

La estructura de la I35 North East Expansion en San Antonio, Texas. Tramo Central-Sur

The structure of the I35 North East Expansion in San Antonio, Texas. Central-Sur Stretch

Miguel Ortega Cornejo^a, Enrique Bordó Bujalance^b, Carlos Gordo Monsó^c, Alfonso Fernández-Pacheco López-Amor^d, Alejandro Martín Arévalo^e.

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. Director General. miguel.ortega@tylin.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. Director del Dpto. de I+D+i. enrique.bordo@tylin.com

^c Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. Jefe de Proyectos Senior. carlos.gordo@tylin.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. Jefe de Proyectos Senior. alfonso.fernandez@tylin.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. alejandro.martin@tylin.com

RESUMEN

La autopista I-35 en San Antonio, Texas, se ha ampliado mediante la adición de 3 carriles complementarios por sentido a lo largo de 30 mi (48 km) en viaducto, construido en el exiguo espacio existente entre la autopista actual y los carriles de servicio, resuelto principalmente mediante tableros de vigas prefabricadas con subestructura de tipo pila-pilote. En este artículo se describen los condicionantes y soluciones propuestas para los elementos principales de la estructura del tramo central-sur, así como las herramientas desarrolladas para poder afrontar de manera eficiente su diseño.

ABSTRACT

I-35 highway in San Antonio, Texas, has been widened with the addition of 3 extra lanes in each direction over a 30 mi (48 km) viaduct, erected within the limited space between the highway main lanes and frontage road, primarily using a precast girder superstructure, and a monoshaft substructure. This paper describes the constraints and proposed solutions for the main structural elements of the Central-south section, as well as the tools developed to efficiently manage its design.

PALABRAS CLAVE: Autopista elevada, vigas prefabricadas, interacción suelo-estructura, pila-pilote.

KEYWORDS: Elevated highway, precast girders, soil-structure interaction, monoshaft.

1. Introducción

Para descongestionar el tráfico en la autopista I35 entre San Antonio y Austin (Texas, EE.UU.), se ha previsto la construcción de 3 carriles adicionales por sentido a lo largo de aproximadamente 30 mi (48 km) en el Noreste de la ciudad. El denso entorno urbano en el que se enmarca esta obra ha motivado que la práctica totalidad del nuevo trazado se construya en forma de viaducto elevado, apoyado en el exiguo

espacio existente entre la actual I35 y los carriles de servicio adyacentes.

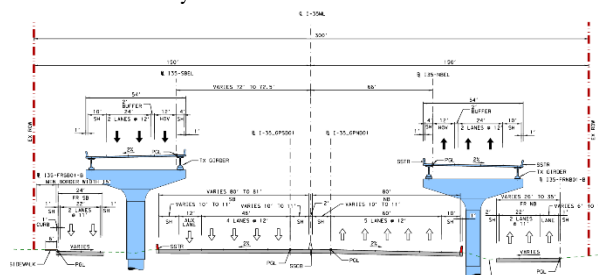


Figura 1. Sección transversal típica de la I35 NEX.

La obra, adjudicada a la *Joint Venture* Alamo NEX Construction (Ferrovia-Webber) en régimen de proyecto y construcción, ha sido diseñada desde la fase de concurso por TYLin en su tramo Central-Sur, aproximadamente entre el aeropuerto de San Antonio y el cruce con Crownpoint Dr. a lo largo de 12.47 mi (20 km) de viaducto elevado. El proyecto incluye el enlace a 3 niveles entre la I35 y la N410.

