

Algunos Diseños Estructurales Singulares para los Puentes del Proyecto de Ampliación de la Autopista I-35 NEX Central (San Antonio, Texas)

Some Outstanding Structural Designs for the Bridges in the I-35 NEX Central Project (San Antonio, Texas)

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^a, Guillermo Ortega Carreras^b, Pablo Carrión Mantilla^c, Ander Mikel Asensio Egaña^d, Ricardo Rafael Pereira de Sousa^e, Antonio Noriega Arena^f

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. CEO. Universidad de Cantabria.

oramos@orramoseng.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. gortega@orramoseng.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. pcarrion@orramoseng.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. amasensio@orramoseng.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. rpereira@orramoseng.com

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. anoriega@orramoseng.com

RESUMEN

Como parte del proyecto de ampliación de capacidad de la autopista I-35 en las inmediaciones de San Antonio (Texas) se ha llevado a cabo el diseño completo de 9 puentes, totalizando 84 vanos y 90 pilas. Tres de estos puentes pertenecen al quinto nivel del intercambiador de la autopista I-35 con la autopista de circunvalación de San Antonio, Loop 1604. La mayor parte de los vanos proyectados son tableros de vigas doble T. Además, se proyectaron dos vanos metálicos, uno de ellos curvo de 185 ft de luz. Destaca el diseño realizado para dos pilas, tipo “hammerhead” excéntricas, de 97 ft de altura (que han requerido el postesado del fuste), las cuales comparten cimentación con las pilas de otros puentes adyacentes.

ABSTRACT

The detailed design of nine bridges (86 spans and 90 bents, total) was carried out within the I-35 Northeast Expansion project (Central segment), near the city of San Antonio (Texas). Three out of the nine bridges are part of the fifth level of the interchange between the I-35 and the San Antonio highway belt Loop 1604. Most of the spans designed are concrete I girder type. Additionally, two steel spans were designed, one of them 185 ft long in a curved alignment. It is remarkable the design of two eccentric “hammerhead” bents, 97 ft high (which required the posttensioning of their columns), which had a combined foundation with the bents of other adjacent bridges.

PALABRAS CLAVE: pilas excéntricas, postesado, cimentación conjunta, vano metálico, fatiga.

KEYWORDS: eccentric bents, posttensioning, combined foundation, steel span, fatigue

1. Introducción

El Departamento de Transportes de Texas (TxDOT) está llevando a cabo un programa de ampliación de capacidad a lo largo de unas 20 millas de la autopista I-35, al noreste de la ciudad de San Antonio. El programa de ampliación se ha dividido en tres proyectos: Sur, Central y Norte. En todos los casos la ampliación de capacidad de la autopista implica la construcción de dos estructuras elevadas para dar cabida a tres nuevos carriles (uno de ellos para vehículos de alta ocupación) en cada sentido de circulación. Las nuevas estructuras elevadas se construyen de forma paralela a la calzada actual de la I-35 y se ubican entre esta última y sus calzadas laterales de servicio (Fig. 1). El proyecto de ampliación también incluye la construcción de rampas para la conexión de las nuevas calzadas elevadas con las calzadas existentes de la I-35, así como la construcción de enlaces con las carreteras ya existentes.

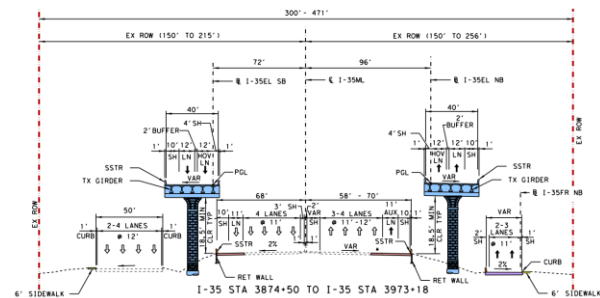


Figura 1. Sección tipo de la ampliación de la I-35.

Los puentes de esta ponencia pertenecen al Proyecto Central de ampliación de la I-35 (I-35 NEX Central) (Fig. 2). Dentro de este Proyecto Central se incluyen intercambiadores para la conexión directa de las nuevas calzadas elevadas de la I-35 con las autopistas ya existentes I-410 North y Loop 1604 West (tratándose esta última de uno de los cinturones de circunvalación de San Antonio).

