

Diseño de estructuras para calzadas elevadas en el proyecto I-35 NEX Central

Design of structures for elevated roadways in the I-35 NEX Central project

José Manuel Simón-Talero Muñoz^a, Javier Gamino Palomo^b, Javier Domínguez Martínez^c, Isabel Sastre Furones^d, Raquel Frontela Melero^e, Alejandro Hernández Gayo^f,
Juan Pablo Boticario de Zulueta^g

^a Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado. jsimontalero@torroja.es

^{b c d e f} Ingeniero/a de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero/a de Proyectos. correo@torroja.es

^g Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL US. Structural Design Manager. jpboticario@alamonex.us

RESUMEN

El proyecto I-35 NEX Central consiste en la ampliación de la capacidad de la autopista I-35 en las cercanías de San Antonio (Texas) mediante sendas calzadas elevadas sobre las existentes. La obra consiste principalmente en viaductos urbanos continuos de gran longitud que albergan dichas calzadas, así como sus rampas de acceso y conexión. El reducido espacio disponible para las nuevas estructuras y las estrictas condiciones de construcción, minimizando la afección al tráfico, conducen al uso intensivo de la tipología de pila martillo sobre columna y pilote únicos y a elementos prefabricados en la medida de lo posible, predominando los vanos de vigas pretensadas, que alcanzan los 170 ft (50 m) de luz.

ABSTRACT

The I-35 NEX Central project consists of the expansion of highway I-35 to increase its capacity in the vicinity of San Antonio (Texas) by building brand new elevated roadways over the existing ones. The works mainly consist of new long continuous viaducts to accommodate the new roadways, as well as the required access and connection ramps. The limited available space to place the substructure along with the strict construction conditions minimizing the traffic disruption leads to the wide use of the mono-shaft hammerhead typology at bents as well as precast elements where feasible, being prominent the use of precast concrete beams decks, which reach span lengths up to 170 ft (50 m)

PALABRAS CLAVE: pila martillo, pila-pilote, prefabricado, calzadas elevadas, viaducto, viga.

KEYWORDS: hammerhead bent, mono-shaft bent, precast, elevated roadways, viaduct, beam



Figura 1. Vista general de las obras de ampliación con calzadas elevadas de la autopista I-35 NEX Central.

1. Descripción general y alcance

El proyecto I-35 NEX Central (*Northeast Expansion*, segmento Central) es un proyecto *Design & Build* consistente en la ampliación de la capacidad de un tramo la autopista interestatal I-35 a su paso por la zona nordeste de San Antonio, Texas (EE. UU.). La ampliación del tramo, que abarca unas 12 millas (20 km), se acomete mediante la construcción de sendas calzadas elevadas sobre las existentes en el tronco de la vía, y de los pertinentes enlaces de estas calzadas con las autopistas I-410 y 1604, así como otros accesos. Las estructuras proyectadas son principalmente viaductos continuos de gran longitud que albergan las nuevas calzadas elevadas, y cuyo volumen constituye más del 50% de la inversión del proyecto.



Figura 2. Vista general de los segmentos 3530 y 3535

El proyecto es ejecutado por el consorcio Alamo NEX Construction, liderado por Ferrovial Construction US. El tramo se divide en un total de diecisiete segmentos diseñados por distintos grupos de consultores. Torroja Ingeniería, en colaboración con Consor Engineers, ha acometido el diseño completo de las estructuras de tres de estos segmentos (3530, 3545 y 3555). Cada uno de ellos está compuesto íntegramente de largos viaductos continuos, contabilizándose en el alcance de diseño de Torroja cerca de 150 vanos y 150 pilas, con una extensión total de unos 6 km y 104 000 m² de tablero.

Tabla 1. Datos de segmentos diseñados por Torroja

Segmento		3530	3545	3555	Total
Longitud	[ft]	7 289	6 965	5 376	19 630
	[m]	2 222	2 123	1 639	5 983
Nº Vanos	[nº]	51	50	40	141
Nº Pilas	[nº]	52	49	41	142
Hammerhead	[nº]	47	19	34	100
Straddle bents	[nº]	5	30	7	42
Máxima luz vano	[ft]	168	213	166	-
	[m]	51.2	64.9	50.6	-
Superficie	[ft ²]	422 954	390 519	308 783	1 122 256
Tablero	[m ²]	39 294	36 280	28 687	104 261

Además, Torroja ha llevado a cabo el modificado del diseño de una gran parte de los cargaderos de las pilas de otros segmentos para su conversión a solución prefabricada.