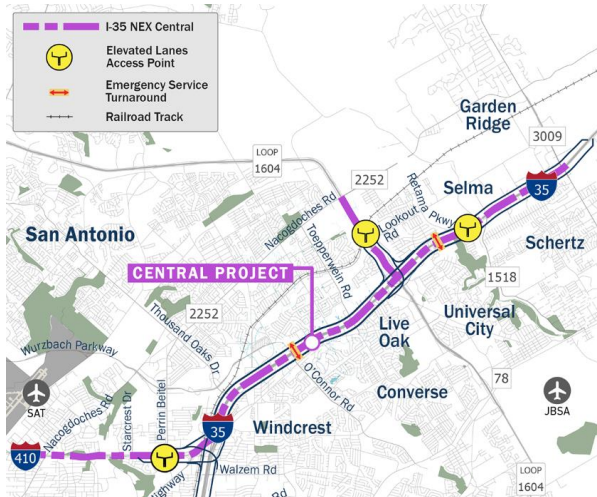


Figura 2. Implantación general de la I35 NEX.

La envergadura del proyecto es colosal, ya que involucra el diseño y construcción de 407 pilas, 484 pilotes, y 2174 vigas. Los plazos aproximados para completar la construcción son de 6 años, incluidos 2 años para la redacción del proyecto en sus múltiples fases preliminar, intermedia, pre-final, final, y constructiva de manera simultánea entre diferentes subsegmentos.



Figura 3. Vista general del enlace entre I35 y N410 durante su construcción.

2. Condicionantes geométricos y funcionales

Los condicionantes fundamentales del proyecto son, por una parte, la densidad de servicios afectados y servidumbres que atraviesan la obra, inherentes a los proyectos en un contexto urbano, y por otra el pequeño espacio existente para la implantación de pilas y cimentaciones de los viaductos.

De entre los obstáculos a cruzar por la estructura, los más relevantes son el cruce sobre los arroyos Salado, Quali, y Perrin Beitel Creek, una línea de ferrocarril de Union Pacific, los cruces de las calles Perrin Beitel, Weidner, y O'Connor, así como el enlace existente entre las actuales I35 y N410. Los obstáculos de menor entidad corresponden a una densa red de canalizaciones de agua y gas, colectores de pluviales, líneas eléctricas aéreas, así como paneles de señalización, y otras infraestructuras eléctricas y de comunicaciones de las carreteras existentes.

El escaso espacio para ubicar la subestructura es el gran condicionante de la tipología estructural. El espacio reducido obliga a cimentaciones de la menor dimensión posible en planta, de tal manera que por una parte se facilite su implantación sin afectar a los servicios mencionados, y que por otra parte se reduzca al mínimo las posibles afecciones a las carreteras existentes que continúan soportando un denso tráfico durante la construcción, limitando los desvíos y ramales temporales. De esta manera, resulta necesario diseñar estructuras ligeras de vanos relativamente cortos.

3. Descripción de la solución estructural

3.1. Superestructura

Para afrontar la construcción de un proyecto de estas dimensiones, con un alto grado de similitud entre elementos, la opción estructural

prefabricada resulta la más natural, de manera que se puedan minimizar, en la medida de lo posible, las operaciones de hormigonado in situ. La tipología estructural escogida para el tablero ha sido la tradicional en Texas de vigas prefabricadas, pretensadas con trazado poligonal en lugar de con torones parcialmente enfundados.

Los cantos de las vigas empleadas oscilan, dependiendo de la longitud del vano a cubrir, entre 28" y 82" ($\approx 0,7$ m y $\approx 2,0$ m), siendo la configuración más habitual para una luz de 145' (44,20 m) entre ejes de pilas y ancho de tablero de 54' ($\approx 16,5$ m) con voladizos de 3.5' (≈ 1 m), vigas de 70" ($\approx 1,80$ m) con una separación de 9.4' ($\approx 2,90$ m).



Figura 4. Vista general de la superestructura de un tramo tipo de viaducto durante la construcción.

Para la selección de esta configuración tipo, que condiciona en gran medida el proyecto completo, así como para la verificación rápida de diferentes alternativas viables en las múltiples zonas donde la configuración tipo no era viable, se desarrolló desde etapas muy tempranas del proyecto un estudio de máxima luz alcanzable para diferentes alternativas de canto y separación de vigas cuyos resultados se resumen en Tabla 1.

Tabla 1. Estudio de luces máximas.

