

CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE PUENTE PEATONAL DE ENLACE CORPORATIVO ACOPLADO MEDIANTE TRABE PREFABRICADA CURVA A 90° Y SISTEMA GERBER

Armando Aguilar Ruiz¹, Leobardo De la Rosa Sánchez² y David Muñoz Vizuet³

RESUMEN

Se presentan las consideraciones hechas para la correcta ejecución del proyecto estructural de un puente peatonal en curva de 90 grados que funciona como enlace a oficinas corporativas y comercios, con base de elementos estructurales prefabricados atípicos de grandes dimensiones. El procedimiento se describe de forma detallada a través de la ilustración de un ejemplo previamente ejecutado, se describe de forma detallada las consideraciones para mantener la estabilidad de la trabe curva durante el montaje (articulado), debido que la vialidad de alto tráfico impidió colocar apoyos temporales al centro del claro.

ABSTRACT

The considerations made for the right execution of the structural project of a curved pedestrian bridge with 90 degrees that have the function as a link to corporate offices and shops, based on atypical precast structural elements of large dimensions are presented. The procedure is described in detail through the illustration of an example previously already executed, it describes in detail the considerations to maintain the stability of the curved beam during the assembly (pined), because the high traffic road prevented placing supports in the center of the span.

INTRODUCCIÓN

Se plantea desde un inicio, el desarrollo del proyecto estructural a base de elementos prefabricados, esto por la necesidad de librar una vialidad de alta afluencia vehicular en donde la circulación no puede ser interrumpida, si acaso se permite interrumpir la circulación en horario nocturno. El proyecto arquitectónico representa un desafío importante para la solución estructural, ya que, al ser un puente que sirve de enlace para un complejo de oficinas corporativas y comercios, se busca sea icónico en la zona, por lo que reviste especial importancia respetar las formas concebidas en la arquitectura.

ANTECEDENTES

Un puente, no es otra cosa que una estructura formada con materiales diversos, que tiene como objetivo salvar, ya sea un accidente geográfico tal como, valle, un río, una depresión geográfica, etc. O bien, cualquier otro obstáculo físico, como puede ser un camino, una carretera, vía férrea. Incluso se pueden generar sólo con fines de confort en la comunicación de dos puntos.

-
- 1 Líder de Proyecto, Impulsora Tlaxcalteca de Industrias S.A. de C.V., Av. Constituyentes No. 1070, Col. Lomas Altas, 11950 Ciudad de México, Teléfono, 55 1500-8500; armando.aguilar@itisa.com.mx
 - 2 Líder de Proyecto, Impulsora Tlaxcalteca de Industrias S.A. de C.V., Av. Constituyentes No. 1070, Col. Lomas Altas, 11950 Ciudad de México, Teléfono, 55 1500-8500; leobardo.delarosa@itisa.com.mx
 - 3 Subdirector de Ingeniería, Impulsora Tlaxcalteca de Industrias S.A. de C.V., Av. Constituyentes No. 1070, Col. Lomas Altas, 11950 Ciudad de México, Teléfono, 55 1500-8500; david.munoz@itisa.com.mx

Su planeación, proyecto, análisis y cálculo pertenecen a muchas disciplinas, dentro de la cual cobra especial importancia la ingeniería estructural. Numerosos han sido los tipos de diseños que se han aplicado a lo largo de la historia, mismos que son influidos por varios factores, tales como: los materiales disponibles, las técnicas desarrolladas de la época y los factores económicos, entre otros aspectos. Un aspecto relevante al momento de llevar a cabo el análisis y diseño de un puente es la calidad del suelo o roca donde habrá de desplantarse, factores topográficos, geográficos y las obras inducidas presentes del sitio. En la actualidad juega un papel importante el proyecto arquitectónico, al contar con tecnologías innovadoras los desafíos de solución estructural se vuelven cada día mas complejos, con la finalidad de obtener como resultado no solo cubrir la necesidad, sino también cumplir con un aspecto agradable y sustentable.

Existen diferentes usos para puentes:

- Puentes Peatonales.
- Puentes Carreteros.
- Puentes Ferroviarios.
- Puentes Acueductos.
- Etc.

Tipos de puentes:

- Puentes en arco.
- Puente viga.
- Puente Atirantado.
- Puente Colgante



Figura 1. Ejemplo de puente ferroviario contemporáneo

En términos generales, los puentes suelen resolverse en 3 grandes grupos y tipologías, como son: puentes continuos, puentes simplemente apoyados y puentes con sistema tipo Gerber (ver figura 2). De ahí le sigue el proyecto arquitectónico y es en donde las estructuras de los puentes toman diversas formas y diferentes sistemas de apoyos. En el caso que se describe en el presente trabajo existe de hecho una combinación de dos de estos sistemas, que son el puente continuo y el sistema tipo Gerber, en donde se pretende destacar en este caso, el segundo.

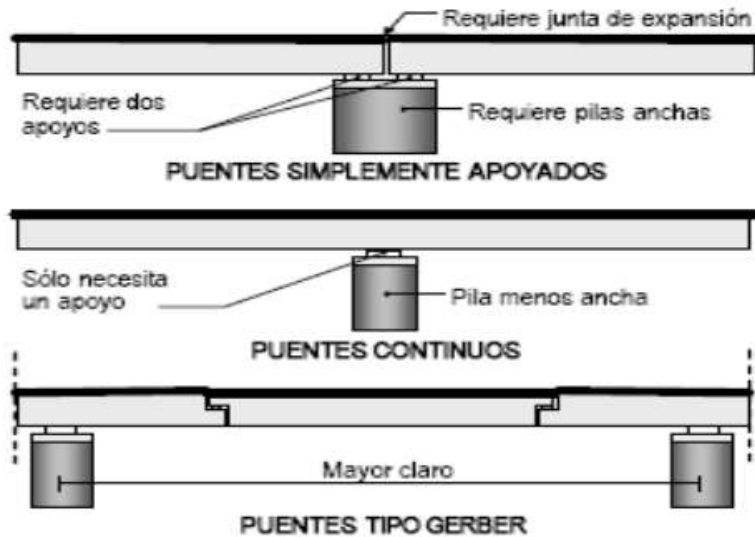


Figura 2. Sistemas de puentes, en función del tipo de apoyo

Como se menciona anteriormente, la estructura del puente motivo del presente, tiene las siguientes consideraciones, uso peatonal, a base de vigas cajón de concreto pretensado, y un sistema tipo Gerber, que en una etapa final se logró tener como un puente continuo.

CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS Y DISEÑO

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura está conformada por 5 traveses prefabricados presforzados, incluyendo una trabe curva para el tramo central. La sección de las traveses prefabricados es tipo cajón, con un ancho superior de 3.00 m e inferior de 2.00 m y peralte de 1.15 m.

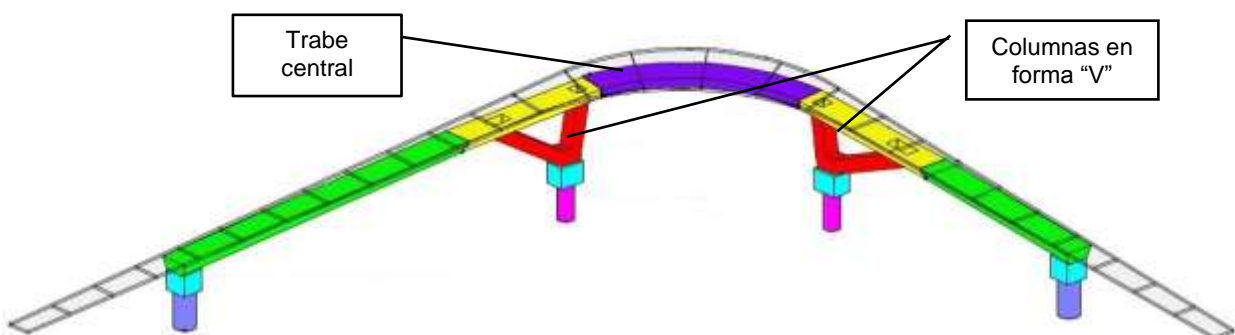


Figura 3. Isométrico de Estructura del Puente

Las traveses se conectan con la losa superior de 0.25m de espesor. La longitud de las losas varía en función del diseño geométrico del tablero. El peralte total de la trabe, incluyendo la losa prefabricada es de 1.40 m.

La estructura se conforma por un marco rígido formado por columnas y traveses conectados en forma continua. Los elementos prefabricados que destacan son las columnas en forma de “V” en los apoyos centrales y la trabe central denominada TCC, con curvatura en el sentido longitudinal y transversal. El sistema es similar al denominado Sistema Gerber, sin embargo, el hecho de mantener la curva en la trabe central y no tener permitido un apoyo central, hace que la solución no sea típica y resuelta con apoyos simples, como sería el caso si el puente fuera recto (ver figuras 3 y 4).



Figura 4. Puente peatonal motivo de estudio

MODELO NUMERICO

Para el análisis estructural y las simulaciones numéricas se utilizaron conjuntamente el programa SAP2000 y ETABS 18 que es un programa basado en el método elementos finitos, en donde se puede realizar la simulación en 2D y 3D, llevando a cabo análisis estáticos y dinámicos, en el modelo analítico se echa mano de elementos barras y cascaron.

En el proyecto se utilizaron concretos de alta resistencia ($f'c=550 \text{ kg/cm}^2$), tanto para los elementos prefabricados pretensados como para las conexiones, acero de refuerzo $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ y para el acero de presfuerzo $f_{pu}= 19000 \text{ kg/cm}^2$.

REVISIÓN DE SUBESTRUCTURA

En el modelo de análisis se considera una interacción suelo-estructura, los desplantes de los apoyos se solucionan mediante pilas de cimentación, siendo 4 pilas las empleadas para este caso, en la modelación de las pilas se asignaron los módulos de reacción horizontal y vertical, indicados en el estudio de mecánica de suelos, esto se aplicó para los diferentes estratos, como se muestra en la figura 5.

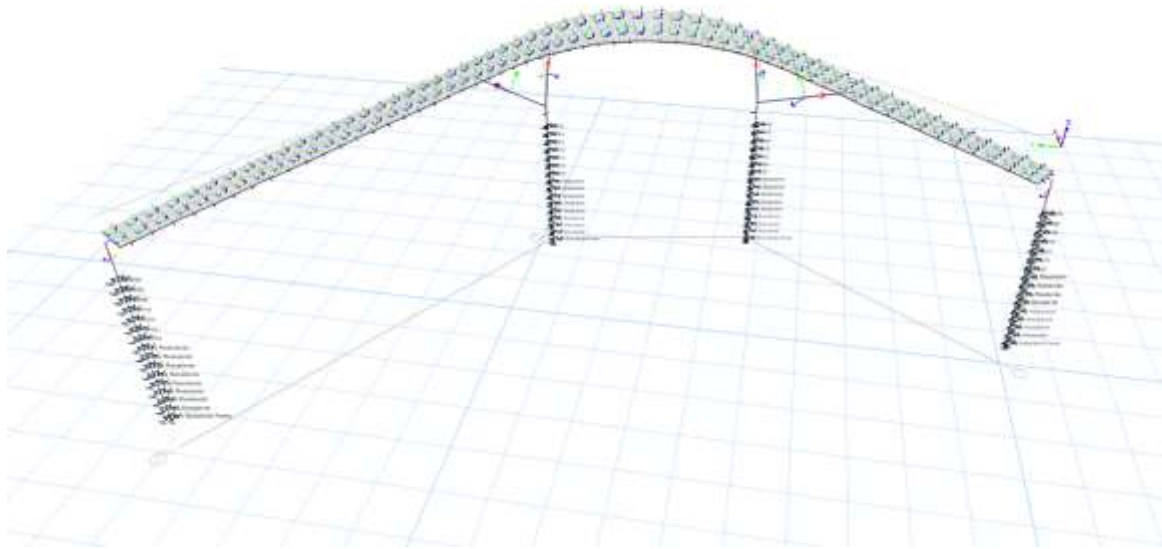


Figura 5. Modelo tridimensional interacción suelo estructura

REVISIÓN DE SUPER ESTRUCTURA

El análisis de la estructura se discretizó en 5 traveses prefabricados y 2 columnas tipo “V” (ver figura 6), en los extremos la conexión fue directamente dado-pila. También se consideraron tabletas prefabricadas para generar los volados y sobre esta un firme de compresión de 25 cm, además se toman en cuenta las cargas producto de jardinería y acabados las cuales tienen valores considerables.

