

Puente Internacional "Gordie Howe" – Proyecto del Puente Principal atirantado

Gordie Howe International Bridge– Design of Main Cable-Stayed Bridge

Barry Chung^a, Antonio Martínez Cutillas^b, Alejandro Pérez Caldentey^c, Juan
Antonio Navarro González-Valerio^d, Javier Milián Mateos^e, Santiago Rodríguez Lorente^f
y Antonio Leocadio Gutiérrez Llorena^g

^a PhD, PE, SE. AECOM. Complex Bridges Practice Lead. barry.chung@aecom.com

^b Doctor Ingeniero de Caminos. Carlos Fernández Casado, S.L. Director. amartinez@cfcsl.com

^c Doctor Ingeniero de Caminos, PE, PEng. FHECOR North America. Director. apc@fhcor.es

^d Ingeniero de Caminos, PE. CFC-USA Corp. Lead Bridge Engineer. janavarro@cfcsl.com

^e Ingeniero de Caminos. FHECOR Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto. jmm@fhcor.es

^f Ingeniero de Estructuras. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniero de Proyecto. srodriguez@cfcsl.com

^g Ingeniero de Caminos. FHECOR Ingenieros Consultores. Ingeniero de Proyecto. alel@fhcor.es

RESUMEN

El Puente Internacional "Gordie Howe", además de ser el puente atirantado de mayor luz de Norteamérica, también posee el tablero mixto de mayor luz del mundo, con mucha diferencia respecto construcciones anteriores. La esbeltez del tablero, junto con los muy estrictos requerimientos estéticos, de durabilidad y de redundancia han hecho del diseño del puente principal un desafío para la ingeniería estructural.

ABSTRACT

The "Gordie Howe International Bridge" is not only the cable-stayed bridge with the longest span in North America, but also the composite deck with the longest span in the world, with a significant difference with all previous existing bridges. The slenderness of the deck section, together with strict requirements for aesthetics, durability and redundancy have turned its design into a remarkable structural engineering challenge.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, mixto, esbeltez, criterios estéticos, redundancia, durabilidad.

KEYWORDS: cable stayed, composite, slender, aesthetic criteria, redundancy, durability

1. Descripción general del proyecto

El puente International Gordie Howe (GHIB) cruza la frontera entre Canadá y Estados Unidos sobre el río Detroit, en las ciudades de Windsor (Canadá) y Detroit (EE. UU). Tiene una longitud total de 2.5 km y una anchura de 37.5 m que alberga seis carriles para circulación, una acera peatonal y dos arcenes muy amplios, ya previstos para 8 carriles en el futuro. Está formado por un tramo atirantado de siete vanos y luces 38.5 – 60 – 258.5 – 853 – 253.5 – 60 – 38.5 m; y dos viaductos de aproximación que conectan con los pasos fronterizos en Windsor y Detroit respectivamente: el del lado Canadá con 432 m de longitud y vanos tipo de 56 m, y el estadounidense, algo mayor, con una longitud de 543 m y vanos tipo de 73 m. Sin duda, el aspecto más destacado del puente es el vano principal de 853 m de luz, que constituye el mayor vano atirantado de Norteamérica y el vano de sección mixta mayor del mundo.



Figura 1. Alzados del puente terminado y en construcción

El propietario del puente es Windsor-Detroit Bridge Authority (WDBA) que, mediante una colaboración público-privada,

adjudicó el contrato de concesión al consorcio Bridging North America General Partnership (BNA), formada por ACS Infrastructure, Fluor y Aecon, para proyectar, construir, financiar y operar toda la infraestructura que incluye, además del puente, los dos aduanas (POE, Port of Entry), una en Canadá y otra en Estados Unidos, y un enlace con la autopista I-75. La inversión total ha sido de unos 5500 millones de dólares. La construcción ha corrido a cargo de la UTE formada por Dragados, Fluor y Aecon y el equipo de diseño estuvo liderado por Aecom, con apoyo de la UTE Carlos Fernández Casado – Fhecor para la Ingeniería de Construcción y el proyecto de determinadas partes del puente.