Separ.	Tx46"	Tx54"	Tx62"	Tx70"	Tx82"
7'	115'	129'	142'	154'	173'
8'	113'	127'	140'	152'	170'
9'	109'	122'	135'	148'	165'
9.4'	107'	120'	135'	146'	163'
10'	104'	117'	132'	144'	160'
11'	101'	114'	128'	139'	155'
12'	96'	110'	123'	133'	149'

Las vigas son de hormigón $f_c = 8.5$ ksi (≈ 60 MPa) y en general tienen una resistencia a edad temprana de $f_{ci} = 6$ ksi (≈ 42 MPa) llegándose en casos excepcionales a 6.5 ksi (≈ 45 MPa) para incrementar la luz máxima aproximadamente 5'. El tablero se completa con una losa de espesor 8.5" hormigonada sobre prelosas pretensadas colaborantes de 6".

Las juntas de dilatación se establecieron típicamente cada 3 vanos, de tal manera que no se alcanzara una longitud entre juntas superior a 435' (≈ 132 m), que es la que produce los movimientos de dilatación y contracción máximos capaces de ser asumidos por una junta estándar de Texas.

Algunas zonas del proyecto, debido a los condicionantes geométricos, requieren de luces mayores en trazado curvo que se resuelven mediante 4 tableros mixtos hormigón-acero isostáticos, de luces comprendidas entre 240' y 267' (≈ 69 m y 81 m respectivamente), y un tablero mixto hormigón acero continuo con un reparto de luces de 220'+320'+227' (≈ 67 m + 97 m + 69 m), y un canto de 125" de viga metálica y 8.5" de losa ($\approx 3,18$ m y 0,22 m respectivamente), lo que supone una relación canto/luz $\approx 1/29$.



Figura 5. Vista de un vano metálico.

El diseño de estos tramos metálicos se ha realizado adhiriéndose estrictamente a las prácticas habituales en Texas [3], que no consideran apropiados elementos comunes en otros puentes como la doble acción mixta, las células en platabandas, o incluso la contribución de la armadura pasiva de losa a negativos. El montaje de la estructura metálica se realiza mediante el ensamblado con tornillos pretensados de 7/8" sobre apeos provisionales.

3.2. Subestructura

Como se ha indicado anteriormente, las dimensiones de la subestructura, y en particular de la cimentación, son el condicionante fundamental de la obra. Para reducirlas al máximo, y dado el entorno geotécnico moderadamente favorable que cuenta con una capa de suelo de alrededor de 15', al que sigue un estrato de roca meteorizada de aproximadamente 25', y bajo el que se encuentra una roca caliza competente, se ha recurrido típicamente a una subestructura en forma de pila-pilote con pilotes de gran diámetro en el rango de los 8' y 10' ($\approx 2,45$ m y 3,0 m respectivamente).



Figura 6. Armadura de pilote de 8' de diámetro.

Las tipologías de la subestructura consisten en pilas martillo simétricas, pilas martillo excéntricas, y pilas pórtico de 2 o más fustes en función del ancho de la superestructura y de la disposición relativa de los obstáculos a salvar.



Figura 7. Vista de una pila martillo simétrica.

Para los dinteles de las pilas martillo simétricas se desarrollaron diseños tanto en versión de hormigonado *in-situ* como prefabricado, por los que la constructora se decantaría en función de los plazos concretos de ejecución y/o suministro según avance la construcción. El detalle de conexión de ambas alternativas difiere, de tal manera que la *in-situ* se realiza mediante la proyección de las esperas verticales del perímetro del fuste, mientras que la prefabricada se realiza mediante 4 “enchufes” formados por grupos de barras verticales zunchados por una espiral que los rodea. Estos enchufes se insertan en 4 huecos en la pieza prefabricada formados por tubo corrugado que se inyecta con grout en última fase.



Figura 8. Detalle de conexión fuste-dintel de pila martillo. (izda.) *In-situ*. (dcha) Prefabricado.