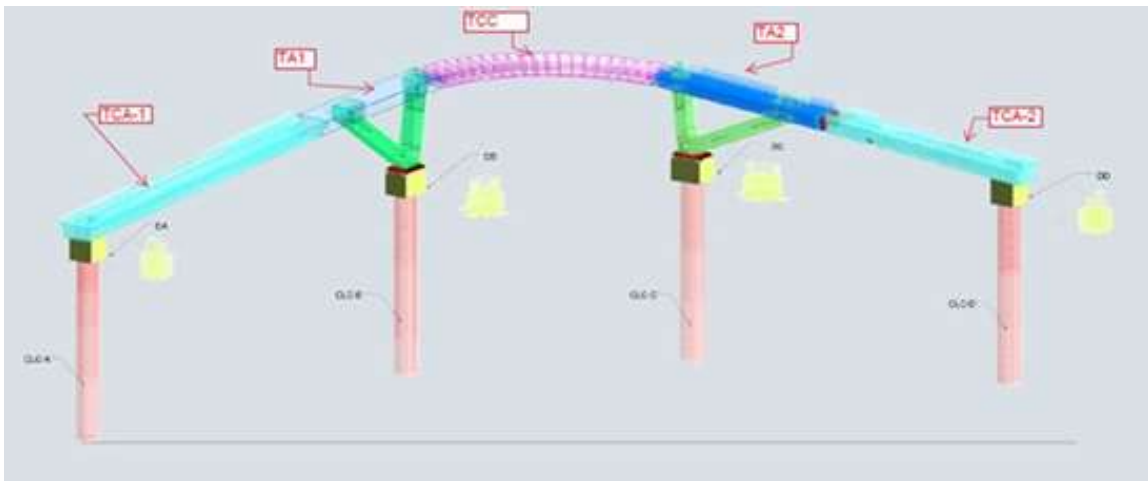


Figura 6. Modelo tridimensional interacción suelo estructura

Los elementos prefabricados pretensados cumplen con las disposiciones y recomendaciones consignadas en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCDCEC) 2017, en temas específicos sobre elementos presforzados.

Se revisan todas las etapas a las cuales es sometido un elemento presforzado (Pretensado):

- Esfuerzos a la Tránsito
- Esfuerzos debido a las pérdidas a largo plazo

- Esfuerzos debido peso propio de losa
- Esfuerzos debido a cargas muertas
- Esfuerzos a carga viva

$$f = -f_p \mp f_{Pe} \mp f_{pp} \mp f_f \mp f_{cm} \mp f_{cv} \tag{1}$$

Se revisaron los esfuerzos permisibles en el concreto, los cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Esfuerzos permisibles en el concreto

Inmediatamente después de la transferencia		Bajo cargas de servicio	
Fibra extrema en compresión	$0.60 f'_{ci}$ (en MPa o en kg/cm ²)	Fibra extrema en compresión: debido al presfuerzo más las cargas sostenidas	$0.45 f'_c$ (en MPa o en kg/cm ²)
Fibra extrema en tensión	$0.25 \sqrt{f'_{ci}}$ (en MPa) $0.80 \sqrt{f'_{ci}}$ (en kg/cm ²)	debido al presfuerzo más la carga total	$0.6 f'_c$ (en MPa o en kg/cm ²)
Fibra extrema en tensión en extremos de miembros simplemente apoyados	$0.5 \sqrt{f'_{ci}}$ (en MPa) $1.6 \sqrt{f'_{ci}}$ (en kg/cm ²)	Fibra Extrema en tensión	$0.5 \sqrt{f'_{ci}}$ (en MPa) $1.6 \sqrt{f'_c}$ (en kg/cm ²)

Refuerzo máximo a flexión:

$$\epsilon_{sp} \geq \frac{\epsilon_{yp}}{0.75} \tag{2}$$

Las deflexiones se limitaron a la siguiente expresión:

$$\Delta = L / 240 \tag{3}$$

Las traveses en su etapa de montaje tienen la consideración tipo Gerber, por lo cual es necesario revisar y analizar el refuerzo en vigas con extremo reforzado, como se indica en la figura 7.

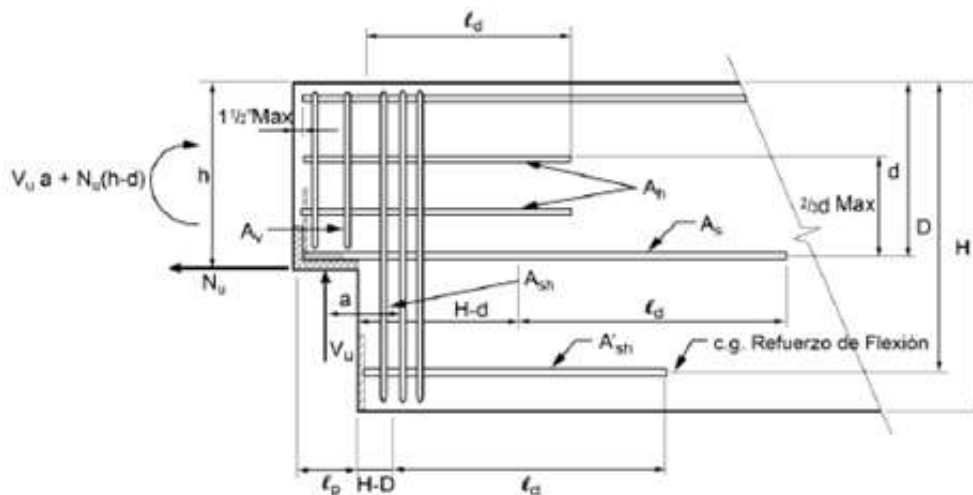


Figura 7. Refuerzo en vigas con extremos tipo nariz

TRABES TA-1 Y TA-2.

A continuación, se describe de forma general el diseño de las traveses TA-1 y TA-2. El análisis se realizó mediante el uso del programa Concise Beam, especializado en elementos prefabricados y basado en el código ACI 318 y PCI.

Posterior al montaje de columnas “V”, la condición crítica se centraba en las traveses TA-1 y TA-2, las cuales se revisaron para cargas de primera etapa “montaje” y la condición de servicio.

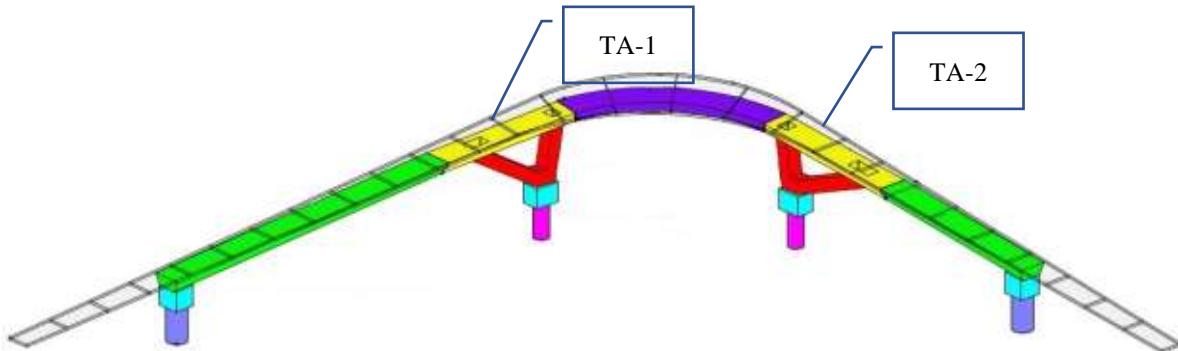


Figura 8. Identificación de las traveses TA-1 y TA-2

De acuerdo con el modelo matemático se obtuvieron los elementos mecánicos mostrados en la figura 9.