El puente lleva el nombre del carismático jugador de hockey sobre hielo canadiense, nacido en Windsor, que jugó en el equipo de la ciudad de Detroit toda su vida.

2. Génesis del proyecto

En el año 2000 se inició la planificación del proyecto del puente internacional Gordie Howe, que consistiría en construir un nuevo puente y las correspondientes instalaciones fronterizas a través del río Detroit, que uniría las ciudades de Windsor (Ontario) en el Canadá y Detroit (Michigan) en los Estados Unidos de América. La ruta proporcionaría un flujo de tráfico ininterrumpido entre las principales carreteras interestatales y autopistas, a diferencia del cruce actual por medio del Puente Ambassador, situado aguas abajo, que conecta la trama urbana de ambas ciudades. Este proyecto de infraestructura crítica manejará más del 28% del tráfico comercial por carretera entre Canadá y Estados Unidos. El desarrollo del proyecto avanzó en los años posteriores para incluir los prescriptivos estudios ambientales, estudios geotécnicos, adquisiciones preliminares de terrenos, trabajos previos y permisos de diversa índole.

Esto culminó con la publicación de un Concurso de Precalificación en 2015 para

Concesión Público-Privada (Public Private Partnership) (P3) para proyectar, construir, financiar y operar toda la infraestructura. En 2016 se anunciaron tres candidatos preseleccionados y el contrato final se adjudicó al Consorcio P3 ganador, Bridging North America (BNA), en 2018.



Figura 2. Alzado del puente en construcción, lado Canadá

3. Tipología del puente

En [1], [2], [3] y [4] se pueden encontrar descripciones generales del proyecto.

El puente principal consta de un cruce atirantado con un vano central de 853 m de luz,

un vano de compensación de EE. UU. de 357 m de luz y un vano de compensación canadiense de 352 m y dos pilares intermedios dentro de cada vano lateral. Las torres a cada lado del río tienen una altura de 220 m y el tablero permite un gálibo de navegación de 42 m sobre el río Detroit. En el momento de la construcción, el Puente Principal será el décimo puente atirantado de mayor luz del mundo y será el puente atirantado de tablero mixto de mayor luz del mundo.

El tablero se apoya verticalmente y transversalmente en las torres principales. En la dirección longitudinal, los apoyos fijos se ubican en la torre de EE. UU., mientras que la torre canadiense permite la dilatación de origen térmico y reológico mediante el uso de dispositivos de bloqueo que se activan para las acciones dinámicas de frenado, viento y sismo.

Debido a la relación entre las longitudes del vano principal y lateral, las pilas intermedias de los vanos laterales necesitan de cables de pretensado vertical para hacer frente a las tracciones debidas a la sobrecarga.