2. Condicionantes de diseño

El planteamiento de estas estructuras urbanas de gran magnitud, que han de encajarse en el reducido espacio entre las calzadas existentes y construirse minimizando la afección al tráfico, plantea importantes retos de diseño.

Las nuevas calzadas albergan un mínimo de dos carriles con 42 ft (12.80 m) de anchura de tablero, aunque predomina la sección de tres carriles con 54 ft (16.45 m) de anchura, que a lo largo del trazado sufre además ensanchamientos para dar lugar a salidas o entradas de ramales y accesos.

Las pilas que soportan los tableros de las nuevas calzadas elevadas han de ubicarse principalmente en las tercianas existentes entre el tronco y las vías de servicio (*frontage roads*). Estas tercianas se ven interrumpidas por los numerosos ramales de entrada y salida que las atraviesan para unir las calzadas del tronco con las vías de servicio, y que deben salvarse con las nuevas estructuras.

Existen también pasos transversales superiores e inferiores a lo largo de todo el trazado, así como muros y otras estructuras en los enlaces más complejos.



Figura 3. Detalle de pilas situadas en tercianas

También hay que tener en cuenta la gran cantidad de servicios afectados (*utilities*) que existen tanto en las zonas de apoyo (tuberías, drenajes y conducciones enterradas) como sobre las estructuras existentes (tendidos eléctricos aéreos), muchas de las cuales son inamovibles.

Se hace necesario por tanto recurrir a viaductos cuyas pilas presenten una huella reducida al mínimo en planta, y con luces lo más largas posible que permitan minimizar el número de vanos y, por tanto, de pilas a disponer. Además, la altura de los nuevos viaductos debe ser tal que respete los gálibos verticales necesarios de los nuevos tableros y pilas sobre las calzadas principales, así como sobre cualquier paso transversal a éstas.

Por otro lado, están los condicionantes de tráfico y plazo. La afección al tráfico debe ser mínima, asumiendo que no se pueden efectuar cortes para la construcción, y considerando que muchos de los trabajos deberán ser nocturnos para minimizar la afección. Esto reduce significativamente los tiempos disponibles para efectuar algunas operaciones de la construcción, lo que afecta al cumplimiento de plazos.

Todas estas circunstancias conducen a la necesidad de optimización tanto de tipologías y diseños como de procesos constructivos. Se persigue por tanto la búsqueda de soluciones que utilicen elementos y métodos repetitivos que permitan una agilización de la construcción para la producción de estructuras lo más compactas posible que minimicen su huella en el reducido espacio existente. En suma: el proyecto se presenta como un gran reto técnico.

Finalmente, mencionar también como condicionantes de diseño las normativas a aplicar, que en este caso son principalmente la norma *AASHTO LRFD 9th Edition*, de 2020 [1], y las normas y estándares propios del *Texas Department of Transportation, TxDOT* [2], así como las especificaciones propias del proyecto (*TxDOT DB Specifications*) [3].

3. Estructuras proyectadas

3.1. Descripción de las estructuras

En base a los condicionantes descritos en el epígrafe anterior, las estructuras proyectadas consisten principalmente en una larga sucesión de vanos de vigas con losa superior de hormigón, soportados en su mayoría por pilas martillo.

La inmensa mayoría de los vanos se componen de vigas prefabricadas de hormigón de tipo estándar de Texas (vigas *Tx*) sobre las que se dispone una losa de hormigón de 8.5" (215 mm) de espesor nominal, con una parte *in-situ* ejecutada sobre prelosas prefabricadas. Existe un reducido número de vanos en todo el proyecto que, ya sea por su longitud, por su curvatura en planta o por otras circunstancias, se proyectan como vanos mixtos con vigas de acero. En el caso de los segmentos diseñados por Torroja, existe un único vano de vigas metálicas, de 213 ft (65 m) de luz.

Los viaductos diseñados por Torroja tienen una anchura general mínima de 42 ft (12.8 m), siendo predominante la anchura de 54 ft (16.46 m). Estas anchuras se amplían en las zonas de entrada o salida de ramales.

Todos los vanos son isostáticos a efectos de cargas verticales, siguiendo los estándares de Texas. La losa-forjado tiene continuidad entre los vanos que no disponen de junta de dilatación. De acuerdo con la normativa de Texas, se disponen juntas de dilatación aproximadamente cada 400 ft (122 m), lo que se traduce en juntas cada dos o tres vanos según su longitud.