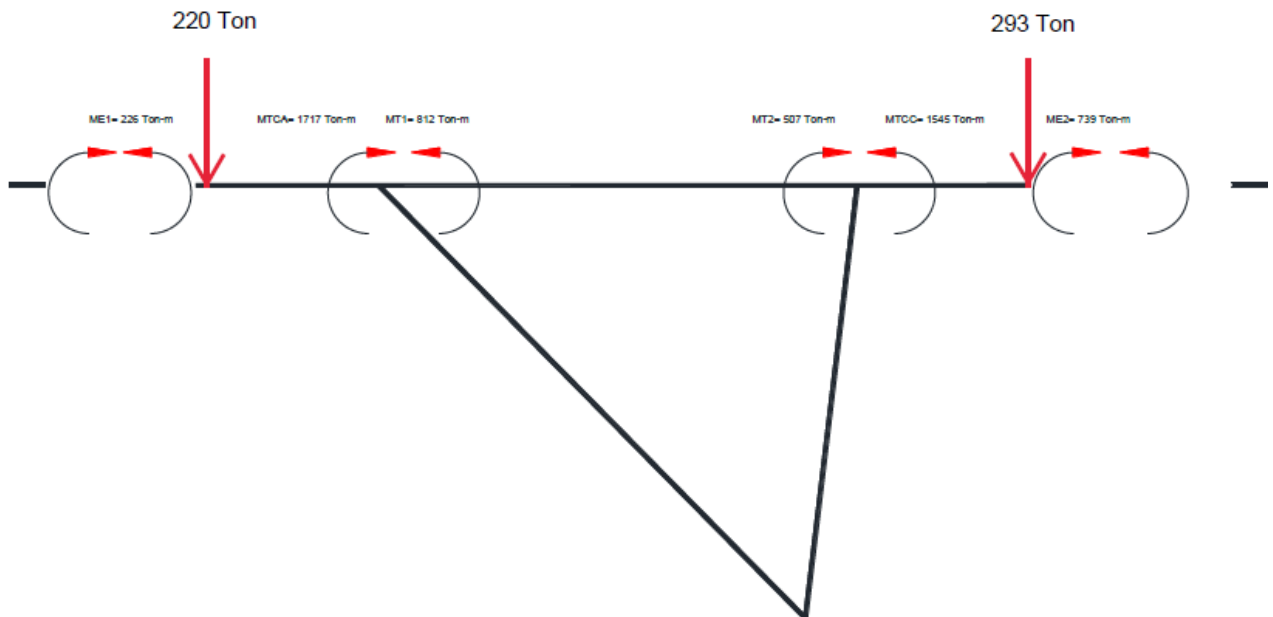


Figura 9. Elementos mecánicos en trabe TA-1

Con el uso del programa Concise Beam, se obtuvieron las revisiones a flexión, cortante, deflexiones, esfuerzos de servicio, etc., a continuación, se muestran algunas imágenes de los diagramas más representativos.