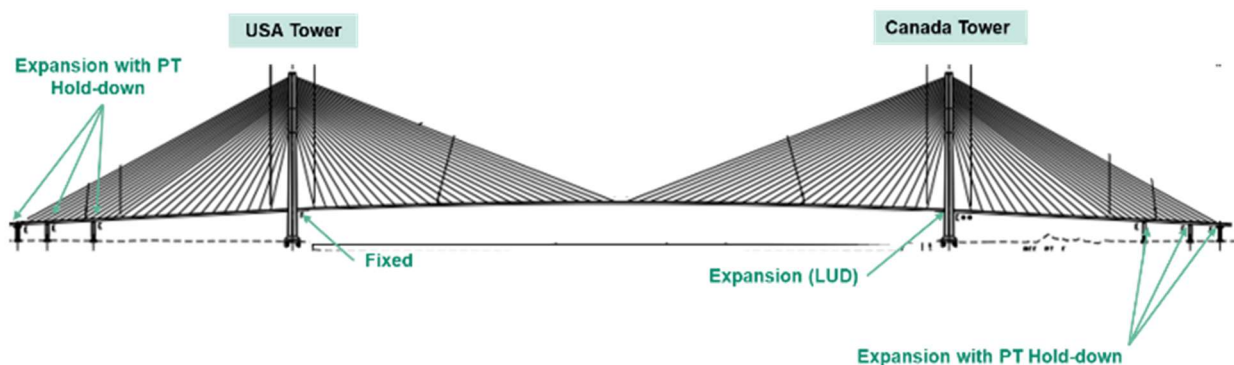


Figura 3. Alzado esquemático del puente, incluyendo configuración longitudinal

4. Calibración de los tirantes

El número de tirantes del puente es de 27 parejas a cada lado de cada pilono, es decir, un total de 216 tirantes. La separación típica es de 15 m en la zona del vano principal, coincidiendo con la longitud de los segmentos en que se divide la construcción del puente por avance en voladizo.

En la zona del vano de retenida también se disponen con una separación de 15 m en general, salvo en los vanos entre las pilas de anclaje en los que se reduce la separación a 10 m.

La fuerza de inicial de los tirantes es una consecuencia de la distribución del peso del tablero. Dado que el tablero tiene una carga permanente cuasi constante a lo largo del puente, y la separación entre los cables es el

mismo en el vano lateral y en el vano principal, las fuerzas en los cables son muy similares (vano lateral en comparación con el vano principal) para equilibrar el peso de la estructura y evitar introducir flexiones permanentes en la torre. Cuando el espaciado de los cables en el tramo lateral es menor, se ha planteado una estrategia de equilibrio y fuerzas iniciales en dichos cables para lograr lo siguiente:

- Minimizar las flexiones tanto en el tablero y como en la torre,
- Distribuir, de la mejor forma posible, las reacciones en los pilares de los vanos laterales. Para lograr esto, los cables que se anclan cerca de los pilares del tramo lateral tienen fuerzas mayores en comparación con los cables que se encuentran entre los pilares, pero están dimensionados para mantener el número máximo de cordones por cable por debajo de 127.

Las tracciones totales que deben soportar los pilares de los vanos laterales dependen de la cantidad de carga que se emplea para contrarrestar la flexión en las torres principales.

Las fuerzas iniciales de estos cables se obtuvieron minimizando las flexiones de las torres en situación de carga permanente, tanto a corto como a largo plazo. Adicionalmente debía cumplirse que no se transmitiesen tracciones a la cimentación bajo cargas permanentes en su base. Las fuerzas de pretensado de los tirantes de los pilares de retenida se dimensionaron con la condición de minimizar las tracciones en los apoyos, estableciéndose criterios especiales de redundancia.

5. Cimentaciones

En [5] se puede encontrar una descripción más detallada de las cimentaciones, torres y pilas, tanto para su proyecto como su construcción.

Las cimentaciones de las torres principales están formadas por pilotes perforados de 3 m aproximadamente de diámetro nominal empotrados en el lecho rocoso. Se construyó un

pilote de prueba para verificar tanto el procedimiento de construcción como la capacidad de carga de la roca utilizando un ensayo por medio de una celda de carga Osterberg.

Cada encepado individual debajo de los fustes de la torre está conectado por una viga de atado transversal postensada que transmite las fuerzas de tracción resultantes como consecuencia de la inclinación de los fustes.

Cada fuste de las pilas del vano lateral se apoya en un solo pilote perforado de aproximadamente 3 m de diámetro nominal, similar a los correspondientes de la torre. Los pilotes individuales no son redundantes y han sido diseñados con la condición de no tracción bajo cargas permanentes en el nivel superior de la roca, pero se admite una tracción limitada bajo las combinaciones de carga de estado límite último (ELU).