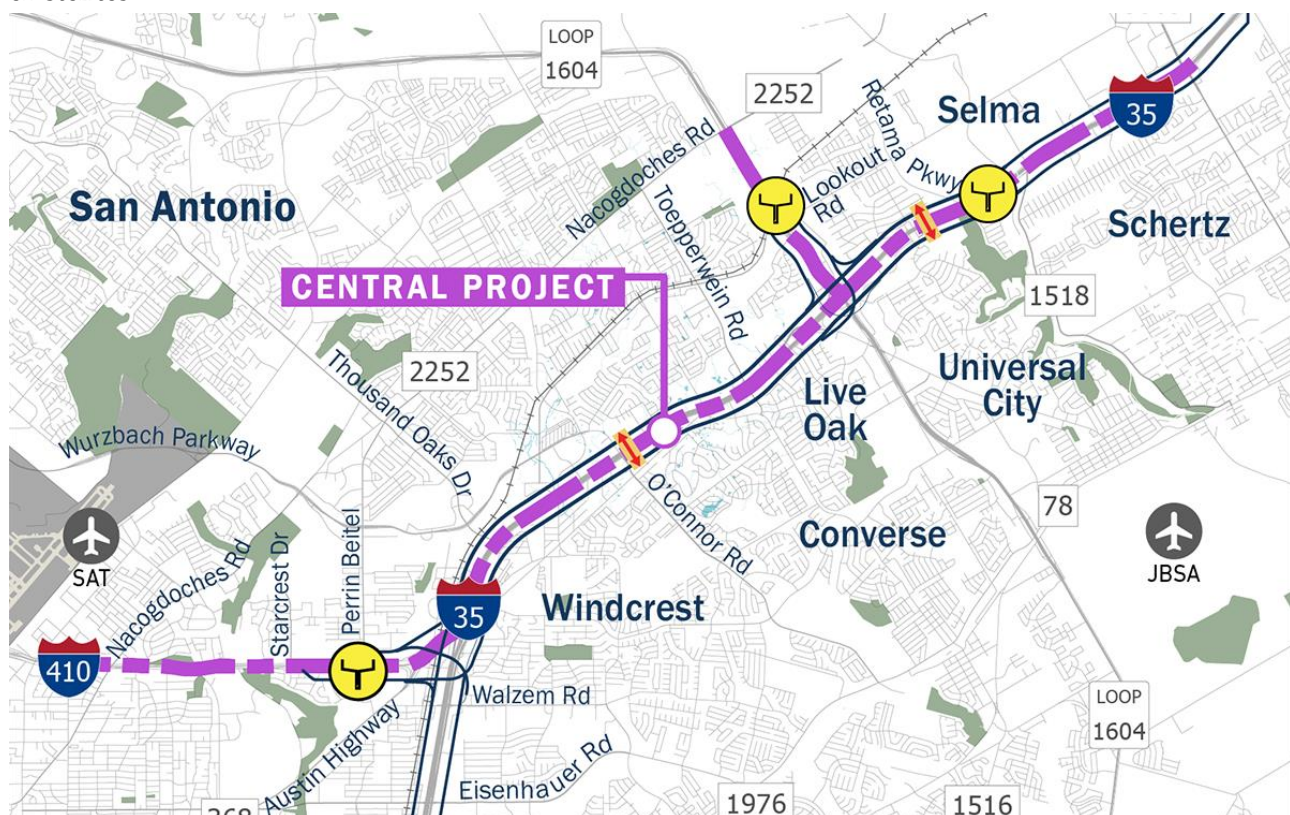


Figura 2. Mapa general del proyecto I-35 NEX Central.

2. Descripción general de los puentes

ORRAMOS INGENIERÍA ha llevado a cabo el diseño de detalle de 9 de los puentes incluidos dentro del proyecto I-35 NEX Central. En total se ha realizado el diseño de 84 vanos y 90 pilas, para una longitud total de puente de 11041 ft. La tabla 1 resume sus características principales.

Tabla 1. Características principales de los puentes proyectados.

Puente	Longitud (ft)	Número de vanos
401	372.45	3
401A	464.93	4
402	325.00	3
113B	2813.64	20
114	1207.81	9
408	1770.72	12
410	1827.81	15
409	2258.34	18

El **puente 114** sirve como rampa de conexión desde la I-35 actual hasta la calzada elevada de la ampliación de la I-35, albergada por el **puente 113B**. El puente 114 parte desde la ampliación de un puente ya existente, sobre el cauce del Cibolo Creek, de las calzadas actuales de la I-35 (Fig. 3).



Figura 3. Modelo BIM de los puentes 113B (izquierda) y 114 (derecha).

Por su parte, los **puentes 408, 409 y 410** pertenecen a los ramales de conexión del intercambiador entre las calzadas elevadas de la I-35 y la autopista de circunvalación de San Antonio Loop 1604 (Fig. 4). Estos tres puentes comparten una misma pila común, donde finalizan los puentes 409 y 410 y comienza el puente 408. El puente 409 recoge el tráfico de la calzada elevada dirección Norte de la I-35, mientras que el puente 410 hace lo propio con el tráfico de la calzada elevada dirección Sur de la I-35. Ambos puentes, 409 y 410, convergen en el puente 408, el cual conduce el tráfico hacia la calzada dirección Oeste de la autopista Loop 1604.

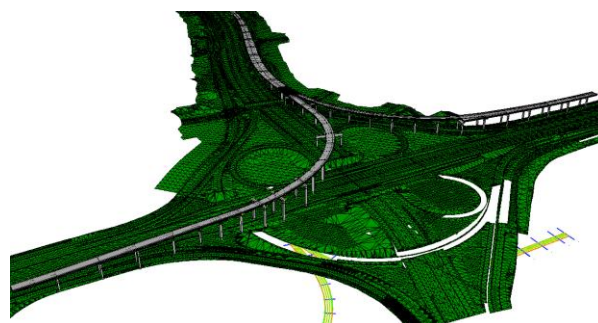


Figura 4. Modelo BIM de los puentes 408 (fondo), 409 (izquierda) y 410 (derecha).