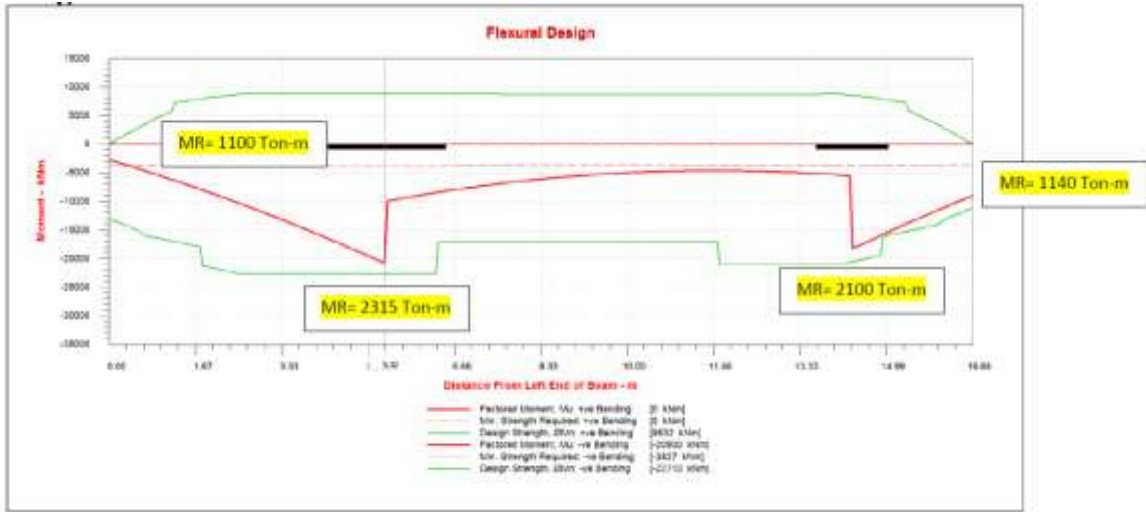


Figura 10. Diagrama de momentos de trabe TA-1

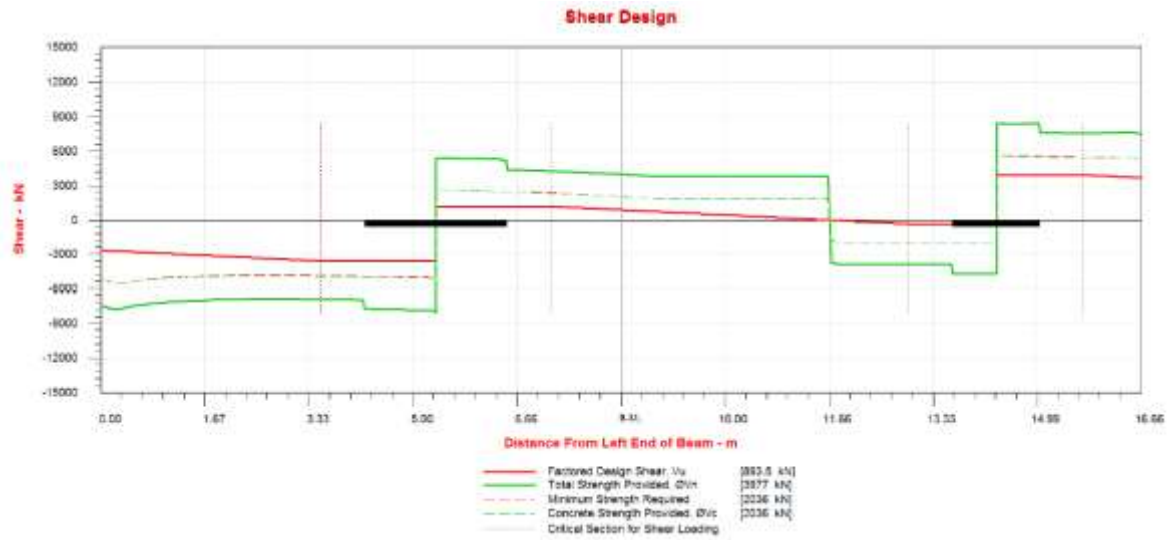


Figura 11. Diagrama de fuerzas cortantes de trabe TA-1

TRABES TCA-1 Y TCA-2.

Posterior al montaje de las traves TA-1 y TA-2, la condición crítica se centraba ahora en las traves TCA-1 y TCA-2, estas traves, como se puede ver en la figura 12, apoyan en el extremo inferior directamente a la cimentación y en el extremo superior directamente en las traves TA-1 y TA-2, respectivamente.

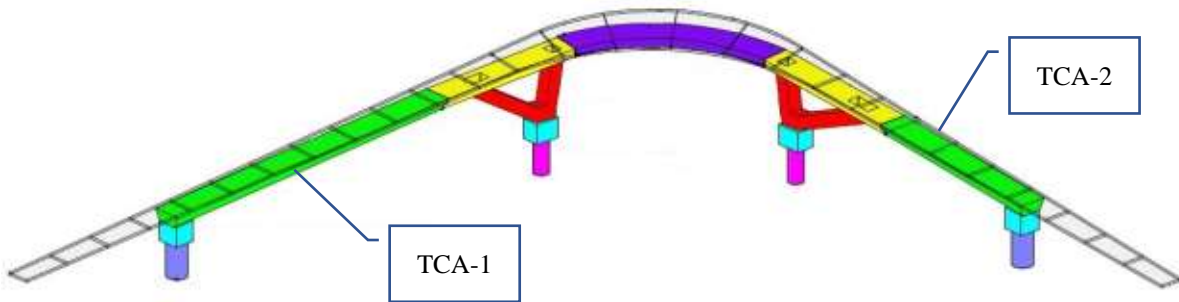


Figura 12. Identificación de las traves TCA-1 y TCA-2

De igual forma, se obtuvieron los elementos mecánicos directo del modelo matemático y la revisión de los elementos presforzados se hizo mediante el uso del programa Concise Beam, de esta manera se obtienen los siguientes resultados.



Figura 13. Elementos mecánicos en trabe TAC-1

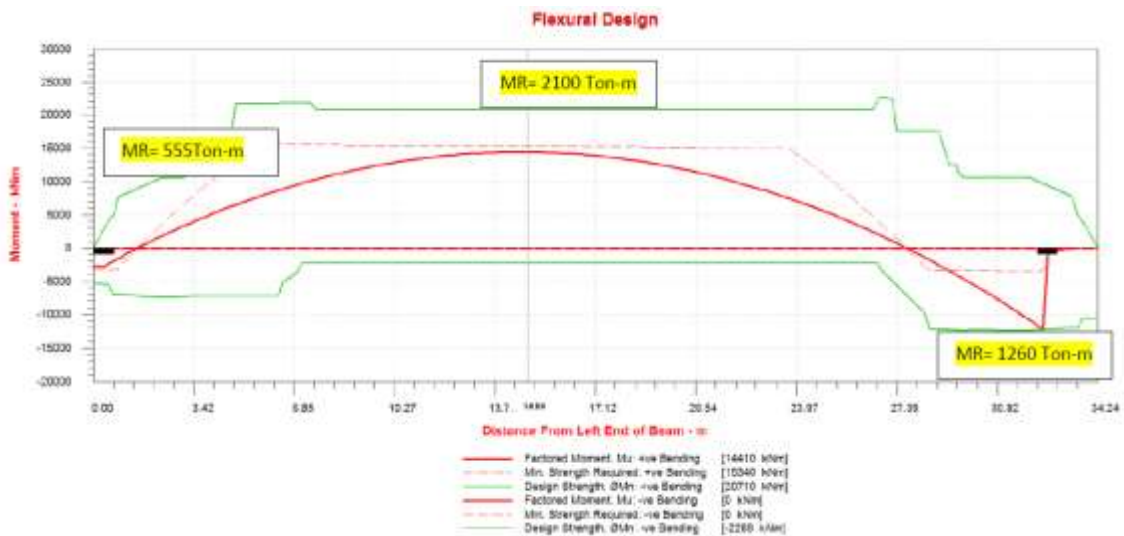


Figura 14. Diagrama de momentos de trabe TCA-1



Figura 15. Diagrama de cortantes de TCA-1

TRABE TCC (CURVA).

La TCC (ver figura 16). es una trabe cajón con una curvatura considerable, respecto a su eje longitudinal, de concreto pretensado es en este caso el elemento que permite enlazar las dos secciones de puente formando un ángulo a 90°, sin ningún apoyo intermedio, durante y posterior al montaje. La trabe TCC se apoyo directamente sobre las traves denominadas TA-1 y TA-2, descritas anteriormente. Durante el montaje la trabe TCC se consideró simplemente apoyada, jugando un papel importante el basarse en análisis de equilibrio estático.

