se desplace la misma hacia el estribo 1 para comenzar la ejecución del tablero



Figura 12a y 12b. Ferrallado de cimentación y alzado de pila

6. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad: Secretaria de Comunicaciones y Transportes. México.

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

Gerente de obra: Miguel Garcia del Castillo (Grupo OHL)-Gilberto Rangel (La Peninsular)

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

Proyecto Constructivo Modificado: IDEAM S.A. Francisco Millanes, Luis Matute, Jesús Martín, Pablo Solera, Carlos Gordo, David Alcañiz, Jorge Miguel Montero.

Asistencia Técnica especializada durante la ejecución de las obras: IDEAM S.A. Francisco Millanes, Luis Matute, Jesús Martín, Alberto Nicolás, Jorge Miguel Montero, Jose María Hernández.