En cuanto a las pilas, la gran mayoría son pilas martillo (*hammerhead*) de hormigón armado.

Los son cargaderos son generalmente simétricos y de canto variable, y descansan sobre columnas rectangulares con un capitel ensanchado en lo alto.

La altura de las pilas está condicionada por el gálibo de los cargaderos sobre las calzadas e infraestructura existentes. Es en las regiones sobre pasos inferiores existentes y en los enlaces es donde las pilas alcanzan sus mayores alturas, existiendo dentro del ámbito de diseño de Torroja algunas pilas de más de 25 m de altura.

En lo que respecta a la cimentación, con el objetivo de minimizar la huella tanto de la estructura como de su construcción (minimizar excavaciones), se recurre a la solución de pila-pilote con pilote único (*mono-shaft*). Los pilotes necesarios requieren diámetros que alcanzan los 10 ft (3.05 m). Esta solución se aplica en la mayoría de los casos, allá donde las condiciones lo permiten. En condiciones adversas se recurre a una cimentación con un encepado sobre dos o más pilotes.

En aquellas zonas en las que no es posible disponer una única columna debido a la presencia de ramales de entrada o salida, o a otras circunstancias, se recurre a otras tipologías. La más extendida es la pila pórtico sobre dos columnas o *straddle bent*, en la cual las columnas se ubican flanqueando el ramal a salvar y sobre ellas descansa el cargadero que da soporte al tablero. Este tipo de cargaderos puede ser armado o postesado en función de su luz y condiciones de trabajo, y puede presentar canto constante o variable.

Una variación de la pila pórtico que se da cuando se implementan más de dos columnas debido a la longitud del cargadero es la pila multi-columna. Este tipo de pilas se dispone habitualmente en las zonas en las que el tablero se ensancha al máximo para dar lugar a una bifurcación para la salida/entrada de ramales.

Finalmente, existe una cuarta tipología considerada en el proyecto que es una variación de la pila martillo, y es la pila martillo excéntrica (*C-bent*). En circunstancias en las que la columna requiere un cierto desfase lateral con respecto al eje del tablero para poder acomodarse a sus

condiciones, se considera este tipo de pila martillo con un voladizo más largo que el otro. Si la excentricidad cargadero-columna es acusada, este tipo de pilas puede requerir postesado de su cargadero e incluso de su columna, además de cimentación con encepado sobre dos o más pilotes.

3.2. Normalización, optimización y métodos constructivos base

La magnitud de la obra y los plazos establecidos para ejecutarla obligan a intentar normalizar y optimizar en la medida de lo posible el diseño y la construcción.

Se persigue la filosofía de la normalización de elementos y procesos, repitiendo en la medida de lo posible esquemas y tipologías para evitar acabar con una extensa variedad de elementos diferentes que requieran asimismo medios auxiliares propios. Se recurre asimismo a métodos constructivos en los que se puedan reutilizar los medios auxiliares y que sean además compatibles con el mantenimiento del tráfico en la infraestructura existente.

En base a la anterior premisa, se adopta como principio base la prefabricación de vigas y prelosas de tablero, utilizando vigas estándar de Texas, las vigas *Tx*.

También se homogeneizan los pilotes y las columnas de las pilas, estableciendo una serie de dimensiones a las que ceñirse en la medida de lo posible para poder reutilizar encofrados y otros medios auxiliares.

Las dimensiones de los cargaderos de pila, ya sean cargaderos martillo o cargaderos pórtico, también tienen unas proporciones establecidas para sus dimensiones que hay que tratar de respetar. Un aspecto destacable es que se establece que la dimensión longitudinal de los cargaderos (espesor) se fije en 4'-11" (1.50 m) donde sea posible para evitar que el hormigón caiga en la denominación *mass concrete*, de acuerdo con las especificaciones *AASHTO LRFD* y las que establece *TxDOT* para el proyecto. La denominación *mass concrete* se aplica a elementos de hormigón en los que todas sus dimensiones

superan los 5'-0", e implica tratamientos adicionales y específicos de ejecución y curado que penalizan los plazos de ejecución. De ahí la necesidad de intentar evitar dicha designación apurando el espesor de los cargaderos.

La ejecución de los pilotes se efectúa con técnicas convencionales para su construcción *in-situ*, dada su magnitud. Las columnas de las pilas también son ejecutadas *in-situ* de forma convencional. Por su lado, los cargaderos se proyectan inicialmente para ser todos ejecutados *in-situ*, pero durante el desarrollo del proyecto se estudia la posibilidad de su prefabricación, lo cual finalmente se aplica a una gran parte de los mismos, como se detalla en el epígrafe 4.4.