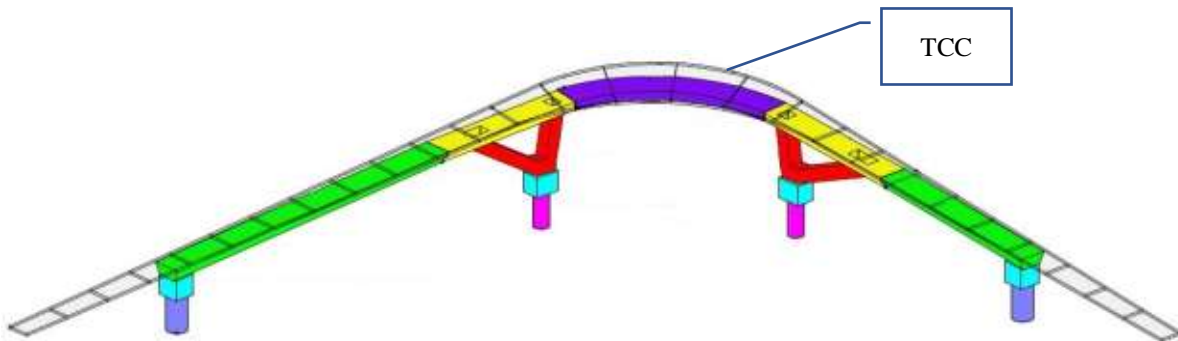


Figura 16. Trabe Central TCC (Curva)

De acuerdo con el modelo matemático se obtuvieron los elementos mecánicos mostrados en la figura 17. Y con la ayuda del programa Concise Beam se obtiene los diagramas presentados en las figuras 18 y 19.

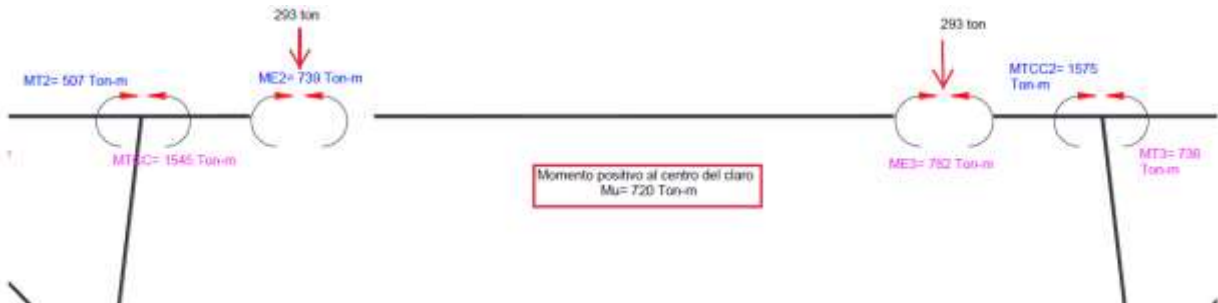


Figura 17. Elementos Mecánicos de trabe TCC

El análisis en Concise Beam se hace mediante la consideración de montaje, en condiciones como simplemente apoyada (ver figura 18).

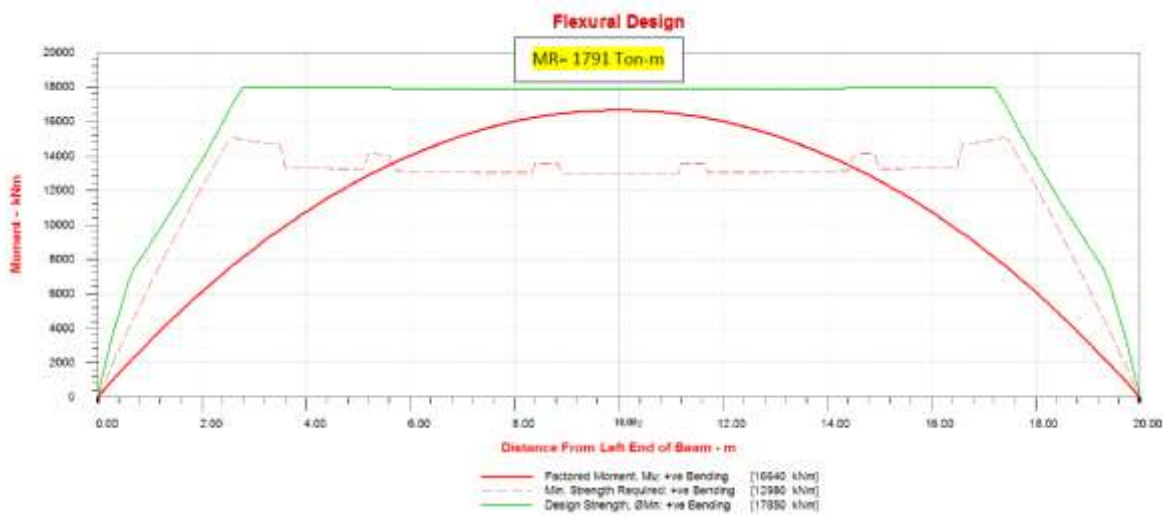


Figura 18. Diagrama de momentos de trabe TCC, etapa de montaje

Asimismo, se hace el análisis en Concise Beam, haciendo las consideraciones pertinentes para el estudio en condiciones de servicio, obteniendo el diagrama presentado en la figura 19.

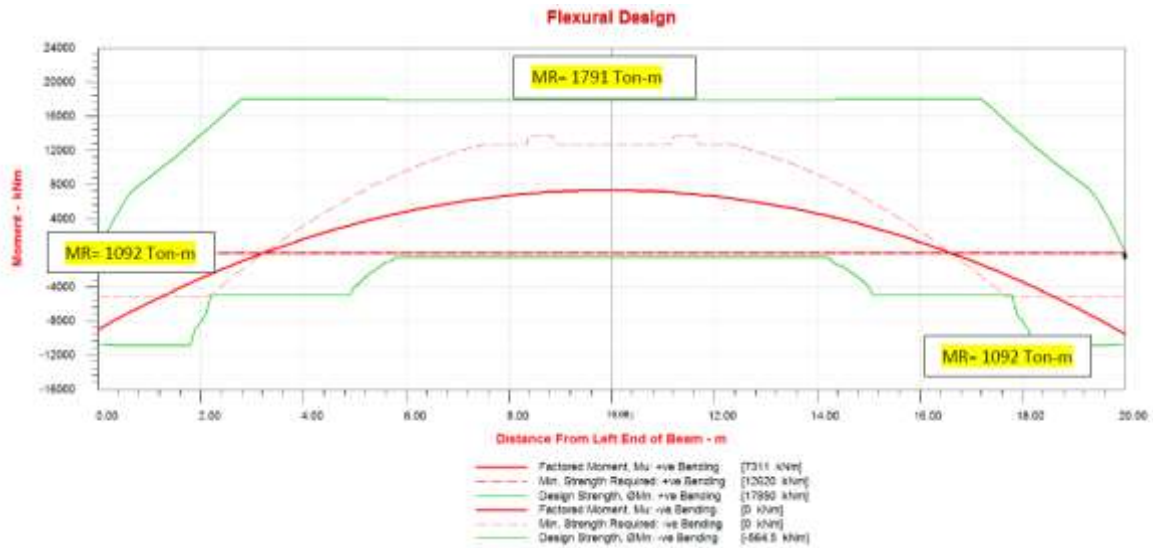


Figura 19. Diagrama de momentos de trabe TCC, en etapa de servicio

Además de los análisis anteriores, a esta trabe se le pone especial énfasis en análisis de los esfuerzos de torsión y flujo de cortante en las paredes del elemento, para ello se consideraron las expresiones definidas en el ACI 318-14. En la figura 20 se describen gráficamente la teoría de esfuerzos de torsión, así como de flujo de esfuerzos cortantes.