Los puentes 409 y 410 se inscriben en alineaciones curvas en planta de radios reducidos: 750 ft, en el caso del puente 409, y 725 ft, en el caso del puente 410.

Cabe destacar que el puente 409 constituye el quinto nivel de este intercambiador (Fig. 5), por lo que cuanta con pilas que llegan a sobrepasar los 100 ft de altura.

El diseño de los puentes se realizó de acuerdo con la normativa AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition (2017) [1], complementada con las prescripciones del Bridge Design Manual LRFD (2020-1) del TxDOT [2].



Figura 5. Modelización 3D del intercambiador entre las calzadas elevadas de la I-35 y la autopista Loop 1604.

2.1 Tableros

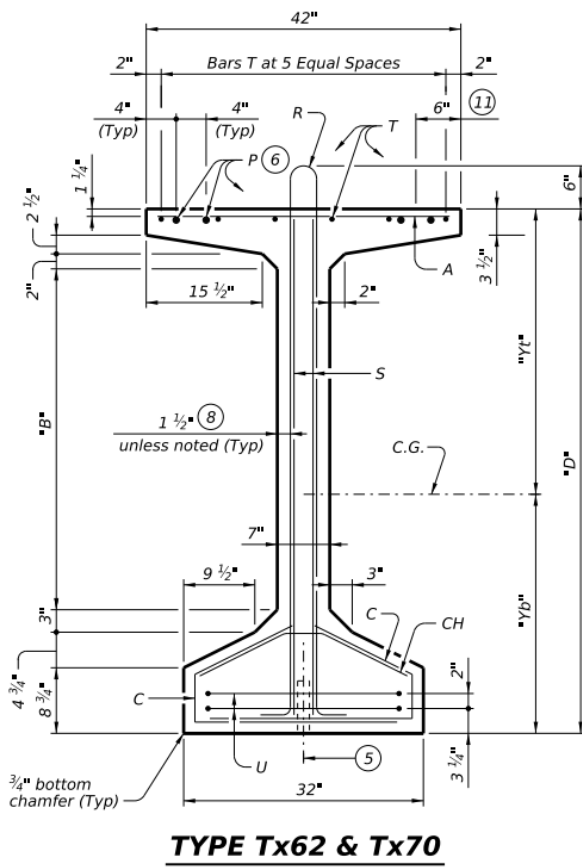


Figura 6. Sección de la viga Tx70, según el plano standard del TxDOT.

Como es habitual en los proyectos para el TxDOT la tipología empleada para los tableros es la de vanos isostáticos con vigas doble T (las I girders de Texas). En el diseño de los puentes se han empleado mayoritariamente las vigas

Tx70 (Fig. 6), de 70 pulgadas de canto (1778 mm), alcanzándose con ellas luces de hasta 150 ft (45 m) con separaciones entre vigas en torno a los 9 ft (2.75 m). Para vanos de longitudes menores se han utilizado también las vigas Tx54 y Tx62.

Las secciones tipo más habituales para los tableros han sido 54 ft de ancho, para calzadas de 3 carriles, y 42ft de ancho, para calzadas de 2 carriles. En el caso de los tableros de 54 ft de anchura se han empleado 6 vigas, mientras que para los tableros de 42 ft de anchura el número de vigas considerado ha sido de 5 (Fig. 7).

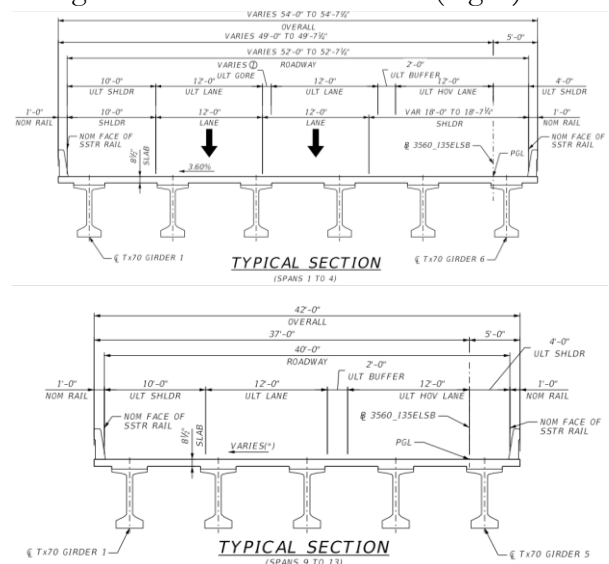


Figura 7. Secciones tipo de los tableros.

En el caso de tableros más anchos, como en los entronques de las rampas con las calzadas

elevadas se han empleado mayor número de vigas, lógicamente, aunque manteniendo una separación entre vigas similar a la indicada anteriormente (Fig. 8).



Figura 8. Vista inferior de uno de los tableros.