Para minimizar la afección al tráfico durante la instalación de vigas, se estudió en las primeras fases del proyecto la posibilidad de utilizar un lanzador de vigas. Sin embargo, los resultados de los estudios acometidos llevaron a descartar dicha solución debido a los problemas que podía ocasionar en las esbeltas pilas pilote. Se comprobó que el izado de las vigas cargándolas desde un lateral del futuro tablero podría producir unas deformaciones laterales excesivas en las columnas. Aunque no revisten importancia en la fase constructiva, y no existe ningún límite establecido para las mismas, el problema de estas deformaciones reside en el hecho de que son tan grandes que propician la aparición de fisuras de tal magnitud que no se puede garantizar su cierre al finalizar la construcción, lo que se traduce en que es muy probable que queden deformaciones remanentes y fisuras vistas en las columnas al finalizar la construcción, lo cual no es aceptable. Debido a estos potenciales problemas, se decidió finalmente desestimar el uso del lanzador de vigas y emplear en su lugar izado convencional mediante grúas.

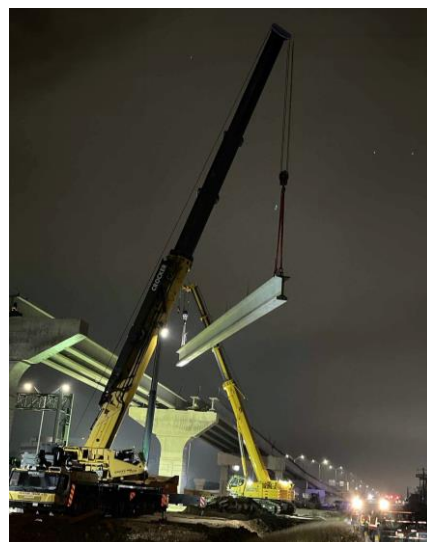


Figura 4. Izado nocturno de vigas

También se analizaron otras posibilidades de optimización de otros procesos conforme avanzaba el diseño y la construcción, como el empleo de un lanzador de prelosas, o el diseño de vigas de borde con cabeza superior ensanchada para conformar el voladizo. Tampoco estas soluciones fueron adoptadas, utilizándose finalmente métodos más convencionales (izado de prelosas con grúa y ejecución de voladizos *in-situ* con encofrados y puntales o *brackets*).

4. Tipologías características

4.1. General

Se presentan en los siguientes epígrafes las tipologías de elementos estructurales que más han caracterizado el proyecto, profundizando un poco más en sus aspectos más interesantes.

4.2. Tableros de vigas pretensadas

La práctica totalidad de los vanos comprendidos en el ámbito de proyecto de Torroja Ingeniería se resuelven con tableros de vigas prefabricadas de hormigón pretensado, de los tipos estándar de Texas Tx62 y Tx70, y el tipo especial Tx82 en vanos cuya longitud supera los 160 ft.

Cabe destacar que las vigas Tx son vigas doble-T con alas inferiores de grandes dimensiones, lo que permite maximizar el

número de cordones a utilizar y, por tanto, su eficiencia. Sin embargo, la normativa vigente en Texas impone un límite de 6.0 ksi para la resistencia al vacío, f'_{ci} , lo que condiciona dicha eficiencia, ya que restringe el número de cordones que se pueden emplear. Como consecuencia, se tiene que:

- Se reduce la longitud de vano máxima alcanzada con un determinado tipo de viga.
- Para alcanzar la luz máxima, se necesita un mayor número de vigas, reduciendo el intereje máximo.

Esta es una limitación de reciente implantación que, en proyectos *Design & Build*, impacta únicamente en los plazos de ejecución en lo que respecta a la resistencia alcanzada a las 24 h de fabricación de la viga, pero no en los costes de material. Incrementando este tiempo a 48 h, se alcanzarían resistencias superiores a esos 6.0 ksi. Teniendo estos aspectos en cuenta, 50 de los 141 vanos se diseñan con vigas $Tx62$ o $Tx70$ con un valor de f'_{ci} de hasta 6.5 ksi (valor, a su vez, correspondiente a la antigua limitación existente en Texas). Esto permite aumentar el número de cordones que puede albergar cada viga, lo que redundará en incrementos en las luces alcanzadas de entre 3 y 5 ft, así como en reducciones del número de vigas necesarias en determinados vanos. También permite sustituir vanos inicialmente proyectados con vigas metálicas por vanos de vigas de hormigón.