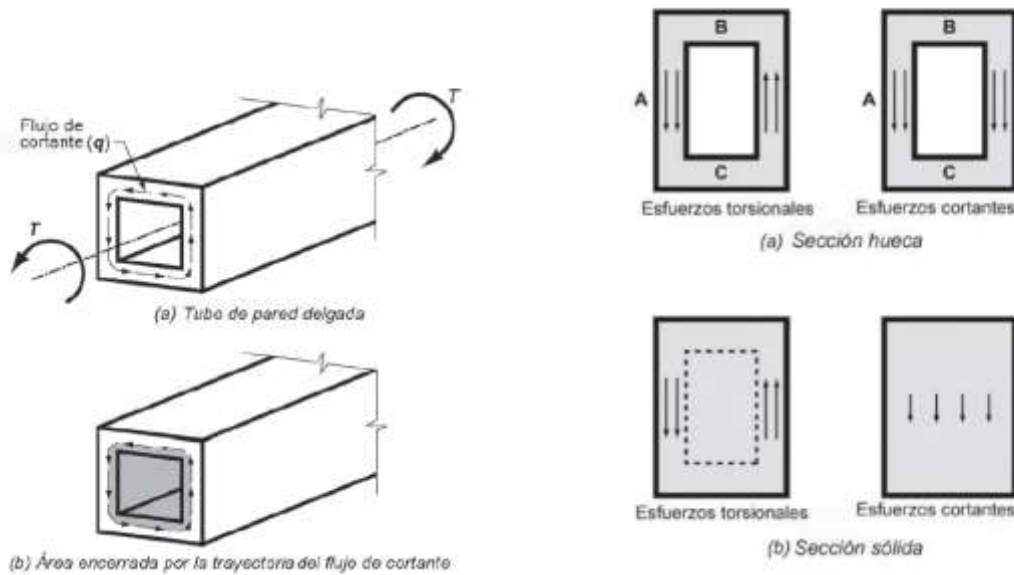


Figura 20. Teoría de esfuerzos torsionales y flujo de cortante

En este caso, el momento torsionante crítico es de 265 ton-m.

Sección Maciza crítica:

Torsiones:

MTu_{TA1-TCC} = 265 Ton-m

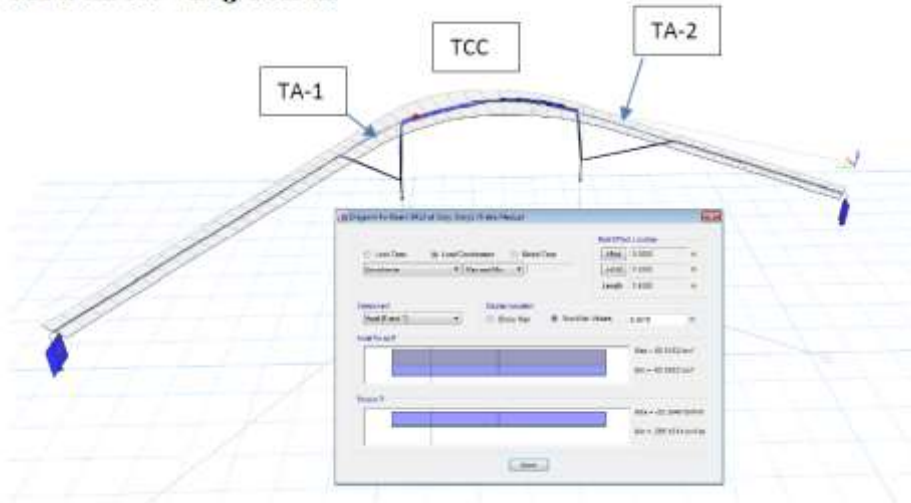


Figura 21. Elementos Mecánicos Torsión

Aplicando las expresiones del ACI 318-14 se obtuvieron los refuerzos necesarios para asimilar las demandas para la etapa de montaje y la de servicio. Para la primera de las 2 etapas se utilizaron aceros de alta resistencia derivado del poco tiempo que se tenía para montar y estabilizar la pieza. Para la etapa de servicio se pasó de la conexión articulada a una conexión continua que garantizara la transmisión de la trabe TCC a las TA de las demandas producidas por las cargas complementarias de peso propio y las de servicio, para asimilar estas demandas fue necesario utilizar cables postensados que las soportaran.

La trabe Curva tiene un arco exterior de 22.35 m y el interior 18.25m.

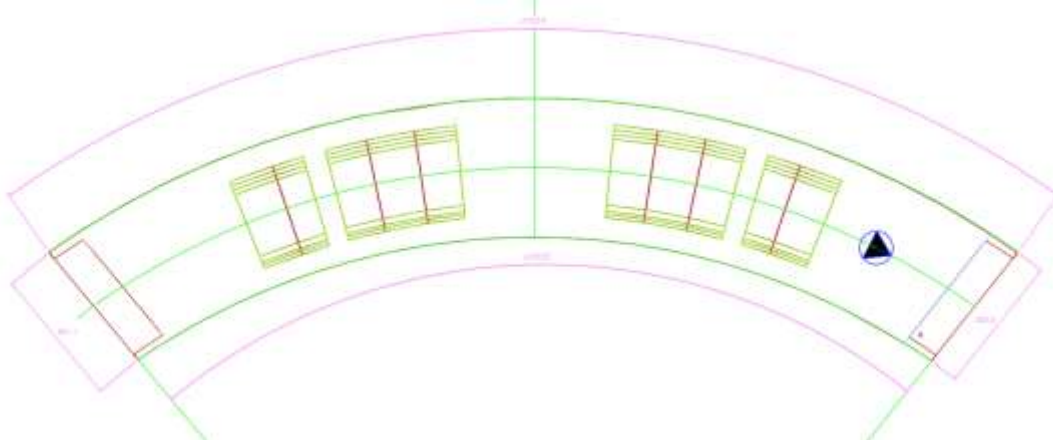


Figura 22. Geometría

En el análisis fue necesario utilizar 64 monotorones desadheridos de 5/8", los cuales fueron postensados una vez extraído la pieza, tensados al 75%, la distribución de los cables conservaba la curvatura de la trabe, separados 5 cm, como se presenta en la siguiente imagen:

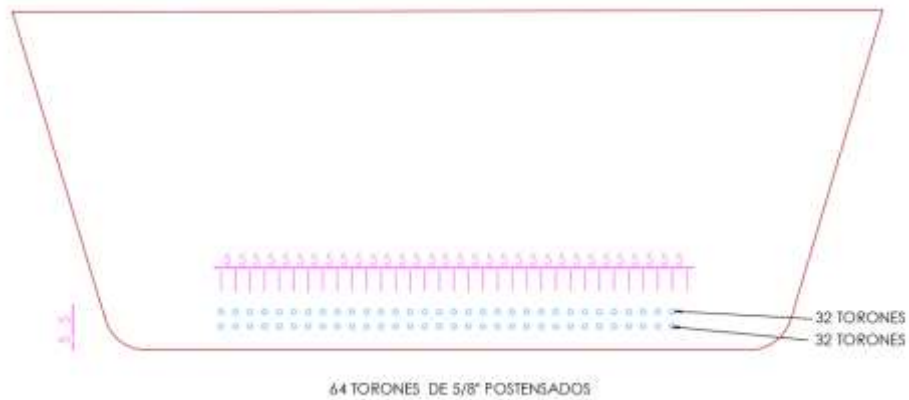


Figura 23. Configuración de torones

Posterior al colado de la trabe y el concreto alcanzando 80% F^c , se realizó el postensado de la pieza. Los concretos utilizados en el proyecto es de alta resistencia $f^c=550 \text{ Kg/cm}^2$.



Figura 24. Trabe prefabricada.

La trabe en la etapa de fabricación (Izaje), transporte y montaje se tuvo la consideración simplemente apoyado, en la etapa final la consideración es de un puente continuo (postensado en sitio y aceros de refuerzo en las zonas de mayor demanda).



Figura 25. Montaje de trabe TCC.

La trabe curva tiene una capa de compresión de 25 cm, al generar la sección compuesta se tiene un peralte de 1.40 m, (en el firme de compresión se ubicaron los cables de postensado y aceros de continuidad), la trabe se revisó a flexión, cortante, deflexión, torsión, etc. y todas las condiciones de apoyo durante todo el proceso de construcción (montaje y servicio), el cual cumple los parámetros establecidos en las normas técnicas de la Ciudad de México.



Figura 26. Montaje tabletas

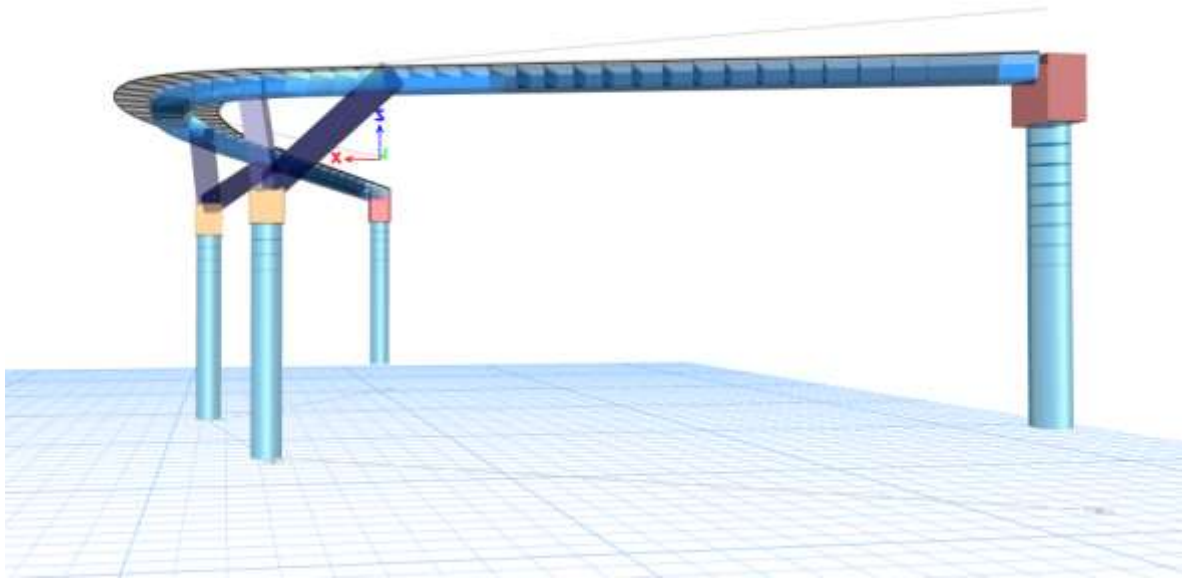


Figura 27. Modelo Tridimensional.

CONCLUSIONES

El contenido del presente artículo constituye una útil referencia documental para la correcta ejecución de la superestructura de estructuras de concreto prefabricado, bajo condiciones fuera de lo común.

Los obstáculos físicos y de horario son cada vez más frecuentes en los proyectos en zonas urbanas, por lo que éstos deben ser considerados desde la etapa de proyecto; el nuestro caso, este aspecto fue el más trascendente para el proyecto.

La revisión de las diferentes etapas constructivas es común para las estructuras prefabricadas y los puentes especiales, estas revisiones fueron aplicadas a la estructura, en particular las etapas del montaje de las columnas centrales, el montaje de las traves TA sobre estas columnas y el montaje y fijación de las traves TCC.

Este puente al ser una estructura atípica debe considerar en su diseño diferentes reglamentos, ya que algunos no consideran aspectos de conexiones y se debe recurrir a otros reglamentos.

La comunicación estrecha entre las áreas de ingeniería, fabricación, montaje y construcción en sitio deben ser fundamentales para el éxito del proyecto, la retroalimentación a Ingeniería de las variaciones en las diferentes etapas.

REFERENCIAS

RCCDMX (2017), “**Reglamento de Construcciones del Distrito Federal**”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 15 de diciembre de 2017. pp. 2-712.

NTCDCEC (2017), “**Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto**”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 15 de diciembre de 2017. pp. 372-566.

ACI318S-14 (2014), “**Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural**”, American Concrete Institute (ACI), enero 2015, 587 pp.

PCI Design Handbook (2010), “**Precast and Prestressed Concrete Seventh Edition**”, Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), 2010, 828 pp.