Para luces superiores a los 150 ft se ha recurrido a vanos metálicos, con vigas de sección doble T. En el puente 113B se ha proyectado un tablero mixto con 5 vigas para un vano recto de 42 ft de anchura con una luz de 235 ft (Fig. 9). Por su parte, el puente 409 ha requerido salvar una luz de 185 ft, para la que se ha considerado un vano metálico curvo (de radio 750 ft) con 4 vigas curvas, para un tablero de 40 ft de anchura.

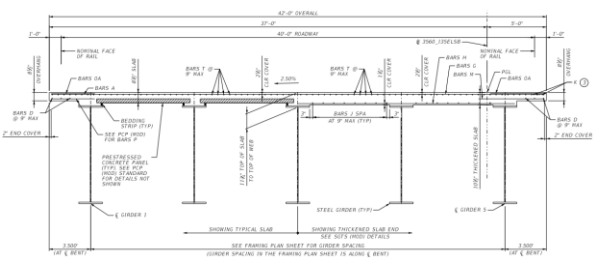


Figura 9. Sección tipo del vano metálico recto de 235 ft de luz.

2.2 Pilas

La tipología de pila más comúnmente empleada ha sido la tipo “hammerhead”, consistente en un único fuste de sección rectangular sobre el que se dispone un capitel de canto variable con sección también rectangular (Fig. 10). En cuanto a la cimentación se resuelve, como es habitual en Texas, con pilotes. Hasta 60 ft de altura de pila se consideró un único pilote por pila. Para alturas mayores de 60 ft, se proyectaron encepados de dos pilotes. La tabla resume las geometrías más

habituales utilizadas en el diseño de los “hammerheads”.

Tabla 2. Tipos de pilas “hammerhead” diseñadas.

Altura pila (ft)	Sección fuste (ft)	Cimentación
40	5 x 8	1 pilote ϕ 8 ft
60	6 x 8	1 pilote ϕ 8 ft
75	6 x 10	2 pilotes ϕ 6 ft
100	8 x 12	2 pilotes ϕ 6 ft



Figura 10. Pilas tipo “hammerhead”.

También se han utilizado de forma frecuente pilas tipo pórtico, conocidas en Texas como “straddle bents” (Fig. 11).



Figura 11. Vista de una pila tipo “straddle bent”.

Hasta luces de pórtico de 60 ft los “straddle bent” se han diseñado armados, con las pilas empotradas en el dintel del pórtico. Para luces de dintel superiores a los 60 ft los dinteles se proyectan simplemente apoyados sobre las pilas, materializando la conexión mediante barras de armadura pasiva zunchadas helicoidalmente (Fig. 12).

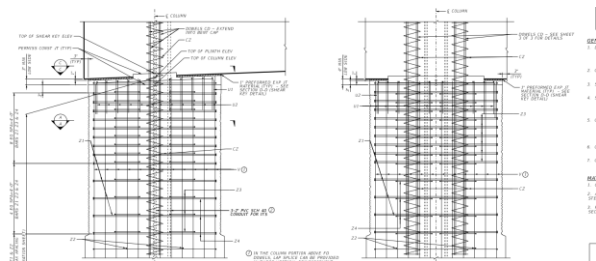


Figura 12. Conexión entre pila y dintel en "straddle bents" con dintel simplemente apoyado.

En los casos en los que la luz del dintel superaba los 80 ft los dinteles se han postesado. Se ha llegado a proyectar un "straddle bent" postesado de 127 ft de longitud (Fig. 13).

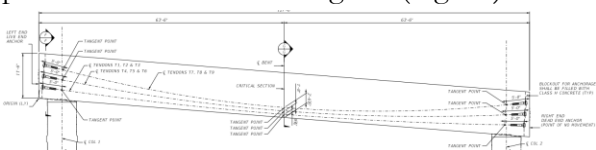


Figura 13. Postesado en un "straddle bent".

Habitualmente la sección del dintel es rectangular, pero en casos en los que el gálibo es reducido se ha recurrido al uso de sección en "inverted T" (Fig. 14). En cuanto a la sección de las pilas de los "straddle bents" se han proyectado cuadradas con dimensiones desde 5x5 ft hasta 8x8 ft, dependiendo de la altura y luz del pórtico.

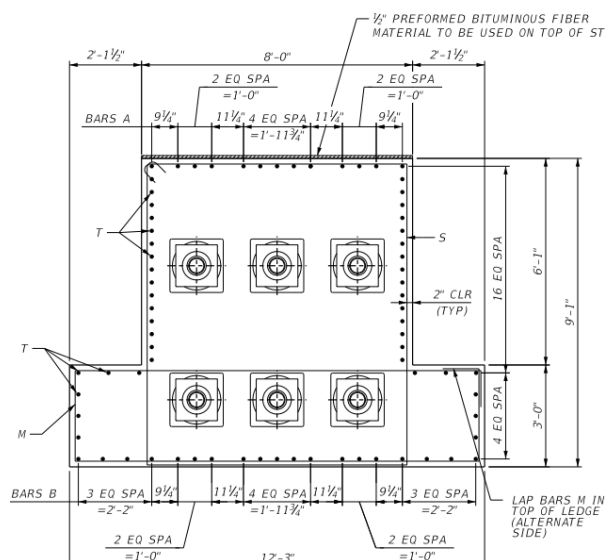


Figura 14. Sección de dintel tipo "inverted T".