6. Torres y pilas de retenida

Las torres a cada lado del río Detroit tienen una forma de "Y" invertida con fustes de hormigón armado en sección cajón rectangular. La cabeza de la torre contiene cajones de acero para los anclajes de los tirantes, conectados a la sección de hormigón. Una característica de la torre es la ausencia de un puntal a nivel del tablero, siendo la viga de atado de la cimentación la encargada de transmitir las acciones horizontales que transmite el tablero a cada fuste individual.

Se utiliza acero de armar convencional en toda la torre, excepto dentro de la región de la zona de salpicaduras al nivel del tablero, donde se ha empleado acero inoxidable. El acceso interno de la torre para su inspección y mantenimiento se realiza por medio de escaleras, y ascensores tanto en los fustes como en la cabeza.

Las pilas de retenida P10 y P15, en la transición con los vanos de acceso de EE. UU. y Canadá, tienen un fuste debajo de cada viga de borde, conectada con una viga postensada que

también soporta los apoyos para las vigas del puente de acceso, con tirantes verticales para proporcionar una compresión neta en los apoyos que evite la tracción en combinación de cargas características.

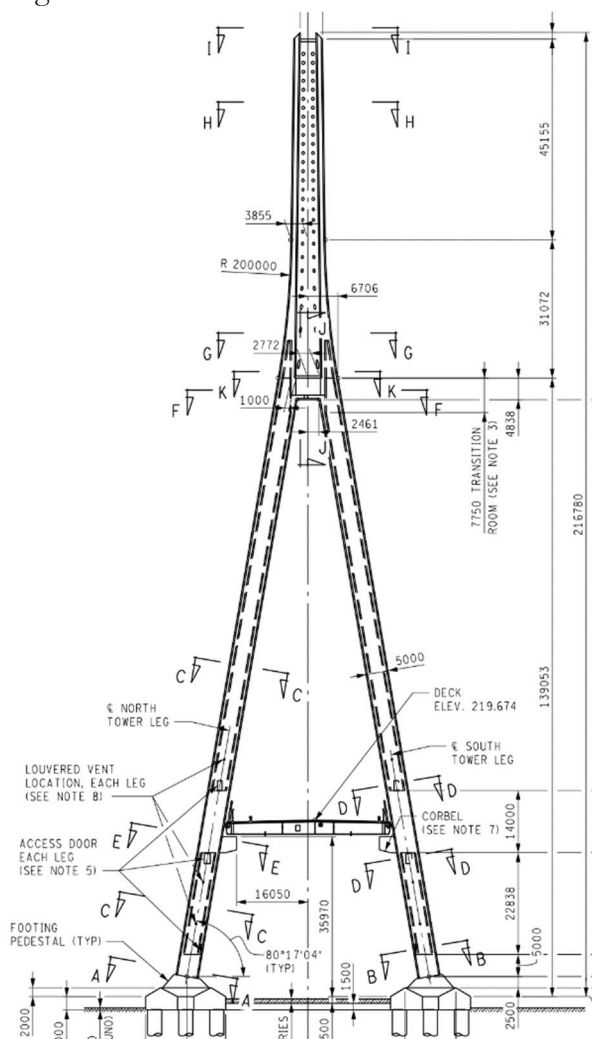


Figura 4. Alzado de torre

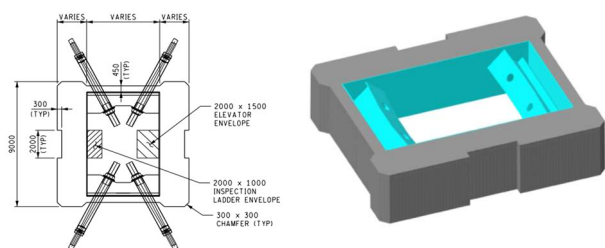


Figura 5. Esquema de los armarios de anclaje en la torre

Las pilas de retenida P11, P12, P13 y P14 están formadas por dos fustes independientes, cada uno ubicado debajo de las vigas del borde del tablero. Cada fuste también tiene unos tirantes verticales para proporcionar una compresión neta en los apoyos para evitar que

entraran en tracción bajo las combinaciones de cargas características. Cada apoyo contiene cuatro cables de pretensado para proporcionar la redundancia requerida.