En el diseño de estas vigas, además, es esencial considerar el impacto del tiempo transcurrido desde su fabricación hasta su instalación y el posterior hormigonado de la losa del tablero. Durante este período, las vigas desarrollan una contraflecha cuya evolución es más acusada durante los primeros meses.

Este aspecto condiciona directamente tanto la geometría final del tablero como el propio diseño del pretensado de la viga. Por un lado, en el cálculo del espesor del recrecido de la losa (*haunch*) intervienen diferentes parámetros, siendo la contraflecha el que más contribuye a su incremento, especialmente en los vanos de mayor longitud. Por otro, la carga adicional que

supone en las vigas el hormigón empleado en dicho recrecido no es despreciable en el diseño.

Dada la incertidumbre en cuanto al período de tiempo que puede transcurrir entre la fabricación y acopio de las vigas y su instalación, existe una amplia variabilidad en el valor de la contraflecha y, en consecuencia, en el del espesor mínimo requerido para el recrecido. Tomando como base las directrices proporcionadas por el equipo de Construcción con relación a los plazos habituales, se han definido los siguientes criterios de diseño:

- La geometría final del tablero debe ajustarse al valor máximo de la contraflecha tras el máximo tiempo de acopio esperado. En este sentido, en el cálculo del espesor del recrecido en la línea entre apoyos, debe considerarse un período de 365 días entre la fabricación de la viga y el hormigonado de la losa.
- La viga debe ser diseñada teniendo en cuenta la carga muerta adicional debida al recrecido cuando el intervalo de tiempo entre la fabricación de la viga y el hormigonado de la losa es menor, ya que la evolución de la contraflecha será inferior a la prevista inicialmente. En este sentido, se ha considerado la contraflecha que desarrollaría la viga en un intervalo de 60 días.

4.3. Pilas martillo tipo “mono-shaft”

Las pilas martillo de columna y pilote únicos han sido las más ampliamente utilizadas en el proyecto debido a la mínima huella de su planta, que las hacen idóneas para poder encajarlas en el restringido espacio disponible. Además, la ejecución de su cimentación, un único pilote, evita excavaciones y los sostenimientos asociados, que además de aumentar tiempos de ejecución son más invasivos con respecto al tráfico de las calzadas existentes.

Esto es posible debido a uno de los aspectos más llamativos del proyecto, y es la conexión directa del pilote con la columna. Se trata de conectar dos secciones muy distintas y en absoluto coincidentes, pues el pilote tiene

sección circular de gran diámetro y las columnas son generalmente rectangulares.

Este tipo de conexión, sin ningún tipo de elemento intermedio que proporcione una transición entre las armaduras de uno y otro lado, es sin embargo muy habitual en aquella y otras regiones de los Estados Unidos, y se lleva utilizando ampliamente con éxito desde hace ya bastante tiempo. Tanto es así que la norma *AASHTO LRFD*, así como las normativas de algunos estados, recogen algunas prescripciones relativas a su diseño.

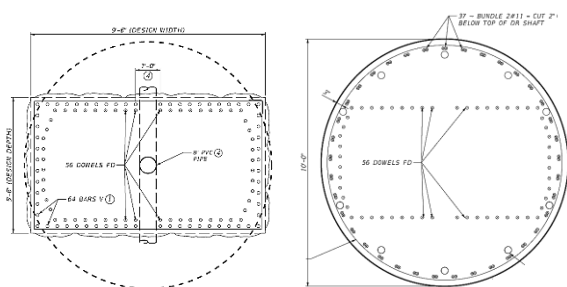


Figura 5. Armadura de conexión entre un pilote de 10 ft y una columna de 10x6 ft

El aspecto que quizás resulta más curioso a ojos de un diseñador europeo es cómo se consigue el empalme de las armaduras de uno y otro lado. Para poder efectuar el solape entre las barras de la columna y del pilote es necesario utilizar unas barras intermedias (*dowels*) que se acomodan a la sección común de ambos lados en la interfaz. Pero estas armaduras quedan en algunas regiones muy lejos de las armaduras con las que se deben solapar.

En esas regiones se diseña lo que se conoce como un solape sin contacto o *non-contact lap splice*. Existe un estudio elaborado por el *Washington State Department of Transportation (WSDOT)*, el *WA-RD-417.1* [4] que, apoyado en ensayos empíricos, demuestra que disponiendo la adecuada armadura transversal de confinamiento alrededor de las barras a solapar, y aumentando la longitud del solape por encima de la de un solape en contacto ordinario, se puede conseguir un solape efectivo entre barras muy distanciadas. De hecho, la formulación existente en la norma *AASHTO LRFD* relativa a este tipo de solape se basa en este estudio.