El detalle de conexión del pilote con el fuste se realiza mediante armaduras de conexión embebidas tanto en el pilote como en el fuste de la columna, y que se conectan a los armados de uno y otro mediante solapes a distancia para los cuales el pliego de concurso establece criterios de diseño específicos. Estas armaduras de conexión, siguiendo la práctica habitual en Texas, se colocan en el pilote inmediatamente después de su hormigonado, pinchándolas en el hormigón aún fresco.



Figura 9. Armadura de conexión pila-pilote colocada a posteriori del hormigonado del pilote.

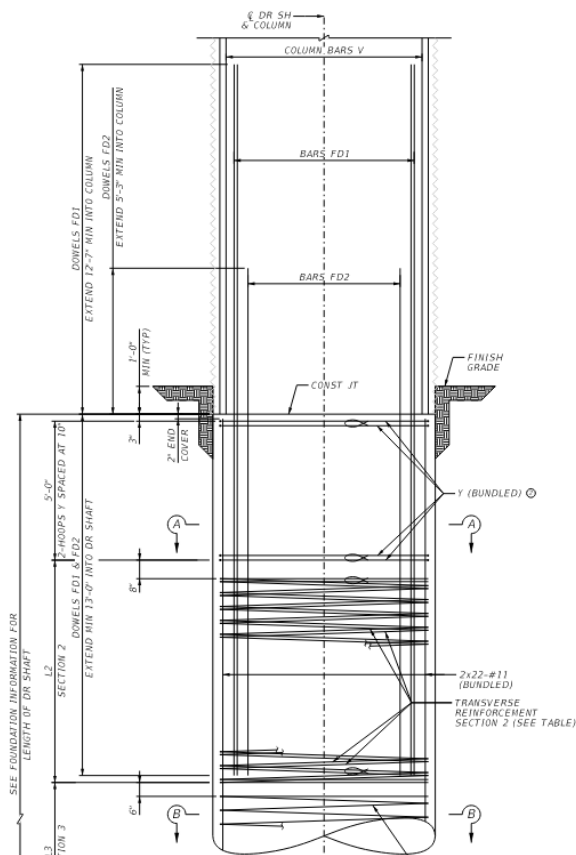


Figura 10. Detalle de conexión pila-pilote.

Las pilas martillo con excentricidad se plantearon con dos tipos de cimentación diferente. Para excentricidades pequeñas de hasta 3' y alturas de hasta 60' (≈ 20 m) se plantearon con pila-pilote de 10' (≈ 3 m) de diámetro, mientras que para excentricidades mayores se plantearon con encepados de 4 pilotes de 6' de diámetro, con el baricentro de los pilotes bajo el centro geométrico del tablero, de tal manera que los pilotes reciban una carga

centrada frente al peso propio y la carga muerta del tablero.



Figura 11. Vista de varias pilas martillo consecutivas con excentricidad elevada.



Figura 12. Vista de varias pilas pórtico consecutivas con 2 y 3 fustes.

El dintel de las pilas pórtico se planteó en hormigón armado hiperestático con continuidad sobre las columnas para aquellos casos de luz más moderada, mientras que para las luces entre columnas mayores se prefirió la opción de hormigón pretensado postesado simplemente apoyado sobre las columnas, y con articulación materializada mediante un detalle similar al de los capiteles simétricos prefabricados, pero con tan sólo 2 “enchufes” por columna.



Figura 13. Detalle de conexión de dos columnas de pila pórtico con dintel in situ postesado.

Para el encaje general de los viaductos, y puesto que debido a que las dimensiones de los elementos de subestructura tienen una fuerte interdependencia con el reparto y modulación de luces (una subestructura grande, aun siendo pila-pilote puede no ser compatible con las distancias mínimas a servicios afectados, y la consiguiente corrección de luces puede trasladar el problema a otra parte del trazado) se desarrollaron aproximadamente 120 alternativas de subestructura tipo con diferentes combinaciones de luz y ancho de tablero, altura de pila, tipología estructural, dimensiones de fuste y cimentación, y condiciones geotécnicas. Mediante el uso de este juego de pilas tipo se consiguió, desde fases iniciales de proyecto, acertar en la elección de luces y tipología de subestructura a la vez que se minimizaba el número de pilas.