El proyecto de estos cables tuvo en cuenta unos requerimientos especiales, incluidos los requisitos de redundancia, sustitución sin restricción al tráfico y los movimientos longitudinales significativos debido a la gran distancia al punto fijo longitudinal del tablero ubicado en la torre estadounidense.

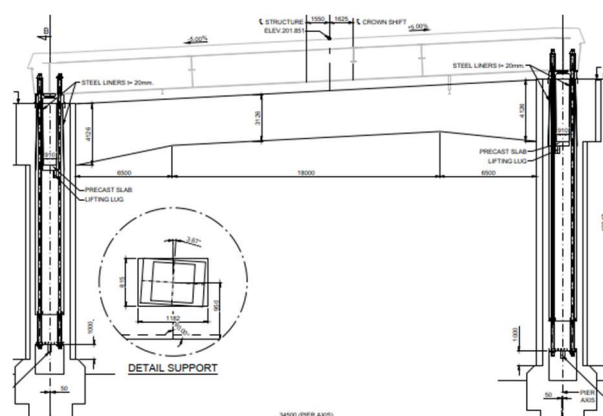


Figura 6. Pilas de retenida P10 y P15, con 2 fustes y un dintel de apoyo postensada para las vigas doble T de los puentes de acceso

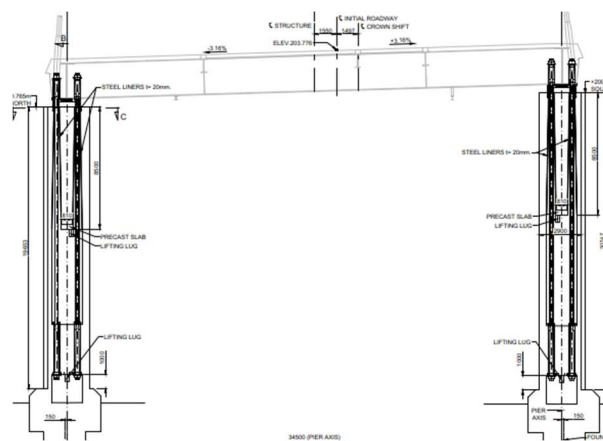


Figura 7. Pilas de retenida P11 a P14 con dos fustes independientes

Todos los apoyos en las pilas de retenida P11 a P14 se fijaron transversalmente permitiendo el movimiento longitudinal, con apoyos de disco y superficies deslizantes de PTFE en los pilares P11 y P14, y apoyos esféricos con superficies deslizantes de UHMWPE en P12 y P13 debido a limitaciones de tamaño.

7. Tablero

La sección transversal tipo del tablero tiene una configuración inicial de seis carriles de tráfico, tres en cada dirección, junto con un carril multiusos en el lado norte del puente. El puente permitirá una futura configuración de ocho carriles, cuatro carriles en cada dirección, al reducir el ancho del carril multiusos.

Las vigas de borde han sido dimensionadas teniendo en cuenta los efectos de segundo orden, incluyendo la no linealidad

La losa de hormigón tiene un espesor constante de 250 mm, con 10 mm para futuros fresados, y está formada por elementos prefabricados, soportados por las vigas de borde, las vigas transversales y las vigas de redundancia. Las losas se unen con uniones de hormigón in-situ encima de la estructura de acero.

El tablero se completa en los bordes norte y sur con un voladizo hormigonado in situ que mejora la aerodinámica del puente y proporciona un soporte para la imposta de acero.