En esencia, el solape sin contacto es posible debido a las bielas ideales inclinadas que se asume que se movilizan entre dos barras coplanares a empalmar, separadas y traccionadas en direcciones opuestas. La componente horizontal de dichas bielas debe ser compensada con la armadura horizontal de confinamiento, que debe envolver la armadura vertical principal. En base a este esquema se establece la formulación aplicable, inicialmente concebida para una probeta circular, pero extrapolable a secciones rectangulares

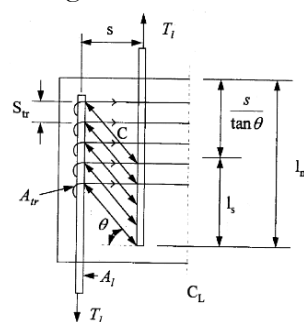


Figura 6. Esquema asumido de bielas y tirantes (Figura 2 del informe *WA-RD-417.1*)

La existencia de normativa que contempla este tipo de conexión (aparte de la *AASHTO LRFD*, las propias especificaciones del proyecto incluyen disposiciones y formulación similares) ha permitido su utilización, encontrándose en todo el proyecto un gran número de conexiones directas entre columnas rectangulares y pilotes circulares. El principio también se extrapola a las conexiones entre columnas y cargaderos entre los que existen cambios bruscos de sección.

4.4. Cargaderos prefabricados

En el transcurso del proyecto, se estudia la viabilidad de cambio de solución de cargaderos ejecutados *in-situ* a prefabricados. El cambio de solución tiene como principales objetivos acelerar la construcción y minimizar las afecciones en el emplazamiento.

Este cambio de solución se ha estudiado para 418 emplazamientos diferentes en todo el proyecto, de los cuales 354 se han prefabricado y 54 se han ejecutado *in situ* finalmente. Además, de los 354 cargaderos prefabricados, Torroja Ingeniería ha estudiado y desarrollado 262.

Se ha optado por una solución de cargaderos prefabricados pretensados, lo cual ha permitido reducir los cantos de los mismos. La cabeza de las columnas ha necesitado ser también modificada para adaptarla al cambio de canto del cargadero, y a la conexión requerida.

Para materializar la conexión columna-cargadero se han provisto 64 armaduras de acero distribuidas en cuatro grupos en las esquinas de las columnas y dispuestas en círculo. El cargadero cuenta con cuatro orificios coincidentes con esas esperas, materializados mediante tubos de acero corrugado, que se “enhebran” con las esperas en la instalación, para después ser inyectados con lechada completando la conexión.

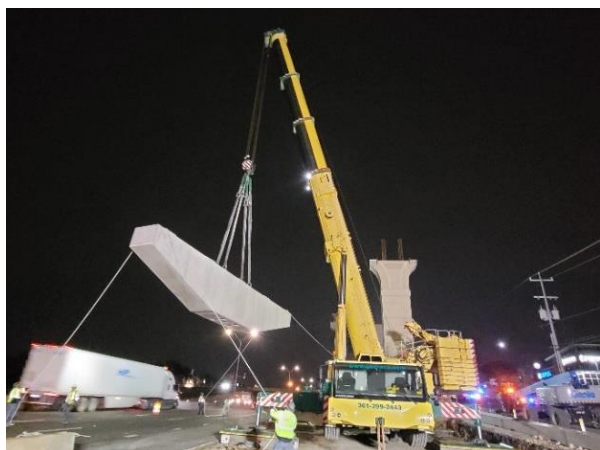


Figura 7. Instalación nocturna de cargaderos

El reducido canto del cargadero y la consecuente reducida longitud de las esperas no permiten que se desarrolle en algunos casos la longitud de anclaje ordinaria requerida en la conexión. Para que dicho anclaje sea eficaz, se asume un cuelgue de la armadura de las esperas a los cercos del cargadero que la rodean, de acuerdo con el esquema de bielas y tirantes representado en la figura 8.