Algunas de las dimensiones de subestructura de las alternativas más frecuentes con ancho de tablero de 54' y 145' de luz se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones típicas de subestructura.

Tipo	H	Exc	Pilote	Columna	Dintel
Mart. Simét.	40'	-	8'	5'x8'	10.5'x5'
Mart. Simét.	60'	-	8'	6'x8'	10.5'x6'
Mart. Excén.	40'	3'	10'	6'x10'	10'x6'
Mart. Excén.	60'	3'	10'	6'x10'	10'x6'
Mart. Excén.	60'	4.75'	4x6'	8'x12'	10'x8'
Mart. Excén.	60'	9.66'	4x6'	8'x14'	10'x10'
Pórtico	65'	-	6'	6.5'x6.5'	54'x8'x6'

4. Flujo de trabajo y herramientas desarrolladas para el análisis y diseño de la estructura

4.1 Flujo de trabajo

La superestructura prefabricada se analizó y diseñó mediante el software propio del TxDOT PGSuper, una herramienta muy eficiente y

enfocada al diseño de este tipo de estructuras según las prácticas de Texas. La losa se diseñó según el método empírico de AASHTO y el manual de TxDOT [2] que proponen refuerzos muy estandarizados si las dimensiones de espesores e interejos de vigas se ajustan a ciertos valores tabulados.

Sin embargo, la subestructura requiere de un análisis detallado y más complejo del que pudiera parecer en primera instancia. En efecto, la elección de la tipología de cimentación como pila-pilote, y la presencia de unas primeras capas de terreno de competencia moderada, hace que la interacción suelo-estructura se convierta en un elemento fundamental para evaluar los esfuerzos a los que se ve sometida la subestructura, esencialmente debido a los efectos de 2º orden y a la plastificación lateral del terreno de cimentación.

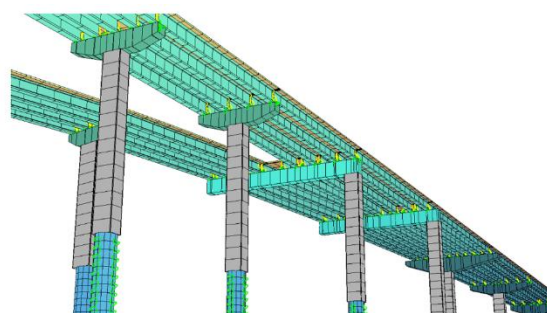


Figura 14. Modelo de análisis de subestructura en Sofistik.

Para el análisis de estos efectos se procedió a realizar modelos conjuntos de superestructura y subestructura en Sofistik, con el terreno de cimentación representado por muelles horizontales lineales. El proceso continúa analizando el modelo y obteniendo esfuerzos de primer orden en cabeza de pilote. Para tener en todo momento del proceso de análisis un control detallado de los efectos de segundo orden, estos esfuerzos de primer orden se amplifican por el coeficiente de amplificación de Euler establecido en el método simplificado de AASHTO [1]. Estos resultados de 2º orden se introducen en un modelo del software de ámbito geotécnico L-Pile capaz de reproducir con fidelidad modelos de comportamiento geotécnico complejos. Se

obtienen desplazamientos del pilote a las diferentes profundidades a las que se han representado los muelles en el modelo de Sofistik, y se evalúan nuevas rigideces de los muelles basados en las curvas P-y a cada una de estas profundidades. Estas nuevas rigideces de terreno se introducen en los muelles de suelo del modelo de Sofistik, y se procede a realizar iteraciones análogas hasta que se encuentra convergencia en los desplazamientos y esfuerzos de iteraciones sucesivas. Una vez que se ha obtenido convergencia de análisis de los esfuerzos, se procede a analizar la estabilidad lateral del pilote mediante un análisis *pushover* según se establece en [4] y [5].