Un aspecto específico del tablero han sido los requisitos de vida útil requeridos por el proyecto. Estos requisitos incluían la necesidad de que todas las armaduras fueran de acero inoxidable y el requisito de que no hubiera tensiones de tracción en la losa de hormigón para las combinaciones de carga de servicio. Este último requisito ha obligado a introducir tanto un postesado longitudinal en las zonas donde se reducía la carga axil por el efecto de los tirantes (junto a las pilas de retenida y en la mitad del vano principal) como un postesado transversal a lo largo de toda la longitud del puente, para resistir las cargas locales de las ruedas del camión. Para evitar el aumento del espesor de la losa, se utilizó un postesado con vaina plana que contenía hasta 5 cordones tanto para el postesado longitudinal como para el transversal.

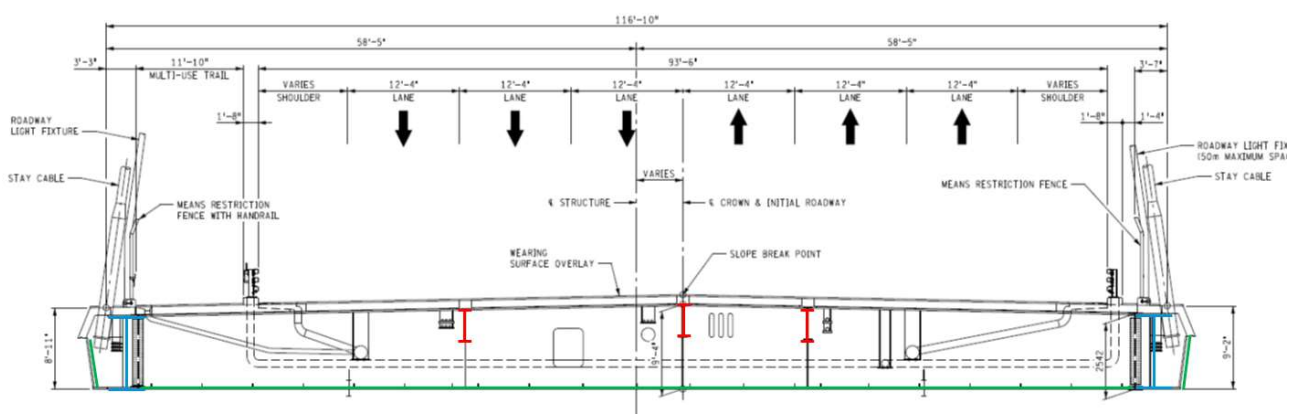


Figura 8. Sección transversal del tablero, incluidas las vigas de borde (azul), el panel de recubrimiento inferior de acero no estructural (verde) y tres vigas de redundancia (rojo)

9. Comportamiento aerodinámico

Se realizaron estudios aerodinámicos detallados en la estructura del puente para analizar las fuerzas estáticas, la estabilidad frente a flameo y las oscilaciones inducidas por vórtices tanto en situación de servicio como de construcción. Se llevaron a cabo estudios de bataneo teniendo en cuenta el efecto de las ráfagas para proporcionar

demandas de carga cuasiestáticas que se aplicaron al análisis de la estructura. Se llevaron a cabo ensayos tanto de modelos seccionales en el túnel de viento, como un modelo aeroelástico completo para comprobar la estabilidad frente a flameo, el desprendimiento de vórtices y las vibraciones por bataneo. Además, se estudiaron varias etapas de montaje del tablero en el túnel de viento, junto con la situación exenta de la torre en construcción para el estudio de su comportamiento frente a fenómenos de galope.



Figura 9. Modelos aerodinámicos de la torre completa y del puente completo

8. Tirantes y anclajes

En [8] se puede encontrar una descripción más detallada del diseño de los tirantes.

Los tirantes fueron dimensionados de acuerdo con la sexta edición de PTI, con una vida útil de 100 años. Los tirantes están formados por cordones de 7 alambres con vaina individual engrasados en una vaina colectora de polietileno de alta densidad (HDPE) extruido blanco. Los cordones de los cables son de 15,7 mm de diámetro Grado 1862 MPa / 270 ksi conforme a los requisitos de ASTM A416/A416M. Se proporcionó de esta forma 2 barreras frente a la corrosión. El diseño de la vaina exterior tiene características especiales para hacer frente a los requisitos aerodinámicos, así como controlar la formación de acreciones de hielo de gran tamaño que puedan impactar sobre los vehículos tras su desprendimiento.