3. Pilas excéntricas postesadas con cimentación conjunta

Como ya se explicó, el puente 114 sirve como rampa de conexión desde la I-35 actual hasta la calzada elevada de la ampliación de la I-35, albergada por el puente 113B. El puente 114 parte desde la ampliación de un puente ya existente, sobre el cauce del Cibolo Creek, de las calzadas actuales de la I-35. A esta ampliación del puente existente se le denomina puente 504 (Fig. 16). El puente 114 debe pasar por encima del puente existente, sobre el Cibolo Creek, de la calzada de servicio de la I-35. A su vez el puente 113B tiene que pasar por encima del puente 114 y quedar encajado entre los puentes existentes de las calzadas principal y de servicio de la I-35.

Debido a la estrechez del espacio disponible entre los dos puentes existentes, sobre el Cibolo Creek, de las calzadas principal y de servicio de la I-35, las pilas 17 y 18 del puente 113B han de compartir cimentación con la columna 2 del "straddle bent" de la pila 8 del puente 114 y con la pila 2 del puente 504, respectivamente (Fig. 15 y 17).



Figura 15. Encaje de las pilas 17 y 18 del puente 113B, de la pila 8 del puente 114 y de la pila 2 del puente 504 (ampliación del puente existente, sobre el Cibolo Creek, de las calzadas principales de la I-35).

Además, precisamente por compartir cimentación con otras pilas, las pilas 17 y 18 del puente 113B son excéntricas (Fig. 18, 19 y 20). Por otro lado, ambas pilas son bastante altas (97 ft la pila 17 y 95 ft la pila 18), siendo sus fustes de sección rectangular maciza: 8x12 ft, la pila 17, y 10x14 ft, la pila 18. Ambos factores, excentricidad y elevada altura han conducido a la

necesidad de pretensar estos fustes, mediante la utilización de 5 tendones de 15 cordones de 140

mm², en la pila 17, y de 19 cordones de 140 mm², en la pila 18 (Fig. 21).

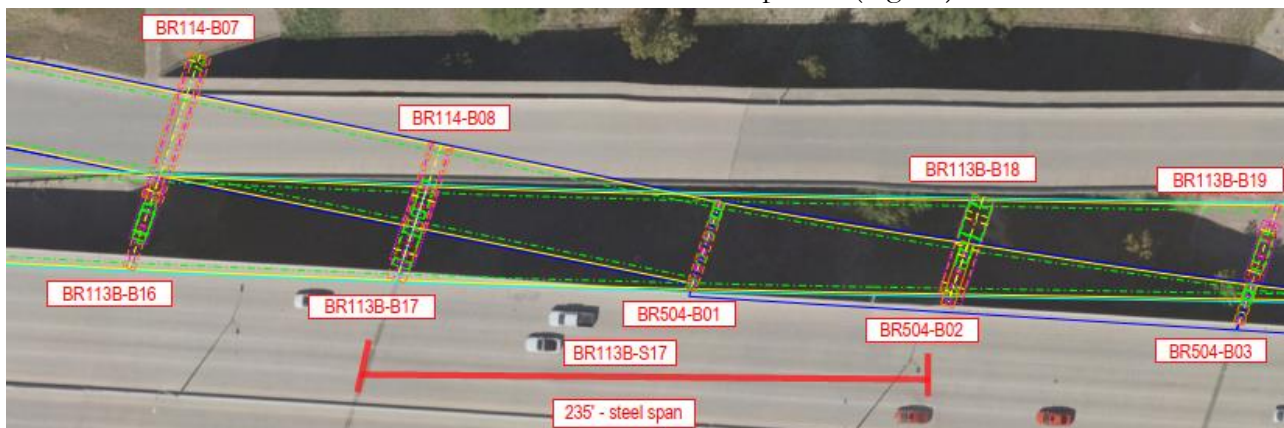


Figura 16. Planta de situación de los puentes 113B, 114 y de los puentes existentes de las calzadas principal y de servicio de la I-35.



Figura 17. Cimentación compartida para la pila 17 del puente 113B y la columna 2 del "straddle bent" de la pila 8 del puente 114.

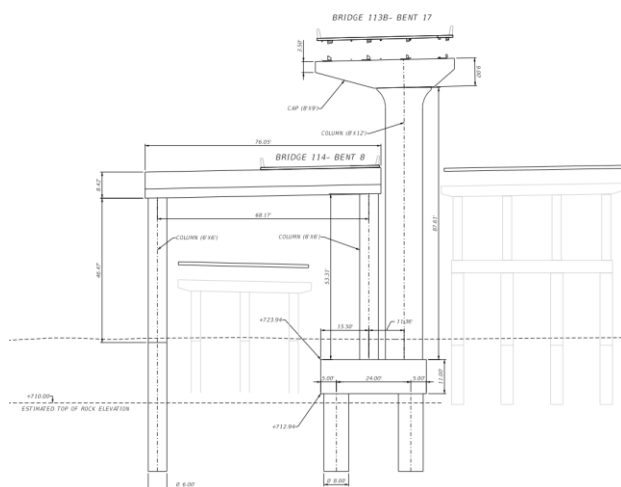


Figura 18. Alzado pila 17, excéntrica, del puente 113B y pila 8, "straddle bent", del puente 114.