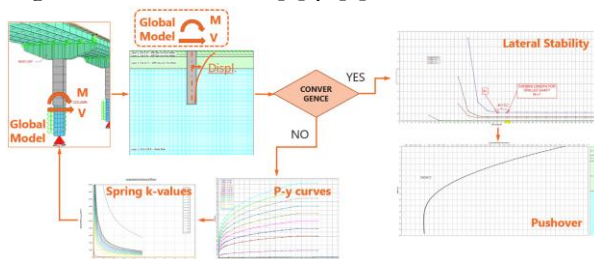


Figura 15. Flujo de trabajo de interacción suelo-estructura con efectos de 2º orden.

Por otra parte, en términos de modelización, no resulta operativo desarrollar modelos completos de segmentos muy largos de viaducto. En consecuencia, se optó por dividir cada segmento (de los 6 segmentos presentes en el tramo diseñado por TYLin) en 3 modelos independientes, que tenían en cuenta al modelo contiguo incluyendo las 2 unidades adyacentes por cada lado, evitando así cualquier “efecto de borde” por no modelizar el tramo completo.

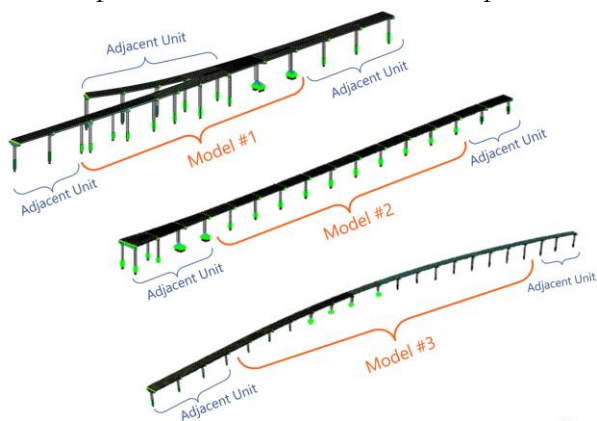


Figura 16. Esquema de análisis de segmento, modelizada en 3 modelos y las unidades adyacentes.

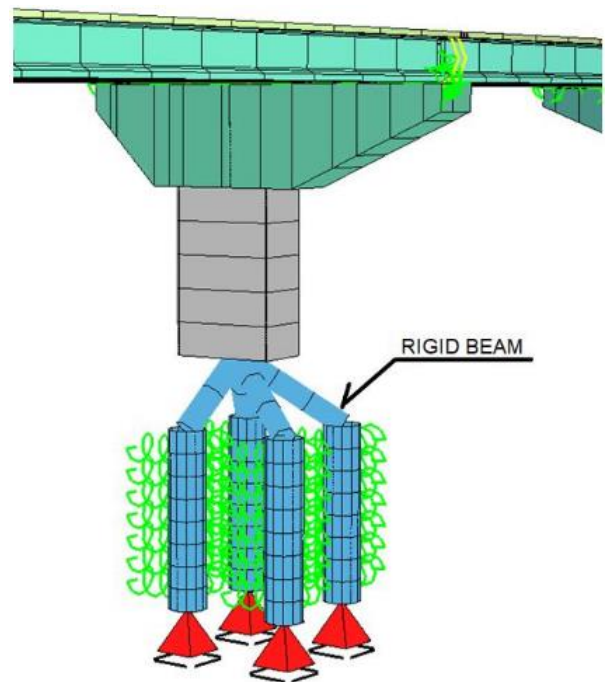


Figura 17. Modelo conjunto de superestructura, pila, y encepado con pilotes.

Con los modelos desarrollados se analizaron también las fases constructivas, durante las cuales la colocación de vigas progresivamente desde uno sólo de los laterales de las pilas podía condicionar la resistencia de la subestructura (con la existencia de momento de cargas permanentes concomitante con un axil reducido).