Se utilizaron tirantes para los elementos de pretensado de las pilas de retenida, y se diseñaron con las mismas características y especificaciones que el cable atirantado, excepto que su vida útil fue de 125 años.

El número de cordones por cable osciló entre 43 y 121, siendo el cable más largo de aproximadamente 450 m de largo y una longitud total de cordones de aproximadamente 4844 km. Para los cables de las pilas de retenida, el número de cordones varía de 17 a 49, con longitudes de 17,9 m a 24,5 m entre anclajes.

La resistencia B del diseño del estado límite PTI de los anclajes se ha abordado mediante ensayos, y todos los desviadores fuera de los anclajes se han diseñado con un radio de 4,3 m para evitar que el Strength B del PTI gobierne el número de cordones por encima del Strength A del PTI.

Todos los tirantes tienen un amortiguador externo conectado al tablero, ya sea directamente o con un marco de acero. Para

minimizar el diámetro de los tubos guía de anclaje, y teniendo en cuenta las rotaciones significativas del estado límite de servicio (ELS), los dispositivos de sujeción se ubican más allá de los tubos guía. Su diámetro se definió para evitar que el haz entrara en contacto con los tubos guía en ELS. En algunas localizaciones, se permitió que el haz de cordones entrara en contacto con el tubo guía en ELU y, en este caso, se especificó un elemento elastomérico, con el radio correspondiente de 4,3 m. La longitud de los desviadores (abrazaderas, topes y desviadores de anclaje) se proyectó para permitir las rotaciones máximas de ELU.

La desviación máxima de los cordones en ELS en los anclajes se limitó a un máximo de 25 mrad, incluida una tolerancia de 5 mrad para la fabricación y la instalación.

Para el deshielo de cables atirantados, todas las vainas de HDPE incluyen un anillo para evitar la acumulación excesiva de hielo, y se desarrollaron detalles para permitir futuras medidas de deshielo activo sin crear modificaciones estructurales significativas.



Figura 10. Vainas de tirantes con anillos

Como se indicó anteriormente, los cables de pretensado de las pilas de retenida utilizan la tecnología de cable atirantado. Las rotaciones son significativas; hasta 70 mrad ELU, pero este se permite a través de un desviador fijo con un radio de 4,3 m ubicado en el extremo de los tubos guía, lo que evita que los cordones en los anclajes desarrollen rotaciones mayores a los 25 mrad, ya sea en ELS o ELU. El fabricante, Dywidag, realizó pruebas adicionales para

estudiar el contacto de los cordones en los desviadores bajo una condición de rotación máxima.

10. Redundancia

Al igual que con todos los puentes modernos, la redundancia es un requisito importante para el diseño de puentes. En cuanto a los cables, se evaluó el requisito típico para permitir la pérdida de un tirante. Una característica significativa del puente es que todos los elementos de tracción de acero se diseñaron con redundancia y se llevaron a cabo extensos estudios de fractura. Hay que indicar que, desde el punto de vista longitudinal, un puente atirantado moderno es una estructura altamente redundante. En general, cualquier fallo de la viga de borde no daría lugar a un mecanismo, ya que está soportada en múltiples apoyos por los tirantes, y se puede conseguir una redistribución de la ley de momentos flectores.