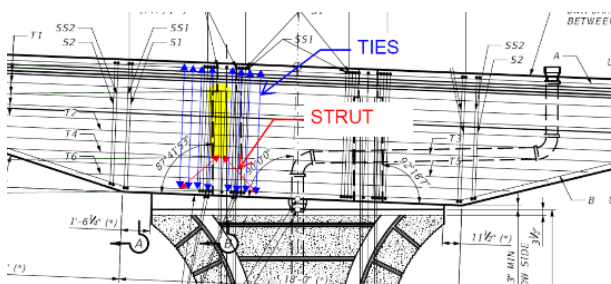


Figura 8. Esquema de bielas y tirantes de conexión columna-cargadero

5. Otros aspectos destacables

5.1. General

A continuación, se exponen brevemente otras tipologías y aspectos del diseño que revisten cierto interés dada su particularidad.

5.2. Pilas tipo “straddle bent” postesadas

Existen a lo largo de la traza varias pilas pórtico o *straddle bents* que permiten el paso bajo las calzadas elevadas de ramales, accesos u otras vías de la autopista.

La mayoría de estas pilas son armadas, con los cargaderos empotrados en las pilas formando un pórtico rígido. Cada columna se cimenta sobre un único pilote mediante la conexión pila-pilote anteriormente expuesta.

Sin embargo, a partir de ciertas luces y en función de la anchura y excentricidad del tablero que soportan los cargaderos, se hace necesario reforzar los mismos mediante tendones postesados. Torroja ha diseñado hasta siete cargaderos postesados sobre parejas de columnas en sus tramos de proyecto, con luces que van desde los 60 ft (18.3 m) hasta los 70.25 ft (21.4 m), y algunos contando además con extensiones en voladizo desde las columnas. En estos casos se dispone en los cargaderos un pretensado con tendones curvos postesados.

Al tratarse ya de luces significativas, y considerando los efectos reológicos magnificados por el efecto del pretensado, en estos casos se articula la conexión entre las columnas y los cargaderos, dejando los cargaderos en esquema de viga simplemente apoyada y reduciendo esfuerzos en las columnas.

5.3. Pilas tipo “C-bent” postesadas

En algunas localizaciones se hace necesario desfasar lateralmente la columna de una pila martillo para acomodarla a las condiciones. Cuando el desfase es tan pequeño que no justifica el uso de una pila tipo *straddle bent*, se

opta por conservar la pila martillo con su cargadero excéntrico con respecto a la columna.

Hay ocasiones en las que la excentricidad es relativamente pequeña (menos 3 ft/90 cm) y no afecta especialmente a la columna ni a la cimentación. En tales casos se conserva la tipología de pila pilote. Pero cuando la excentricidad entre el eje de la columna y el eje del cargadero es significativa (más de 5 ft/1.52 m) se requieren modificaciones sustanciales en la estructura de la pila.

En primer lugar se hace necesario modificar la cimentación, sustituyendo el pilote único por un encepado sobre dos o más pilotes, que sea capaz de soportar los esfuerzos de flexión transversal que el pilote único *mono-shaft* no puede asumir. Este encepado queda también excéntrico con respecto a la columna, pero aproximadamente alineado con el eje del cargadero y, por tanto, con las cargas del tablero.

La excentricidad entre la columna y el cargadero implica que resulta un voladizo significativamente más largo que el otro. Si el aumento del canto del cargadero para hacer frente al diseño del voladizo más grande no es una opción, entonces debe recurrirse al postesado del propio cargadero. El postesado del cargadero se efectúa mediante tendones dispuestos con tendones rectos o curvos.

En otros casos se hace necesario pretensar la propia columna mediante barras postesadas rectas dispuestas verticalmente junto a la cara traccionada de la columna. Este pretensado debe extenderse desde la cara inferior del encepado hasta la cara superior del cargadero. En el caso de que el cargadero también esté postesado, las barras de la columna deben coordinarse correctamente con los tendones del cargadero para cruzarse sin interferencias.

En el ámbito de diseño de Torroja se contabilizan 5 *C-bents* de excentricidades mayores de 3.50 ft, algunas requiriendo pretensado tanto en la columna como en el cargadero.

5.4. Acabados estéticos de pilas

Una particularidad de este proyecto es el requerimiento de utilizar ciertos motivos estéticos impuestos en el acabado de las columnas y capiteles de las pilas.

El proyecto atraviesa dos términos municipales, cada uno de los cuales requiere un tema estético diferente en sus pilas. Los segmentos diseñados por Torroja se encuentran en *Hill County*, y es el tema estético de esta región el que deben adoptar.

Los acabados estéticos de las pilas se ejecutan directamente con el hormigón de las mismas, es decir, los encofrados de las pilas cuentan con relieves para imprimir sobre la superficie de hormigón el acabado requerido.