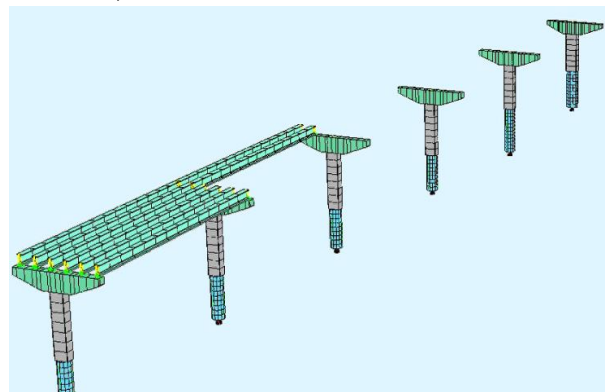


Figura 18. Modelo de análisis en fase constructiva.

Por último, para poder controlar las posibles interferencias y conflictos geométricos que pudieran presentarse entre la estructura proyectada y los servicios afectados existentes, o estructuras correspondientes a otras disciplinas (colectores, conductos, etc.), se desarrolló un modelo geométrico 3D en el que se representaron todos los elementos del proyecto.

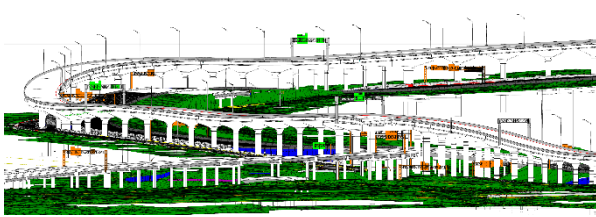


Figura 19. Modelo 3D para control de interferencias y conflictos entre elementos estructurales y servicios afectados.

4.2 Herramientas de automatización

El proyecto de una estructura de esta envergadura dista mucho de ser lineal, y aunque es progresivo a lo largo de las diferentes fases, la interacción permanente entre diferentes disciplinas con propuestas de optimizaciones independientes, así como con la empresa constructora y la propiedad, motiva que elementos tan fundamentales en el diseño de la estructura como son el trazado en planta y alzado, o la posición en superficie de elementos no estructurales con los que no interferir, como colectores o instalaciones, cambien con frecuencia a lo largo del proyecto. Estos cambios afectan notablemente a la distribución de luces y tipología de subestructura. Para poder afrontar con garantía y eficiencia el análisis de una estructura tan evolutiva como se ha comentado (con 6 segmentos, cada segmento con 4 subpaquetes de disposición general, cimentaciones, columnas, y superestructura, y cada uno de ellos con 6 etapas de evolución PRE, INT, PreFIN, ESOC, FIN, y RFC) se implementó un esquema de trabajo centrado en reducir las tareas repetitivas y evitar los errores. Para ello, se desarrollaron un conjunto de herramientas automatizadas para el análisis y preparación de documentos correspondientes a los elementos fundamentales de los viaductos:

- Elementos comunes:

Se implementó una estructura de información con carpetas y ficheros idénticos para describir la geometría, parámetros geotécnicos, etc. que permitió adaptarse fácilmente a los cambios frecuentes. Asimismo, se

desarrollaron herramientas automatizadas para la generación de figuras y extracción de resultados, generación de anejos de cálculo, y generación de tablas a incluir en los planos.

- Análisis de cimentaciones

Se desarrollaron macros para la generación automatizada de modelos de L-Pile basados en una estructura estandarizada de la información, junto con macros que analizaban por lotes dichos modelos, y macros que extraían resultados y los integraban en los modelos de Sofistik.

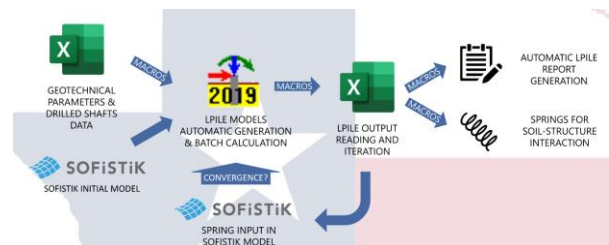


Figura 20. Esquema de automatización de análisis de las cimentaciones.