Para el diseño de la pilas excéntricas con cimentación conjunta se ha confeccionado un modelo con el programa SOFISTIK (Fig. 22). Así, por ejemplo, en el caso de la pila 18 del puente 113B, se ha modelizado el cabezal y el fuste de la pila 18. En el modelo se han representado los nudos de las bases de los fustes de la pila 2 del puente 504: En esos nudos se aplican las reacciones de la pila 2 del puente 504, las cuales se obtuvieron de un modelo independiente confeccionado para esa pila. Estos nudos de las bases de las columnas de la pila 2 del puente 504 se conectan de forma rígida a los pilotes de la cimentación. De esta manera, con un único modelo se puede obtener las cargas en los pilotes de la cimentación conjunta.

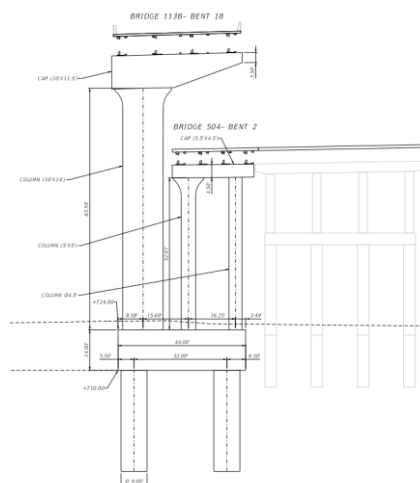


Figura 19. Alzado pila 18, excéntrica, del puente 113B y pila 2 del puente 504.



Figura 20. Construcción del cabezal de la pila 17, excéntrica, del puente 113B.

En el modelo también se ha incluido el pretensado del fuste de la pila 18, que permite controlar las tensiones de tracción que aparecen en la cara exterior de la base del fuste, debido a la excentricidad de la pila.

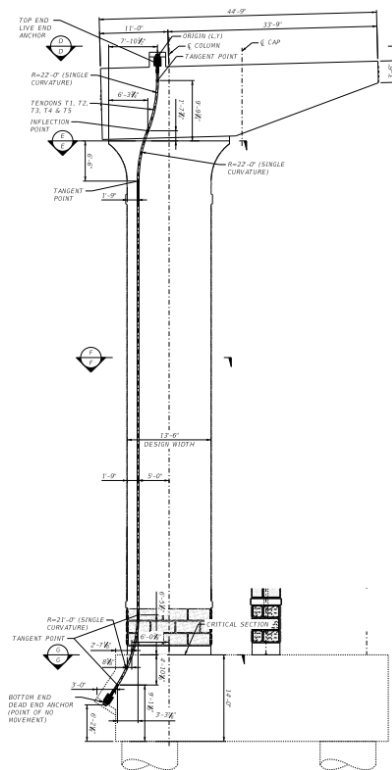


Figura 21. Trazado del pretensado de la pila 18 del puente 113B.

Para dar mayor flexibilidad durante la construcción se comprobó, con el modelo, que los pilotes no sufrían tracciones, independientemente de si se construía primero la pila 18 del puente 113B o la pila 2 del puente 504.

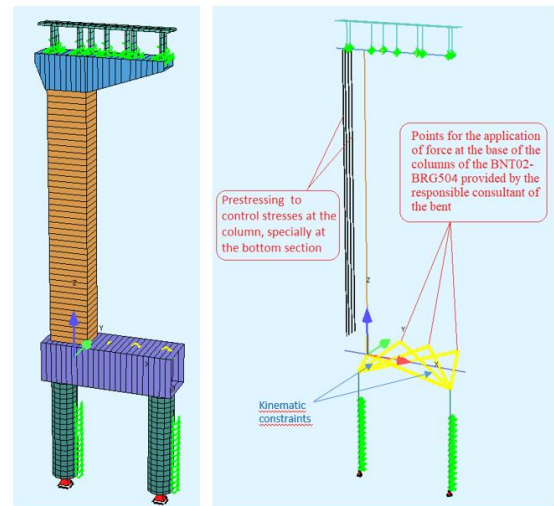


Figura 22. Modelo de cálculo para la pila 18, excéntrica, del puente 113B y su cimentación conjunta con la pila 2 del puente 504.

En cuanto al diseño de la armadura del encepado común, se consideró un modelo de bielas y tirantes (Fig. 23). Las acciones externas en el modelo de bielas y tirantes son, por un lado, las reacciones en los pilotes y, por otro, las acciones provenientes de los fustes de la pila 18 del puente 113B y de los fustes de la pila 2 del puente 504. En el modelo de bielas y tirantes también se tienen en cuenta las fuerzas de desviación causadas por el anclaje de los tendones de pretensado del fuste de la pila 18 del puente 113B.