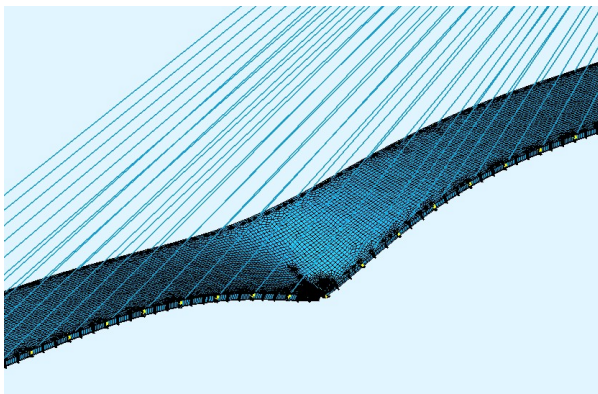


Figura 11. Cálculo de fallo de una viga de borde, no lineal geométrico y material

Para proporcionar redundancia a las vigas transversales, los largueros que normalmente se utilizarían para soportar los paneles prefabricados se han dimensionado para que actúen como vigas continuas. Estas vigas de redundancia proporcionan un camino alternativo a las cargas transversales si se produce un fallo de la viga transversal. También ayudan a proporcionar un camino alternativo de las cargas ante un fallo de la viga de borde.

Por consideraciones de redundancia en la ubicación de los armarios de anclaje de acero de

la cabeza de la torre, se realizaron estudios para permitir la pérdida de dos cables dentro de un plano de tirantes en el vano principal o en el vano de compensación, o la pérdida total de cuatro tirantes dentro de un nivel del cajón de anclaje.

11. Durabilidad

El puente principal fue diseñado para una vida útil de 125 años. Todos los materiales que se incorporan al puente fueron evaluados y documentados en un Plan de Durabilidad integral. La durabilidad del hormigón se basó en el "Código Modelo para el Diseño de Vida Útil" y utilizó el software específico STADIUM. La durabilidad de los elementos de acero para los requisitos de pintura de mantenimiento se basó en el sistema CAPP (sistema de evaluación de recubrimientos y prioridad de pintura).

Ficha técnica

- Propiedad: Representada por la Autoridad del Puente de Windsor Detroit.
- Consorcio Constructor: Bridging North America formado por ACS Infraestructure, Dragados, Fluor y Aecon.
- Proyectista principal: AECOM
- CFC-Fhecor: diseño de pilas, losa de hormigón, apoyos y juntas, puente chequeo independiente, ingeniería de construcción

Referencias

- [1] B. Chung, A. Martínez, J.A. Navarro, H. Corres, B. Regúlez, *Proyecto del Puente Internacional Gordie Howe – Descripción general y características de diseño*, IBC, Pittsburg 2022.
- [2] B. Chung, A. Martínez, H. Corres, J.A. Navarro, A. Leocadio, *Proyecto Puente Internacional Gordie Howe Descripción general y características de diseño*, Simposio IABSE Puentes de Gran Envergadura, Estambul, abril de 2023.
- [3] E. Tria, A. Ríos, C. Lucas, A. Vázquez, *Gordie Howe International Bridge Project*, IX Congreso

de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.

- [4] A. Vázquez, C. Lucas, A. Ríos, C. López, *Construcción del tramo atirantado (torres y tablero). Puente Internacional Gordie Howe*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [5] B. Chung, K. McLemore, A. Martínez, P. Schafer, A. Pérez, J.A. Navarro, J. Milián, S. Rodríguez, A.L. Gutiérrez, *Gordie Howe International Bridge – Diseño e ingeniería de montaje de torres, pilares y cimentaciones*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [6] B. Chung, A. Pérez, H. Corres, A. Martínez, J. Milián, B. Regúlez, J.A. Navarro, A.L. Gutiérrez, *Puente Internacional Gordie Howe - Proyecto del tablero del puente principal*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [7] B. Chung, A. Martínez, J.A. Navarro, A. Pérez, J. Milián, S. Rodríguez, A. Hermoso, A.L. Gutiérrez, A. Muñoz, G. Marinas, *Puente Internacional Gordie Howe - Ingeniería de construcción de la superestructura: proyecto y control*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [8] F. Martínez, L. Zangos, C. Lucas, A. Vázquez, *Puente Gordie Howe. Sistema de tirantes con prestaciones de protección especiales*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.