- Análisis de subestructura

Se implementó la generación automatizada de modelos de Sofistik a partir de archivos de AutoCAD. Dichos modelos partían de configuraciones estandarizadas de geometría y tipos de pilas, y con una interfaz automatizada con los modelos de suelo-estructura y de resistencia geotécnica de cimentaciones.

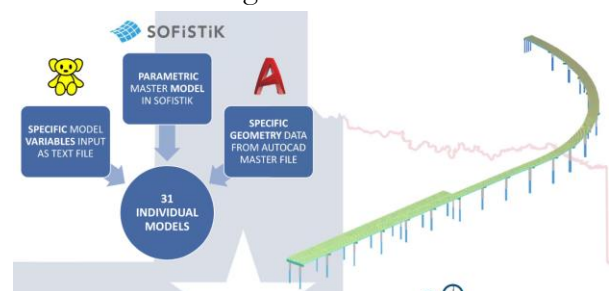


Figura 21. Esquema de automatización de análisis de la subestructura.

- Análisis de superestructura

Se desarrollaron macros para el análisis por lotes de modelos de superestructura en PGSuper, así como una interfaz

automatizada para la extracción de resultados e integración en el proceso también automatizado de diseño de los aparatos de apoyo.

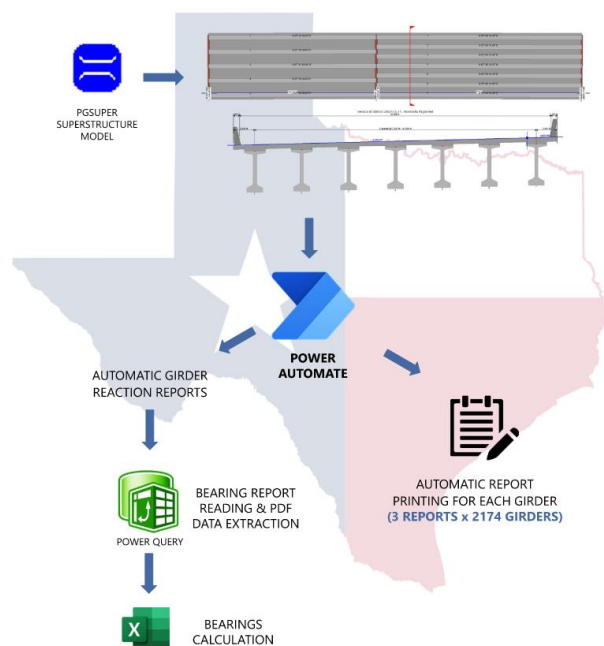


Figura 22. Esquema de automatización de análisis de la superestructura.

Agradecimientos

Agradecemos el trabajo de todo el equipo de Ferrovial y TYLin que ha participado en el proyecto estructural de la I35 NEX, en particular a Francisco Palacios, Juan Boticario, Roberto Cabezas, Luca Redaelli, Francisco José Aguilera, Guillermo Arias, Fernando Canales, Rubén de Pablo, Alicia de Frutos, Jorge Ballester, Álvaro Ramírez, Aleksander Konefal, Alberto Chichón, Paula Ramos, Pieter Goedhart, James Rosales, Hannah Lu, Evans Aguilar, Jaime Ibarra, Avril Díaz, Cristina Hau.

Referencias

- [1] AASHTO (2020) *LRFD Bridge Design Specifications 9th Edition*.
- [2] TxDOT (2021) *Bridge Design Manual*.
- [3] TxDOT (2021) *Preferred Practices for Steel Bridge Design, Fabrication and Erection*.
- [4] FHWA GEC-10 (2018) *Drilled Shafts: construction Procedures and Design Methods*.

- [5] ADOT (2010) *Policy Memorandum ADOT DS-3. Guidance for analysis of drilled shafts under lateral loads*.