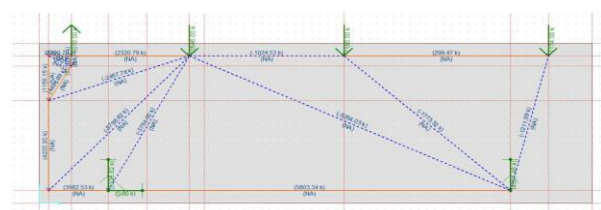
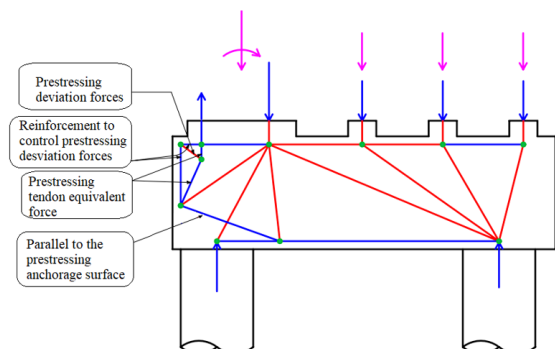


Figura 23. Modelo de bielas y tirantes para el diseño de la armadura de la cimentación conjunta de la pila 18, excéntrica, del puente 113B y la pila 2 del puente 504.

4. Vano metálico curvo

Como ya se señaló, el puente 409 constituye el quinto nivel del intercambiador entre las nuevas calzadas elevadas de la I-35 y la autopista de circunvalación de San Antonio Loop 1604 (Fig. 24). En efecto, el puente 409 ha de pasar sobre las calzadas existentes de la I-35 (nivel 1), las calzadas de la autopista Loop 1604 (nivel 2), el ramal de enlace constituido por el puente 407 (nivel 3) y las nuevas calzadas elevadas de la I-35 (nivel 4). Debido a la complejidad del nudo, el vano 6 del puente 409 requiere una longitud de 185 ft, la cual no se puede conseguir con las vigas estándar de hormigón Tx70 (cuyo rango de utilización alcanza hasta solo 150 ft). Por este motivo, se ha recurrido a diseñar un vano metálico.

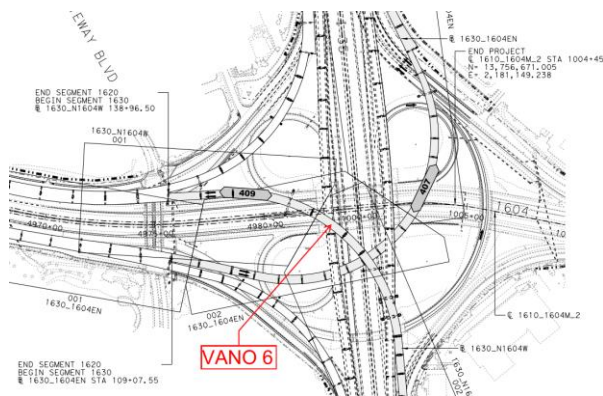


Figura 24. Situación del vano 6 del puente 409 en el intercambiador entre las calzadas elevadas de la I-35 y la autopista Loop 1604.

El vano metálico diseñado consiste en cuatro vigas de sección doble T, con una separación de 11.417 ft, para un tablero de 40 ft de anchura (Fig. 25).

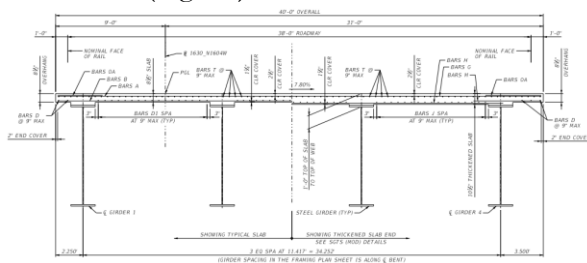


Figura 25. Sección transversal del vano 6 del puente 409.

La principal peculiaridad de este vano metálico es su fuerte curvatura en planta, ya que

se inscribe en una alineación circular de 750 ft de radio (229 m). Debido a esta fuerte curvatura en planta no resulta adecuado considerar vigas rectas para resolver el vano, por lo que se ha recurrido al empleo de vigas de planta curva (Fig. 26).

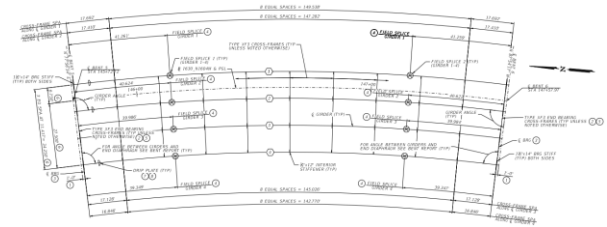


Figura 26. Disposición en planta de las vigas y marcos transversales del vano 6 del puente 409.