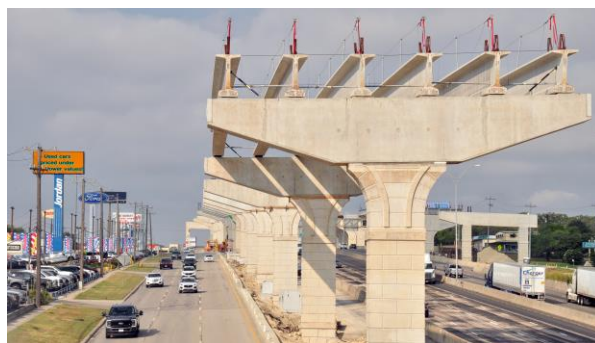


Figura 9. Detalle de acabado estético de pilas

En el caso de *Hill County*, los acabados consisten básicamente en relieves, rugosidades y estrías que producen una imitación de sillares de piedra en las pilas, distinguiendo en la columna dos regiones con distinto acabado en función de la rugosidad y las dimensiones de los sillares, separadas entre sí por una cornisa en relieve. En el capitel se disponen además unos relieves curvos siguiendo la forma lateral del propio capitel, en cuyos hastiales se imprimen también sillares asemejándose a la rosca de un arco de piedra. En general, los acabados estéticos hacen parecer que las pilas estuvieran hechas de mampostería en lugar de hormigón.

5.5. Vano mixto

En el segmento 3545 se encuentra el único vano mixto de todo el ámbito de proyecto de Torroja. Se trata del vano que cruza sobre cuatro calzadas

de la *Highway* I-410 en el centro del enlace entre esta autopista y la I-35, y que debido la luz requerida de 213 ft (65 m) no puede ser resuelto con vigas de hormigón.

Se diseña por tanto este vano mixto compuesto de cinco vigas armadas doble T arriostradas entre sí mediante marcos transversales, y con una losa de hormigón sobre ellas. El canto máximo de las vigas es de 92.25" (2.34 m). La anchura del tablero es de 42 ft (12.8 m).

El vano es isostático y cuenta con juntas de calzada en ambos extremos. Debido al drástico cambio de canto con respecto al vano posterior, el extremo final de las vigas presenta una variación de canto localizada en las cercanías de los apoyos.

5.6. Modelo tridimensional del proyecto

Una particularidad de este proyecto en lo referente a su fase de diseño, y que cabe mencionar, es que se ha utilizado un modelo 3D integrado de todo el proyecto.

Cada disciplina ha elaborado un modelo tridimensional de los componentes del diseño que le conciernen, que queda integrado en un modelo completo de todo el proyecto, incluyendo la mayoría de los componentes integrantes (calzadas, barreras, derrames de tierras, drenajes, señalización, iluminación, estructuras). Torroja ha contribuido elaborando los modelos de las estructuras completas de sus segmentos, que han sido integrados en el modelo tridimensional completo.

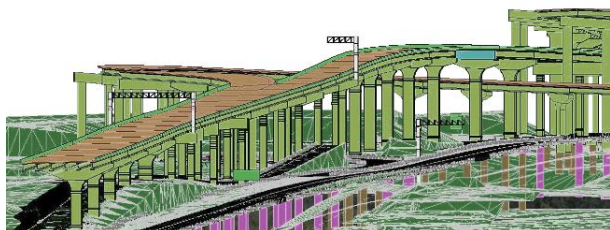


Figura 10. Captura del modelo tridimensional

El modelo tridimensional, unido al uso de herramientas de centralización del trabajo y ámbito colaborativo (ProjectWise, BlueBeam)

ha hecho de este proyecto una experiencia de la metodología BIM.

Agradecimientos

Agradecemos la labor del personal de Ferrovial US implicado en el proyecto, especialmente Juan Boticario, como punto fundamental de contacto con el cliente, así como por toda la ayuda prestada a lo largo de este tiempo. Agradecemos también a nuestros compañeros de Consor Engineers por el apoyo y trabajo conjunto para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- [1] "LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition (2020)", AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)
- [2] "TxDOT Bridge Design Manual"; "TxDOT Bridge Design Guide"; "TxDOT Bridge Detailing Guide"; "TxDOT Geotechnical Manual", Texas Department Of Transportation.
- [3] "TxDOT Design-Build Specifications – Items 10-28", Texas Department Of Transportation
- [4] "WA-RD 417.1: Noncontact Lap Splices in Bridge Column-Shaft Connections", WSDOT (Washington State Department of Transportation), July 1997