Para el diseño de este vano metálico, además de la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition (2017) [1], y el Bridge Design Manual LRFD (2020-1) del TxDOT [2], se han seguido, también, las prescripciones del documento TxDOT Preferred Practices for Steel Bridge Design, Fabrication and Erection (2019) [3].

Para el cálculo de esfuerzos en el vano se ha realizado un modelo tridimensional con el programa SOFISTIK (Fig. 27, 28 y 29). En el modelo se han representado los principales elementos resistentes: vigas metálicas, losa superior de hormigón y marcos transversales.

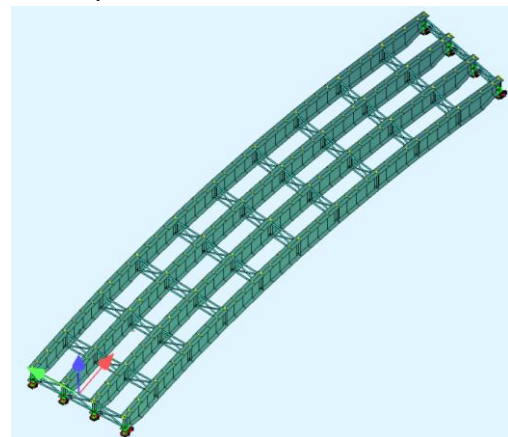


Figura 27. Imagen del modelo tridimensional de cálculo del vano 6 del puente 409.

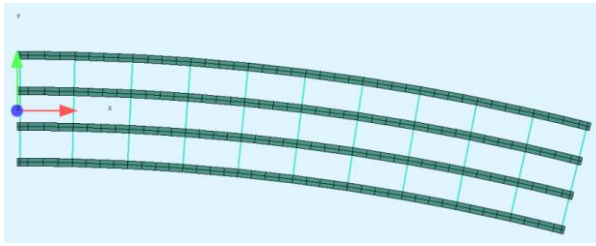


Figura 28. Vista en planta del modelo tridimensional de cálculo del vano 6 del puente 409.

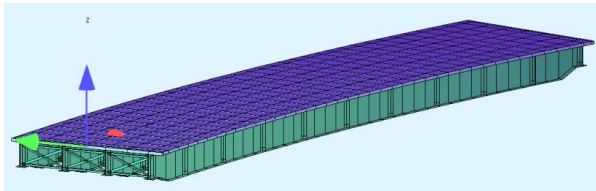


Figura 29 Perspectiva del modelo tridimensional de cálculo del vano 6 del puente 409.

Por otra parte, la consideración de elementos lámina para simular la losa superior permite hacer un exhaustivo paseo de las sobrecargas de tráfico, con el objeto de determinar las máximas solicitaciones causadas por esta carga (Fig. 30).

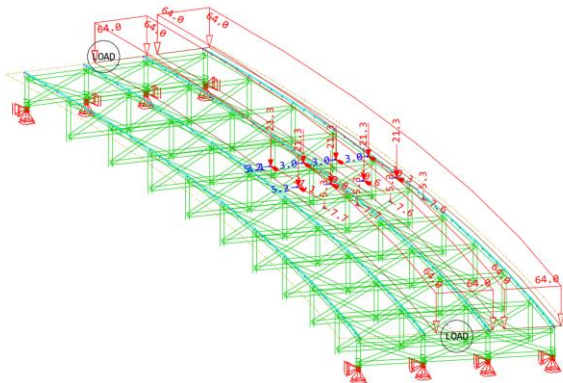


Figura 30. Una de las posiciones de sobrecarga consideradas en el modelo tridimensional de cálculo del vano 6 del puente 409.

Finalmente, un aspecto de especial relevancia en el diseño de los marcos transversales es su comprobación a fatiga. Este aspecto se ha vuelto crítico, desde las últimas actualizaciones de la normativa AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [1], ya que los rangos de tensiones admisibles en fatiga para las uniones entre los marcos transversales y las vigas principales se han vuelto mucho más restrictivos que en ediciones anteriores. De ahí, de nuevo, la importancia de contar con un

modelo tridimensional de cálculo que permita, a la hora de obtener el rango de fatiga que solicita las uniones entre marcos transversales y vigas principales, captar de forma adecuada las complejas interacciones entre estos elementos, debido al acoplamiento de los esfuerzos de flexión y torsión en puentes con una fuerte curvatura en planta.

Agradecimientos

El proyecto de los puentes objeto de esta ponencia ha sido desarrollado en colaboración con la empresa de ingeniería texana OTHON. Queremos agradecer especialmente la colaboración prestada por dos de los ingenieros de OTHON: Manuel Correia y Ben Anderson.

La construcción de los puentes corre a cargo de Álamo NEX Construction (ANC), joint-venture liderada por Ferrovial Construcción.

Referencias

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (2017) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition*, Washington DC, Estados Unidos de América.
- [2] Texas Department of Transportation (2020) *Bridge Design Manual - LRFD*, Austin, Texas.
- [3] Texas Steel Quality Council (2019) *TxDOT Preferred Practices for Steel Bridge Design, Fabrication and Erection*, Austin, Texas.